

BUKTI KORESPONDENSI
ARTIKEL JURNAL INTERNASIONAL BEREPUTASI

Judul artikel : Identifikasi Sesar Aktif di Pulau Bali dengan Menggunakan Data Pemetaan Geologi Permukaan dan Morfologi TektonikJurnal
Jurnal : Majalah Geografi Indonesia, Vol 35, No 1 (2021)
Penulis : Hurien Helmi, Gayatri Indah Marliyani, Siti Nur'aini

No	Perihal	Tanggal
1	Bukti konfirmasi submit artikel dan artikel yang disubmit	6 Desember 2020
2	Bukti konfirmasi review dan hasil review pertama	6 Januari 2021
3	Bukti koonfirmasi review kedua dan hasil review kedua	8 Februari 2021
4	Bukti konfirmasi artikel accepted	10 Februari 2021
5	Bukti konfirmasi artikel published online	3 Maret 2021

Bukti konfirmasi submission
artikel dan artikel yang
disubmit
(6 Desember 2020)



Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

[MGI] Submission Acknowledgement

1 pesan

Muhammad Kamal <m.kamal@ugm.ac.id>
Kepada: Mr Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

6 Desember 2020 pukul 19.43

Mr Hurien Helmi:

Thank you for submitting the manuscript, "Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi permukaan dan morfologi tektonik" to Majalah Geografi Indonesia. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL: <https://jurnal.ugm.ac.id/mgi/author/submission/61928>
Username: hurien_helmi

This submission acknowledgement is an auto-generated email from our online journal management system and CANNOT BE USED AS A FORMAL SUBMISSION PROOF OF AN ARTICLE TO THIS JOURNAL (Email ini bukan merupakan bukti formal pengiriman naskah di Jurnal ini). If you have any questions, please contact us. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Muhammad Kamal
Majalah Geografi Indonesia

Chief Editor
Majalah Geografi Indonesia
<http://jurnal.ugm.ac.id/mgi>
ISSN 01251-1790 (print), ISSN 2540-945X (online)

1 *Article*

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4

5 **Abstrak** Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi.
6 Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona
7 sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini,
8 gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk
9 melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey
10 lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m
11 serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis kelurusan
12 menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa
13 kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong
14 batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona
15 kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa
16 sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini
17 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang
18 akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

19

20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

21 *Abstract* Bali and its surrounding region are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone
22 to earthquake hazards. The structures that caused earthquakes in Bali are mainly from the front subduction faults and from
23 the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occur in the inland fault system.
24 This study aims to map the inland active faults in Bali using a combination of remotely-based and field-mapping methods.
25 We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry
26 processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest
27 lineaments. Our field observation confirms these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults.
28 These faults dissect Quaternary to recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow
29 earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study
30 provide a new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and may
31 contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

32

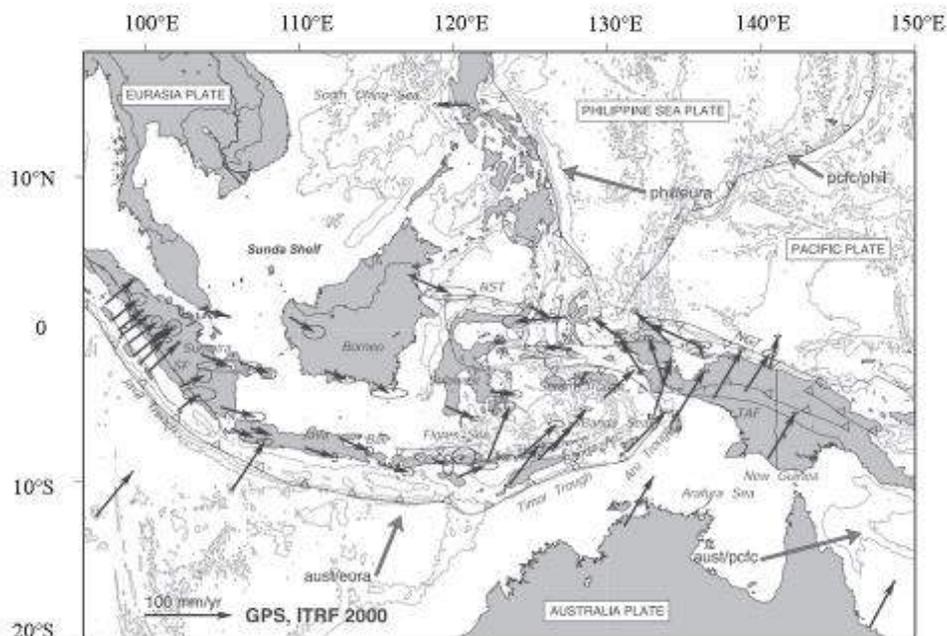
33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

34

35 **PENDAHULUAN**

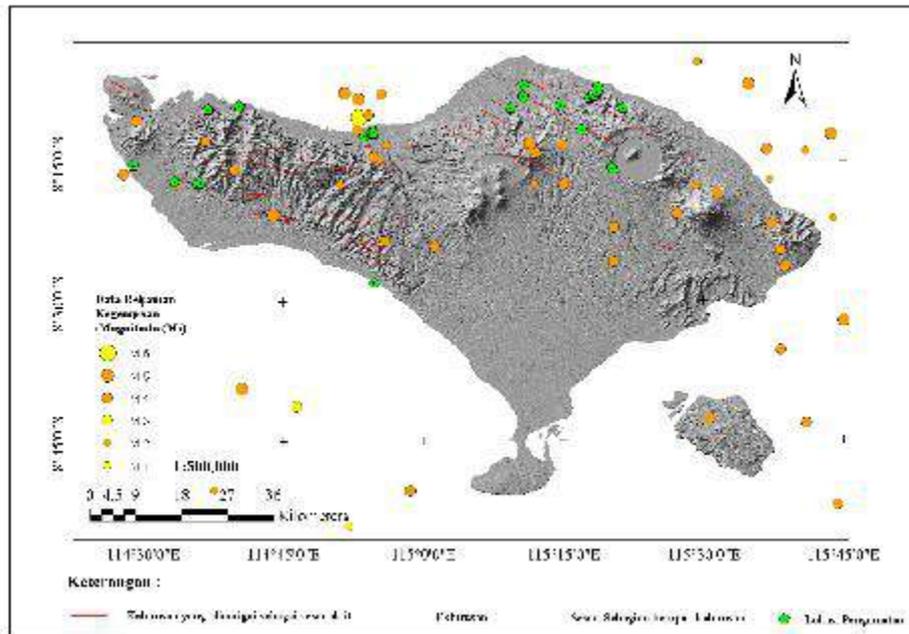
36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, 1966; Hamilton, 1979). Salah satu fitur tektonik yang prominen adalah subduksi Sunda di
39 mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Subduksi Sunda
40 ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga di selatan
41 kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di sekitar selatan

42 kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram (Hamilton,
43 W.B., 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1.).
44



45
46 Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock dkk., 2003)

47
48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu mengurangi risiko
51 bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau Bali. Pulau Bali
52 merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang tahun. Rekaman
53 seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah ini (Katalog
54 USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di
55 wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona
56 subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan
57 sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah
58 dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang
59 ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya
60 antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.



61
62
63
64
65
66
67

Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020 (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) dan hasil analisis kelurusan Pulau Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur Laut –Baratdaya (BD-TL)

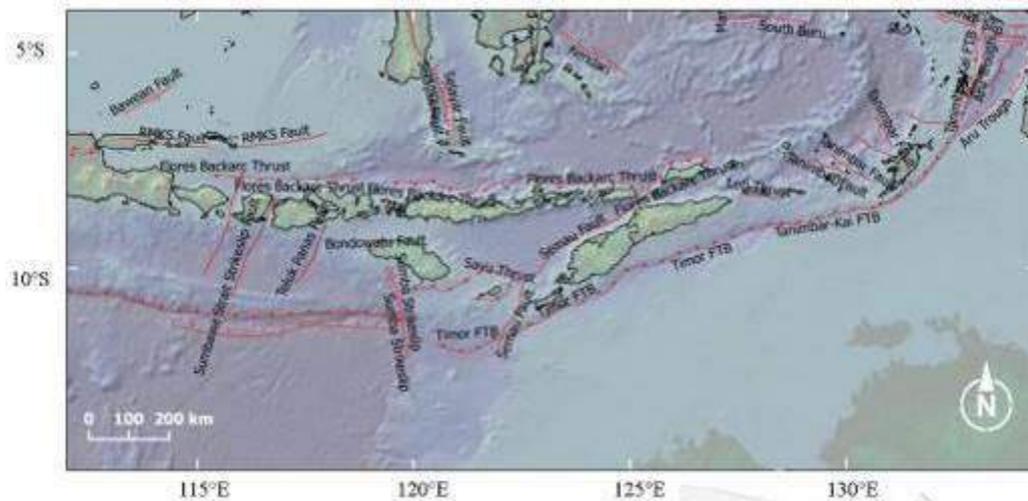
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77

Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo < M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditengarai menjadi penyebab terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

78
79
80
81
82
83
84
85
86

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi pada batuan dan endapan berumur Kuartar sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara

87 keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa diijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis
88 sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentukan morfologi dan geometri sesar yang dikenali di
89 lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau
90 Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi
91 terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)
92

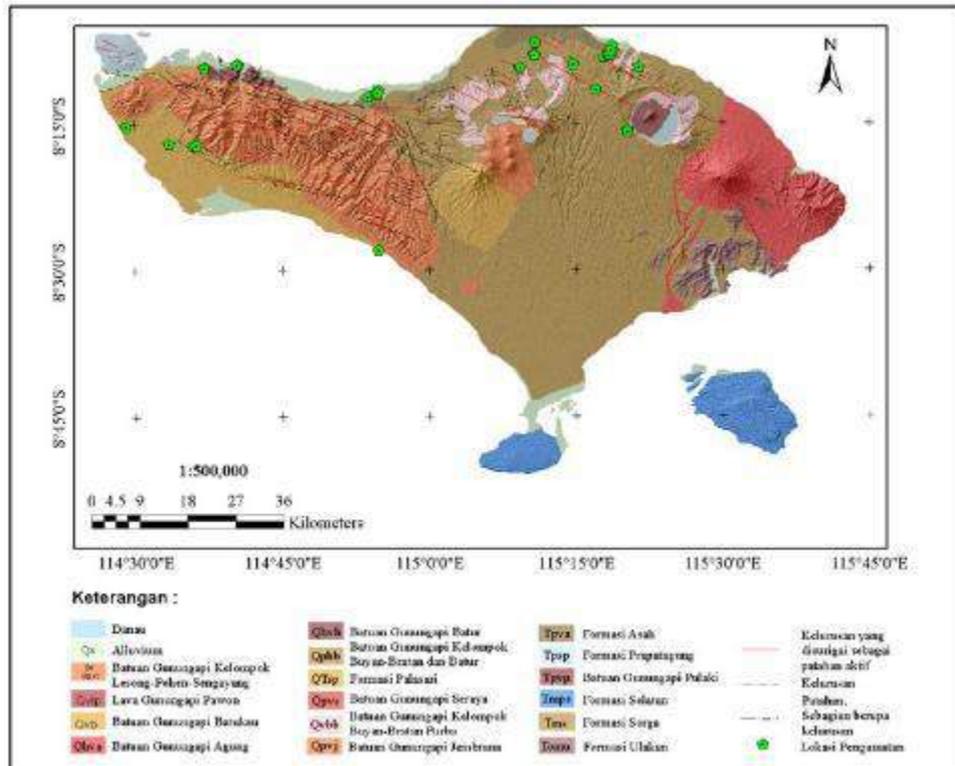


93
94 Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta Sumber dan
95 Bahaya Gempa Bumi Nasional (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).
96

97 **Tatanan Geologi Regional Pulau Bali**

98 Pulau Bali, Sumbawa dan Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan
99 yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas
100 pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan
101 menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets
102 dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran
103 struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar
104 naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011).
105 Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang
106 terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di
107 belakang busur ini diperkuat oleh Yasid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya, dkk
108 (2012) yang melakukan relokasi data seismisitas yang ditangkap oleh jaringan seismik lokal. Studi
109 yang dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali
110 yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar
111 naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di
112 wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994). Hasil analisis oleh Masturyono (1994).
113 menunjukkan bahwa keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya aktivitas kegempaan
114 lokal dan dangkal di wilayah tersebut. Batuan yang tersingkap di Bali didominasi oleh batuan

115 gunungapi berumur Kuartar yang terdiri atas lava, breksi vulkanik, pumis, lapili, tuf dan lahar yang
116 bersumber dari berbagai sumber gunung api kuartar dan di beberapa daerah tersingkap batuan
117 sedimen yang tersusun atas batugamping, napal, batupasir, batugamping terumbu dan batupasir
118 gampingan yang berumur Oligosen-Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998). Struktur yang
119 berkembang dan mendominasi di Pulau Bali berorientasi Baratlaut-Tenggara (BL-TG) yang sebagian
120 besar sesar yang berkembang berada di bagian barat Pulau Bali (Gambar 4) (Purbo-Hadiwidjojo, dkk.,
121 1998).



Gambar 4. Peta Geologi Regional Pulau Bali (modifikasi dari Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998)

METODE PENELITIAN

Parameter sesar aktif yang perlu diketahui dalam analisis bahaya seismik meliputi geometri, sejarah gempa bumi, laju pergerakan, dan perulangan gempa (McCalpin, 2009). Pemetaan merupakan tahap awal dalam rangkaian studi sesar aktif yang diteliti. Untuk mengetahui sejarah, laju dan pergerakan dan perulangan gempa perlu dilakukan studi paleoseismologi yang bertujuan untuk mengetahui lokasi, waktu kejadian dan estimasi magnitudo gempa yang terjadi di masa lampau (Wallace, 1981; Daryono, 2016).

Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi

137 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan
138 tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
139 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
140 dipetakan.

141 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
142 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
143 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar
144 Bali, Nusatenggara dengan skala 1:250.000 (-Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998) juga digunakan sebagai
145 acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif,
146 bisa dikenali melalui data DEM dan turunannya (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti
147 contohnya perubahan kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang
148 membentuk kelurusan (*lineament*) (Hady & Marliyani, 2020). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya
149 kelurusan sungai, lembah, punggung dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, 2020).

150 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
151 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
152 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
153 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
154 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur
155 Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur
156 sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh dari
157 katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan
158 dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar
159 tersebut aktif.

160

161 **HASIL DAN PEMBAHASAN**

162 Analisis Kelurusan

163 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
164 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBL-TTG) dan pola kelurusan
165 minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 2). Pola kelurusan yang
166 berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut
167 Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian
168 besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb).
169 Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok
170 Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb).
171 Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb
172 dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau
173 Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi

174 Jembrana (Qpvj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb,
175 Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang
176 memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing
177 trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km
178 - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan
179 berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).

180

181 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

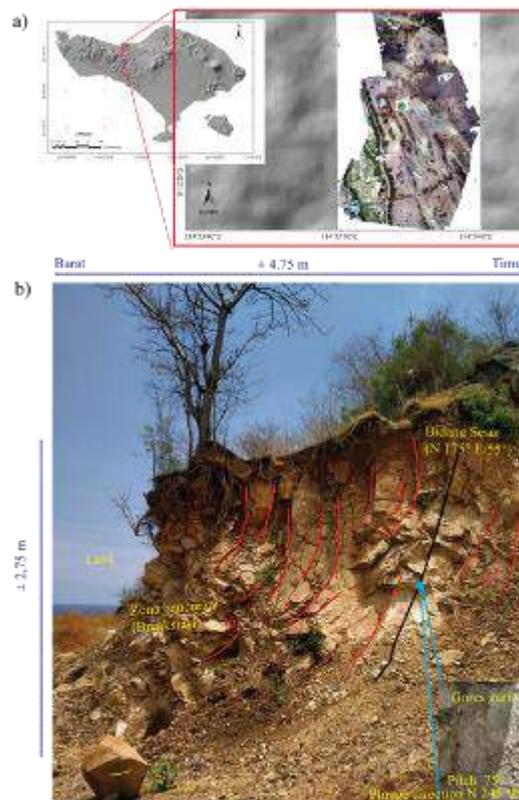
182 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
183 yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan
184 antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang
185 intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui.
186 Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada petunjuk peta kelurusan, kemudian setiap delineasi
187 kelurusan kami ditelusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang
188 berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

189 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
190 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpvv), Formasi
191 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
192 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar
193 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar
194 yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai
195 55cm.

196 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
197 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
198 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
199 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
200 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
201 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
202 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola
203 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif.

204 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
205 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
206 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
207 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
208 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998).
209 Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 6b),
210 dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75$ x 7,5 m. Unit lava

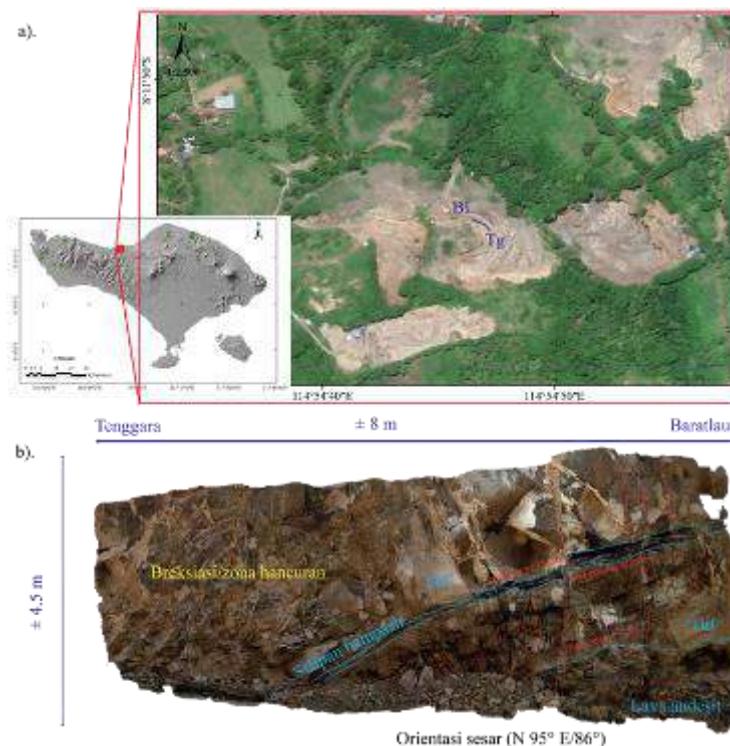
211 ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur
212 (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat
213 ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke
214 bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian
215 bawah, fragmen-fragmen ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan
216 adanya *drag fold* (Gambar 6a). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD ($N 175^{\circ}E/55^{\circ}$).
217 Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal
218 ini dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi $N 245^{\circ}E$ dengan pitch 75° dengan jenis
219 sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-
220 timurlaut (Gambar 6a).



221
222 Gambar 6. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh
223 melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a)
224 Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)
225

226 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
227 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava
228 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
229 menunjukkan orientasi $N195^{\circ}E/25^{\circ}W$. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
230 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf
231 yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh
232 ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N

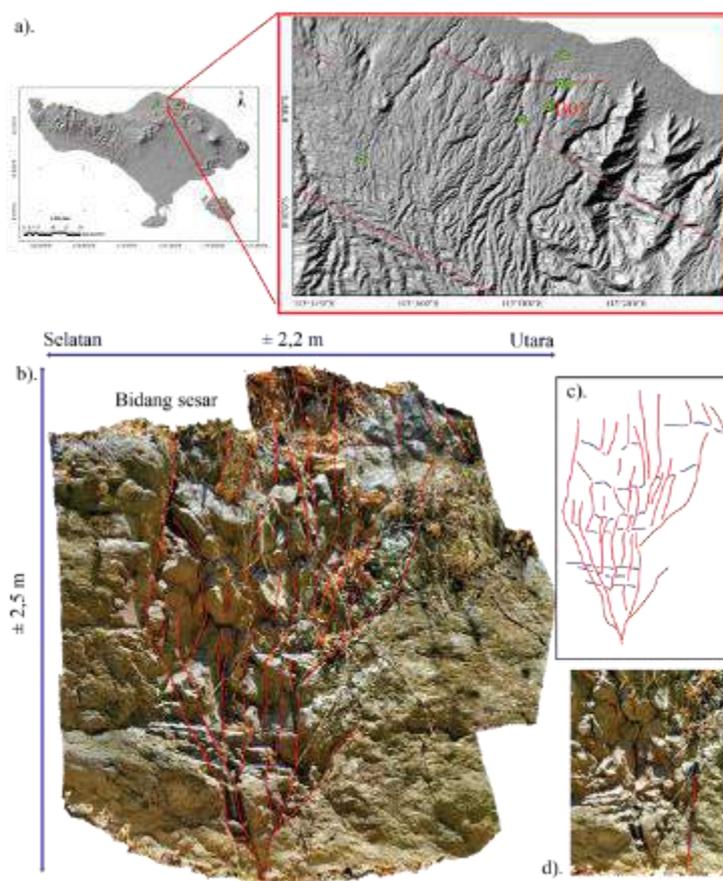
233 95°E/86° dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm. Orientasi
234 pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi
235 dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang
236 diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
237 (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur,
238 rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG
239 (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 1963-2020 (katalog USGS) menunjukkan asosiasi
240 gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang
241 diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang
242 diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuartar. Adanya asosiasi kegempaan
243 serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona
244 sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



245
246 Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu
247 (a). Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
248 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat
249 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (b).
250

251 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
252 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
253 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
254 bagian dari Formasi Qvbb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
255 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar
256 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan

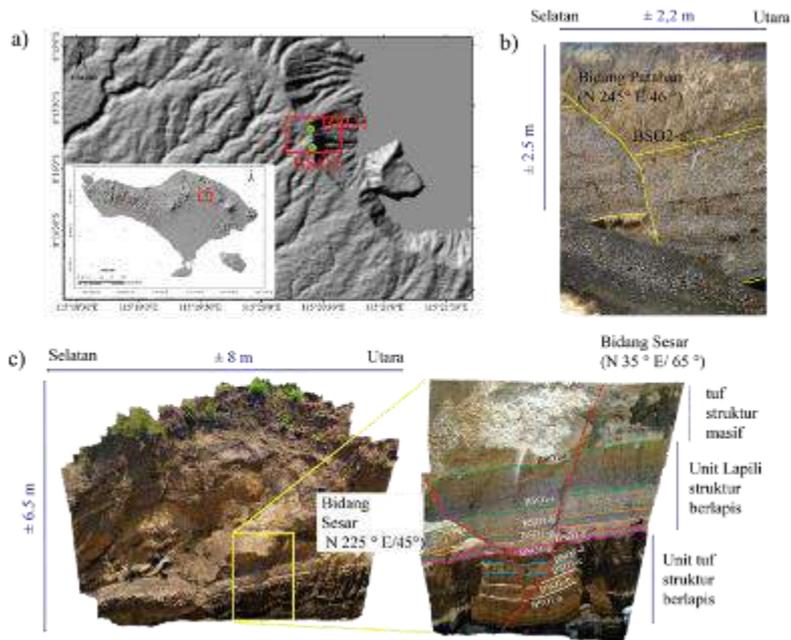
257 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
258 *flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 8a).
259 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
260 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
261 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
262 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa USGS tahun 1963-
263 2020, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km dengan skala
264 $M \leq 4$ (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
265 terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



266
267 Gambar 8. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada
268 singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi
269 sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)
270

271 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
272 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
273 Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75 m. Susunan litologi dari bawah ke
274 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
275 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuarter. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
276 unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi
277 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya (N245°E/46°) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona

300 (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
 301 terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

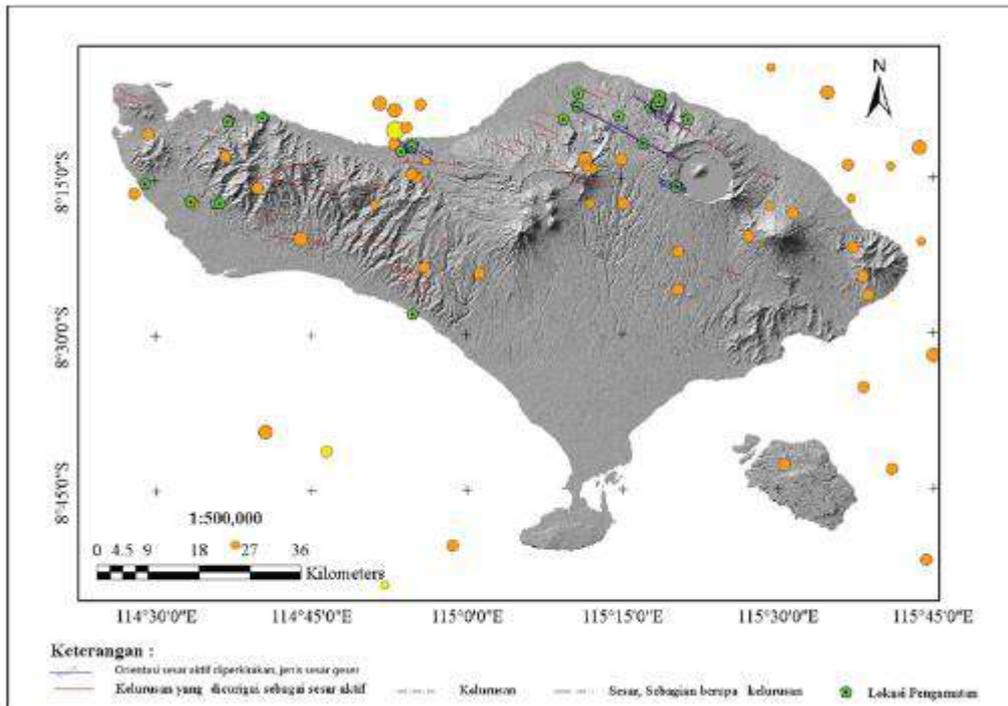


302
 303 Gambar 10. Lokasi singkapan batuan (a), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan
 304 komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 (b) dan unit tuf yang tersesarkan
 305 membentuk graben kecil di lokasi BS01 (c).
 306

307 Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a
Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55

308
 309 Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali
 310 didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar
 311 turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar
 312 turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 11). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan
 313 oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah
 314 TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut
 315 teridentifikasi memotong batuan berumur Kuartar.



316

317 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
318

319 KESIMPULAN

320 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
321 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
322 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
323 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
324 kemiringan $65-85^\circ$ sedangkan kemiringan pada sesar turun $\sim 40^\circ$ dengan kemiringan ke arah TL.
325 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
326 Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
327 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
328 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
329 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
330 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
331 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
332 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
333 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
334 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
335 gempa bumi di Pulau Bali.

336

337 UCAPAN TERIMA KASIH

338 Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan
339 Tinggi (DRPM Dikti) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen

340 Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian
341 Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian,
342 mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu
343 Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya
344 kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam
345 pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Iftitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten lapangan.

346

347 **KONTRIBUSI PENULIS**

348 Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis
349 dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip

350 Gayatri Indah Marlyani: analisis dan intepretasi data, pengenditan manuskrip

351 Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi data,
352 pengeditan manuskrip.

353

354 **DAFTAR PUSTAKA**

- 355 Hady,H.K.& Marliyani, G.I. (2020), Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the
356 Sumatran Fault System in North 1 Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*
357 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
358 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
359 measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
360 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
361 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Metereologi Klimatologi dan
362 Geofisika
363 Daryono, M. R. (2016). Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar
364 Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
365 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
366 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research*
367 *letters*, 21(20), 2191-2194.
368 Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print.Off.
369 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*,
370 100(10), 1503-1527.
371 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A.
372 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
373 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
374 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
375 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
376 Masturyono.(1994).Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
377 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
378 McCalpin, J. P. (2009). Paleoseismology. McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology.
379 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
380 example of a nascent continental fold?and?thrust belt. *Journal of Geophysical Research:Solid*
381 *Earth*, 92(B1), 441-460.
382 Purbo-Hadiwidjojo,P.M.M., Samodra, H., & Amin, T.C. (1998). Peta Geologi Lembar Bali, Nusa
383 Tenggara,Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.
384 Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017,
385 Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.

- 386 Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016).
387 On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System
388 (IGRS) 2013. FIG Working Week.
389 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
390 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
391 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
392 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
393 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
394 Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs
395 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
396 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
397 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
398 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
399

400 **Referensi websites:**

- 401 Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
402 U.S. Geological Survey, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,
403 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
404

Bukti konfirmasi review dan hasil review
pertama

(6 Januari 2021)



Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

[MGI] Editor Decision

1 pesan

Dr. Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>
Kepada: Mr Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

6 Januari 2021 14.23

Mr Hurien Helmi:

We have reached a decision regarding your submission to Majalah Geografi Indonesia, "Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi permukaan dan morfologi tektonik".

Our decision is: Revisions Required.

Please revise your paper according to the attached comments. Highlight the revised parts in the final version of your paper and give a response according to review comments.

We expect to receive the revised version of this paper manuscript within 30 days after this email has been sent; otherwise, we will consider it as DECLINE.

(Waktu yang diberikan untuk revisi selama 30 hari. Apabila lebih dari waktu tersebut, maka naskah tidak akan kami proses).

Dr. Bachtiar Mutaqin
Coastal and Watershed Research Group
Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada
55281 Yogyakarta, Indonesia
mutaqin@ugm.ac.id

Reviewer B:

1. Definisi tentang sebuah sesar dapat dikatakan sebagai sesar aktif perlu diperjelas dengan merujuk pada tulisan-tulisan ilmiah terdahulu.
2. Data kegempaan yang memuat lokasi dan kedalaman pusat gempa perlu ditampilkan dengan lebih memfokuskan pada Pulau Bali sebagai objek kajian dalam penelitian ini.
3. Perlu ditambahkan pembahasan tentang hubungan antara geometri sesar dengan skala kegempaan yang berpotensi terjadi. Pembaca perlu memahami apakah geometri sesar yang besar juga berhubungan dengan gempa besar atau tidak, dan sebaliknya.

Reviewer C:

Studi yang cukup menarik terkait sesar aktif di daratan Pulau Bali, Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dan diperbaiki. Daftar pustaka harus konsisten dengan sitasinya, Pola dan struktur kalimat ada yang perlu perbaikan, Urutan penyajian harus text lebih dulu sebelum gambarnya, dan lain-lain. Silahkan dicek komentar pada manuskrip.

Chief Editor
Majalah Geografi Indonesia

<http://jurnal.ugm.ac.id/mgi>

ISSN 01251-1790 (print), ISSN 2540-945X (online)

1 Article

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4
5 **Abstrak** Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi. Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini, gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. ~~Analisa~~ Analisis kelurusan menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

Formatted: Font: Not Bold

19

20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

21 **Abstract** Bali and its surrounding region ~~is~~are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone to earthquake hazards. The ~~main~~-structures that caused ~~earthquake~~earthquakes in Bali ~~mainly~~-are ~~mainly~~ from the front subduction faults and from the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently ~~occur~~occur in the inland fault system. This study aims to map the inland active faults in Bali using ~~a~~ combination of remotely-based and field-mapping methods. We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest lineaments. Our field observation confirms ~~that~~these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults. These faults dissect Quaternary ~~to~~-until ~~recent~~recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study provide ~~a~~ new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and ~~may~~contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

Formatted: Font: Italic

32

33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

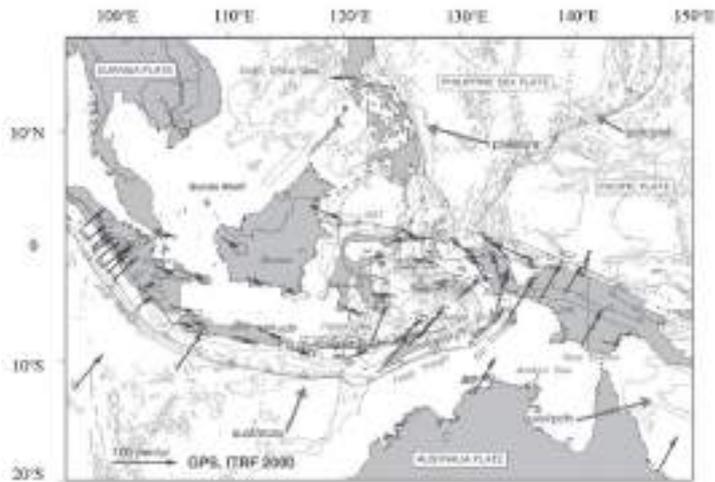
34

35 **PENDAHULUAN**

36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, J. T., 1966; Hamilton, W. B., 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi
39 Sunda di mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia.
40 Subduksi Sunda ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga
41 di selatan kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di

42 sekitar selatan kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram
43 (Hamilton, W.B., 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1).

44

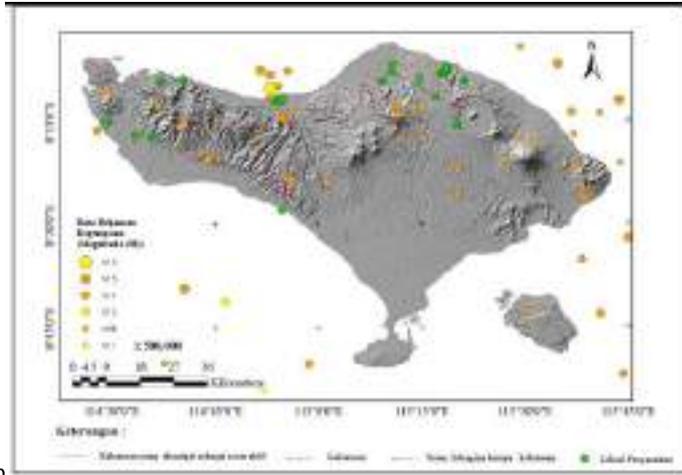


45

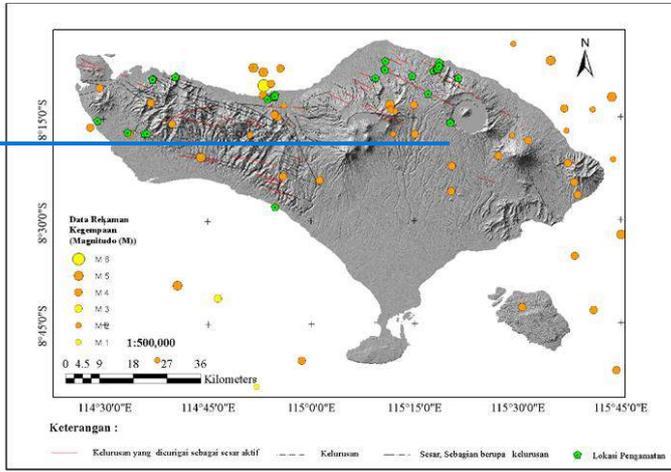
Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock [dkk.](#), 2003)

46

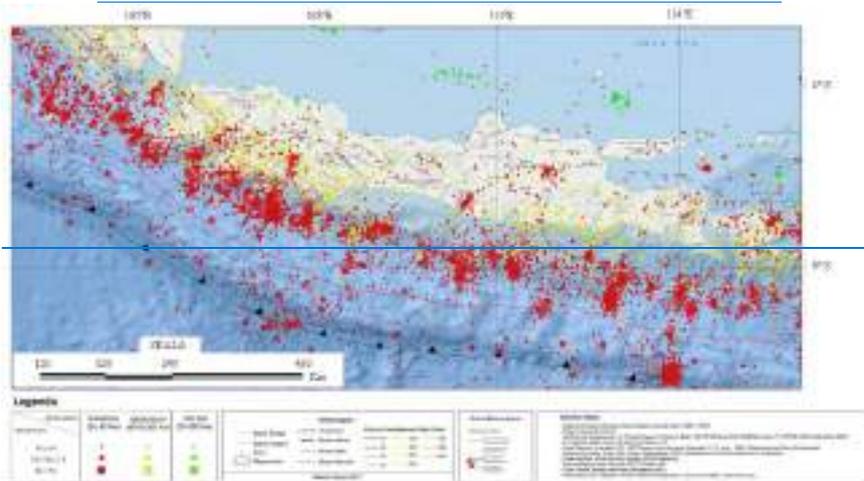
47
48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya [frekuensi kejadian](#) gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu [pengurangan](#)
51 [resiko](#) [mengurangi risiko](#) bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah
52 Pulau Bali. Pulau Bali merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan
53 sepanjang tahun. Rekaman seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan
54 di wilayah ini ([Katalog USGS](#), <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search> [Katalog BMKG yang](#)
55 [didownload dari](#), http://repogempa.bmkg.go.id/repo_new/2009-2018; Gambar 2), akan tetapi
56 pemetaan sesar aktif di wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi
57 terjadi pada zona subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya
58 mengindikasikan sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih
59 rendah dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata
60 yang ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya
61 upaya antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul



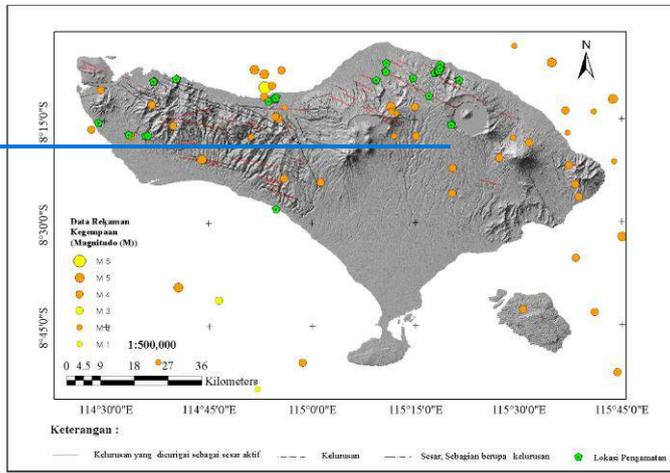
62 akib at gempa bumi di
63 wilayah ini.



64



65



Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman aktivitas kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020 (seismisitas) Sunda Timur (BMKG, (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search201>) dan hasil analisis kelurusan Pulau Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur Laut – Baratdaya (BD-TL). 8)

Formatted: Line spacing: single

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

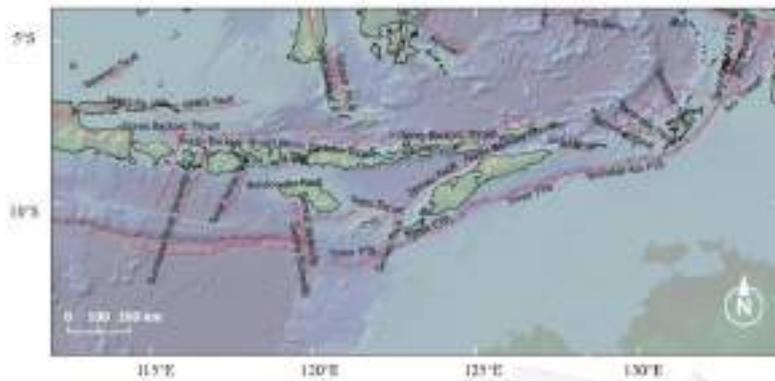
92

Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo < M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditenggarai ditenggarai menjadi penyebab terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi pada batuan dan endapan berumur Kuarter sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara

93 keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa dijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis
94 sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentukan morfologi dan geometri sesar yang dikenali di
95 lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau
96 Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi
97 terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)

98



99

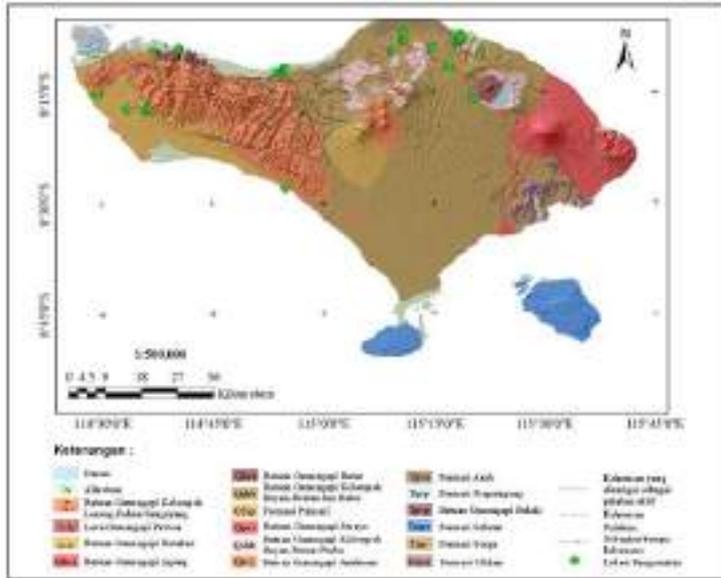
100 Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta [Sumber dan](#)
101 [Bahaya Gempa Bumi Nasional](#) (Pusat Studi Gempa Nasional, -2017).

102

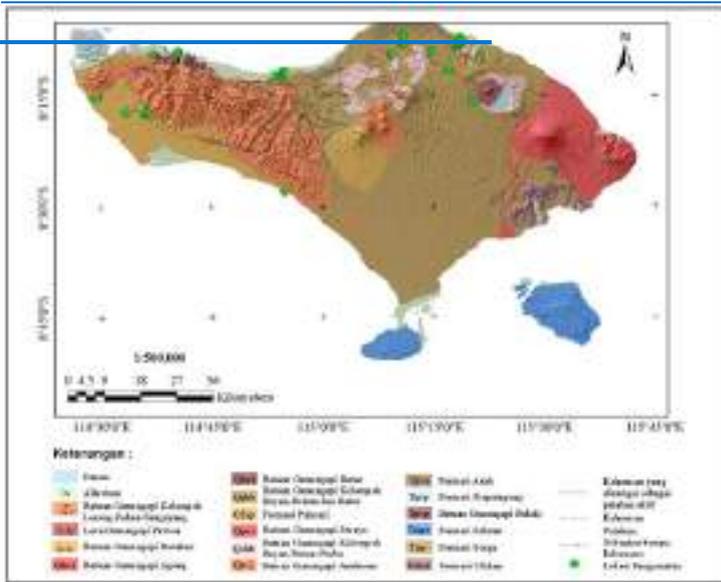
103 **Tatanan Geologi Regional Pulau Bali**

104 Pulau Bali, Sumbawa, dan Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan
105 yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas
106 pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan
107 menunjat ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets
108 dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran
109 struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar
110 naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011).
111 Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang
112 terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di
113 belakang busur ini diperkuat oleh Yazid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya, dkk
114 (2012) yang ~~meneliti daerah ini menggunakan data~~ melakukan relokasi data seismisitas ~~menggunakan~~
115 ~~relokasi hiposenter data yang ditangkap oleh~~ kegempaan yang dari jaringan seismik lokal. Studi yang
116 dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali
117 yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar
118 naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di
119 wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994), ~~hasil.~~ Hasil analisis oleh Masturyono (1994).
120 menunjukkan bahwa ~~keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya~~ aktivitas kegempaan

Formatted: English (United States)

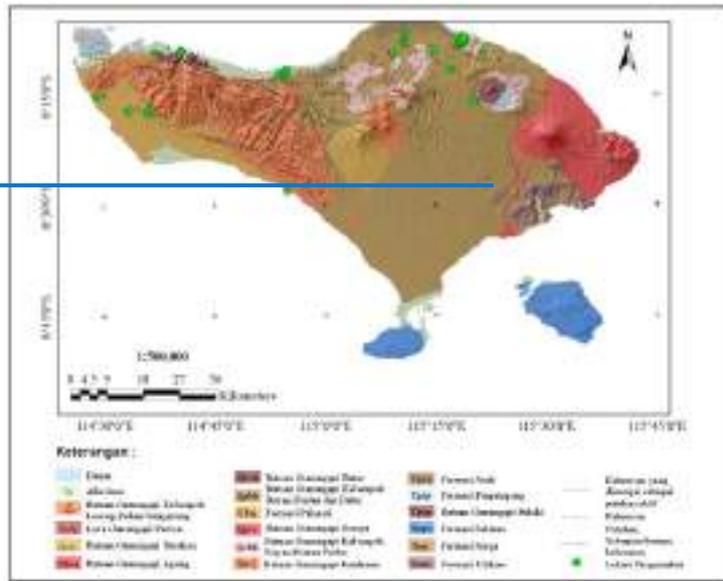


135



136

Formatted: Centered



Gambar 4. Peta Geologi Regional Pulau Bali (modifikasi dari Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998)

137

138

139

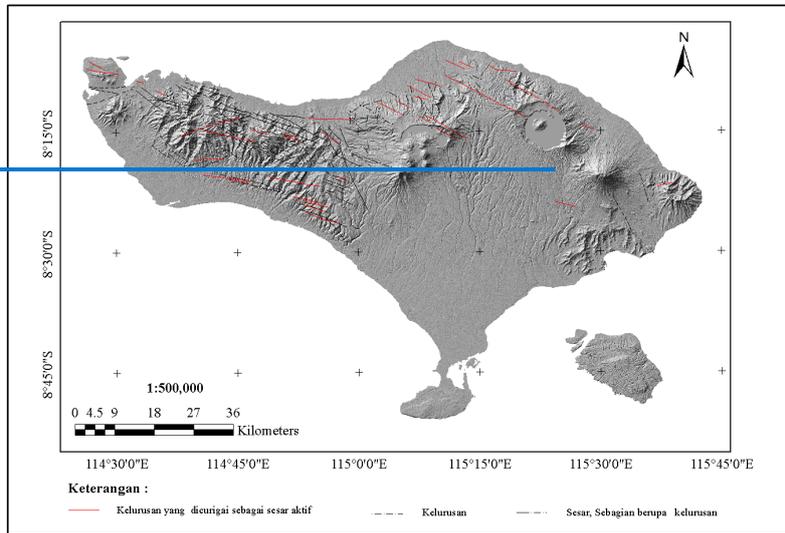
140 METODE PENELITIAN

141 Parameter sesar aktif yang perlu diketahui dalam analisis bahaya seismik meliputi geometri,
142 sejarah gempa bumi, laju pergerakan, dan perulangan gempa (McCalpin, 2009). Pemetaan merupakan
143 tahap awal dalam rangkaian studi sesar aktif yang diteliti. Untuk mengetahui sejarah, laju dan
144 pergerakan dan perulangan gempa perlu dilakukan studi paleoseismologi yang bertujuan untuk
145 mengetahui lokasi, waktu kejadian dan estimasi magnitudo gempa yang terjadi di masa lampau
146 (Wallace, 1981; Daryono, 2016).

147

148 Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi
149 berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda
150 serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar
151 aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui
152 struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi
153 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 5 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan
154 dengan tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
155 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
156 dipetakan.

Formatted: Centered



157

158 [Gambar 5. Peta Analisis Kelurusan Pulau Bali, terdapat 31 kelurusan yang dieurigi sebagai jalur sesar](#)
159 [aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil](#)
160 [berarah Timur Laut-Baratdaya \(BD-TL\)](#)

161

162 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
163 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
164 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar
165 Bali, [Nusatenggara 1707 dan 1807](#) dengan skala 1:250.000 ([Purbo-Hadiwidjojo](#),
166 [dkk., 1989](#)) juga digunakan sebagai acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek
167 morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif, bisa dikenali melalui data DEM dan
168 [turunannya](#) (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti contohnya perubahan
169 kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang membentuk kelurusan
170 (*lineament*) (Hady & Marliyani, [in press 2020](#)). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya kelurusan
171 sungai, lembah, [punggungan](#) dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, [in](#)
172 [press 2020](#)).

173 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
174 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
175 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
176 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
177 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan
178 [berumur](#) Kuartar. Data pengukuran [struktur](#) di lapangan digunakan untuk
179 mengkonfirmasi keberadaan struktur sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran
180 kegempaan, yang diperoleh dari katalog [BMKG-USGS](#) (tahun [1963-2018](#)) juga digunakan

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

Formatted: Font: Italic

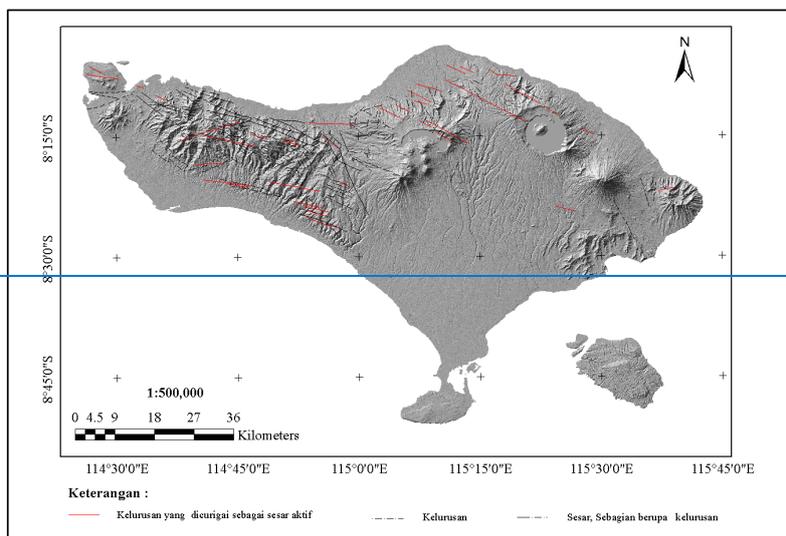
181 untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan dengan [kegempaan](#). Struktur yang
182 berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar tersebut aktif.

183

184 HASIL DAN PEMBAHASAN

185 Analisis Kelurusan

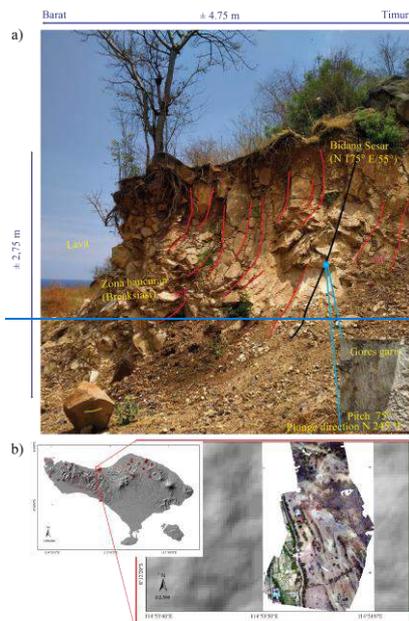
186 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
187 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (~~BBD~~BBL-TTG) dan pola
188 kelurusan minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (~~Gambar 5~~Gambar 2).
189 Pola kelurusan yang berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung
190 Bratan dan timurlaut Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan
191 gunungapi. Sebagian besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan
192 dan Batur (Qpbb). Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan
193 Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-
194 Bratan Purba (Qvbb). Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan
195 yaitu unit Qpbb, Qvbb dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)).
196 Di bagian barat pulau Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit
197 batuan gunungapi Jembrana (Qvpj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit
198 QTsp dan Qpbb, Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah
199 BBD-UTL yang memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang
200 dari masing-masing trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki
201 dimensi panjang ± 2,5 km - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km,
202 sedangkan pola kelurusan berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).



204 ~~Gambar 5. Peta Analisis Kelurusan Pulau Bali, terdapat 31 kelurusan yang dieurigi sebagai jalur sesar~~
205 ~~aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil~~
206 ~~berarah Timur-Laut Baratdaya (BD-TL)~~

208 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

209 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
210 ~~yang~~ umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di
211 lapangan antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi),
212 kekar yang intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui.
213 ~~Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada Kami melakukan pengecekan lapangan dengan~~ petunjuk
214 peta kelurusan, ~~kemudian~~ setiap delineasi kelurusan kami ~~ditelusuri~~ di lapangan untuk
215 mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran
216 lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.



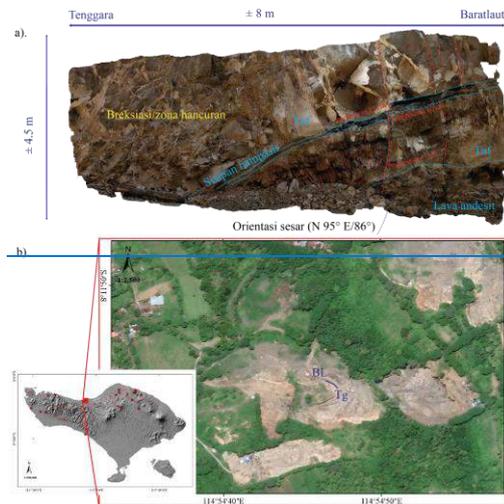
217 ~~Gambar 6. Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan drag fold (a). Kenampakan~~
218 ~~topografi zona breksiasi dan drag fold berupa ortofoto yang diperoleh melalui metode fotogrametri,~~
219 ~~tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan drag fold (b)~~

222 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
223 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpv), Formasi
224 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
225 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar

Formatted: Justified, Indent: First line: 1,27 cm

226 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang ~~zonabidangzona~~
227 ~~bidang~~ sesar yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7
228 cm sampai 55cm.

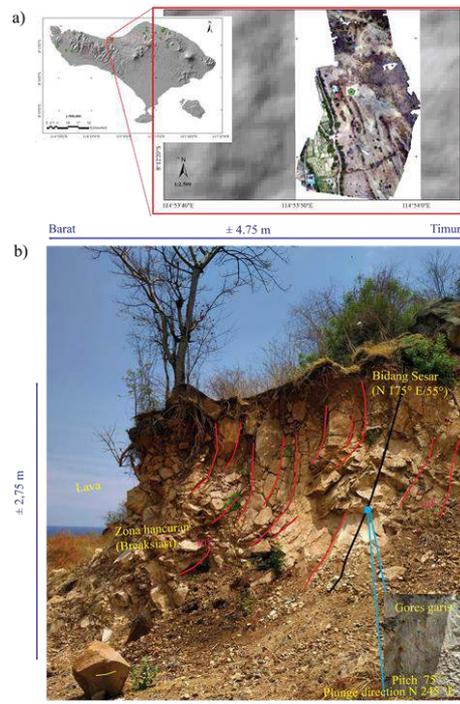
229 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
230 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
231 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
232 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
233 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
234 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
235 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola
236 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif.



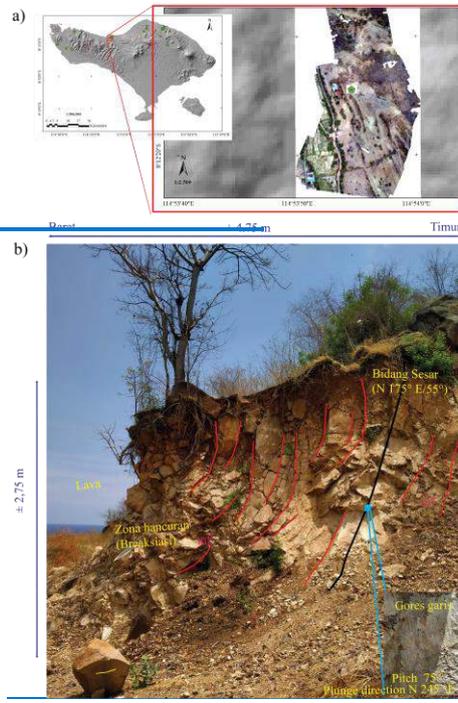
237 ~~Gambar 7. a) Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang~~
238 ~~perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat~~
239 ~~menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar oblique). b)~~
240 ~~Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu.~~
241
242

243 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
244 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
245 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
246 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
247 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (HadiwidjojoPurbo-Hadiwidjojo, dkk,
248 1998). Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar
249 6b), dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75 \times 7,5$ m. Unit
250 lava ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur

251 (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat
252 ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke
253 bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian
254 bawah, fragmen-~~fragment~~[fragmen](#) ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang
255 mencerminkan adanya *drag fold* (Gambar 6a). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD
256 (N 175°E/55°). Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di
257 bagian bawah, hal ini dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi N 245°E dengan pitch
258 75° dengan jenis sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap
259 blok bagian timur-timurlaut (Gambar 6a).

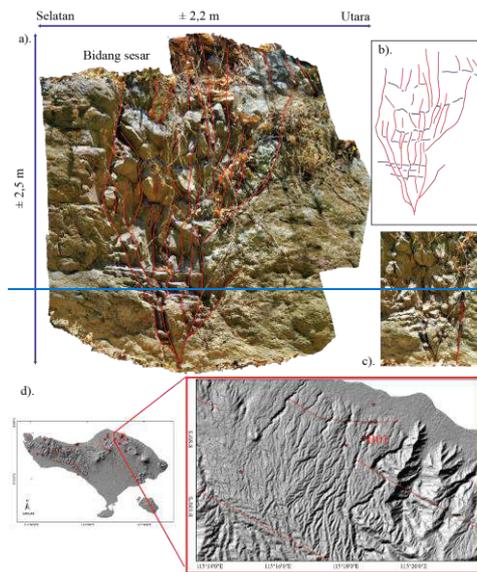


Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm



261
262 Gambar 6. —Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh
263 melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a)
264 Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)
265

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm



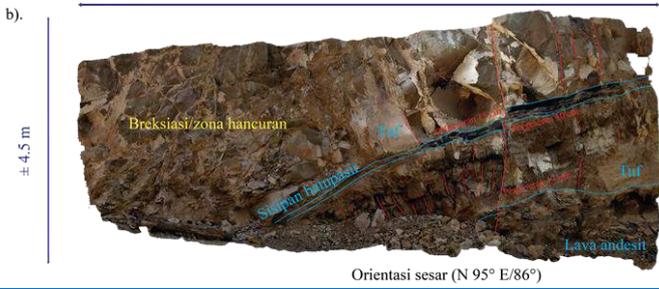
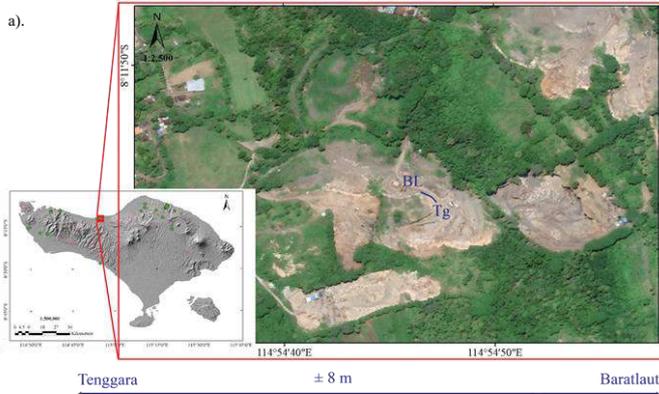
266
267
268
269
270

Gambar 8. Zona sesar pada singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (a, b c dan d)

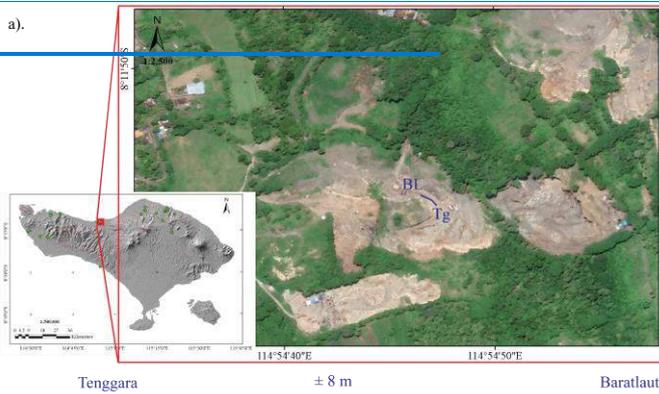
271 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
272 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuff yang menumpang pada unit lava
273 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
274 menunjukkan orientasi $N195^{\circ}E/25^{\circ}W$. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
275 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan
276 dijumpai unit tuff yang terkekarkan, lapili dan unit tuff tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar
277 diindikasikan oleh ketidakmenerusan lapisan tuff dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar
278 tersebut berarah $N 95^{\circ}E/86^{\circ}$ dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm.
279 Orientasi pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar
280 yang tinggi dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa
281 sesar yang diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar
282 *oblique*) (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola
283 tidak teratur, rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan
284 berarah BL-TG (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 2009-2020 (katalog
285 USGS/BMKG) menunjukkan asosiasi gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar
286 2). Meskipun struktur geologi yang diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir
287 (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

- 288 Kwartir. Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur
289 Kwartir, bisa ~~dikategorika~~[dikategorikan](#) bahwa zona sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



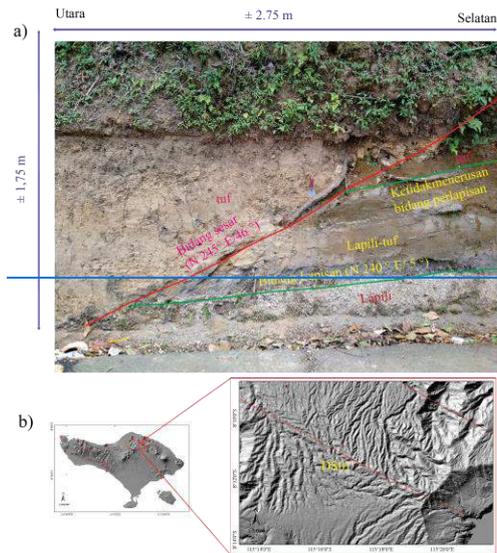
290



291

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

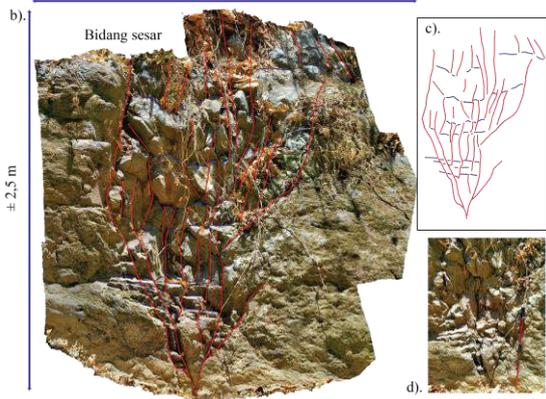
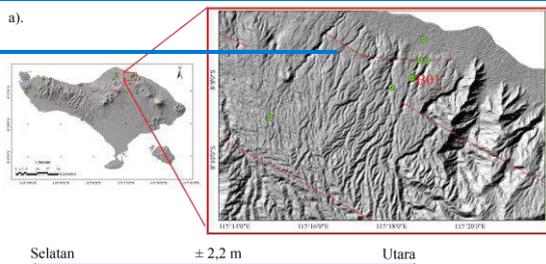
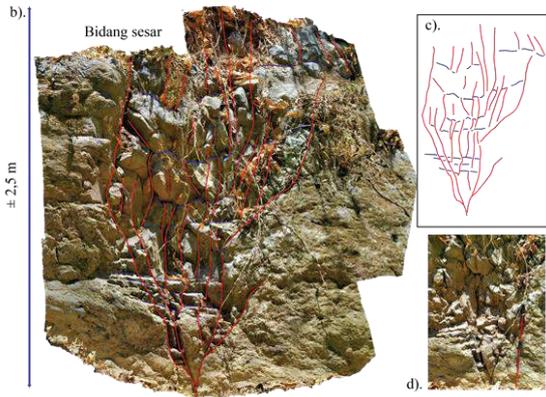
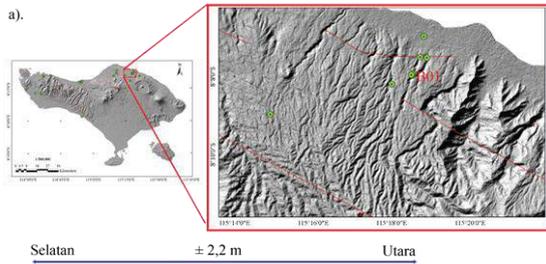
292 [Gambar 7. a\)](#)—Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan
293 batu (a). [b\)](#)—Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
294 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat
295 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
296 [\(b\)](#).
297



298
299 [Gambar 9. Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra \(a\), lokasi berada di tepi Jalan Raya](#)
300 [Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli \(b\)](#)

301
302 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
303 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
304 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
305 bagian dari Formasi Qvbb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
306 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar
307 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan
308 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
309 *flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 8a).
310 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
311 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
312 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
313 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa [BMKG-USGS](#)
314 tahun [2009-2018](#) & [1963-2020](#), di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada
315 kedalaman ≤ 60 km dengan skala $M \leq 4$ (Gambar 2) ([BMKG katalog USGS, 2019](#)). Adanya asosiasi

316 kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan
317 bahwa zona sesar di daerah ini aktif. |

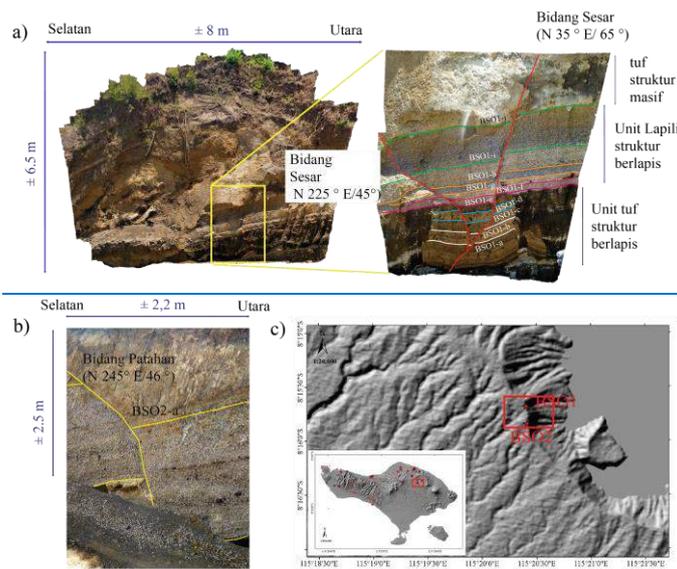


Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

318

319

320 [Gambar 8. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 \(a\) dan Zona sesar pada](#)
321 [singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini \(*flower structure*\) yang diinterpretasi](#)
322 [sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser \(b, c dan d\)](#)
323

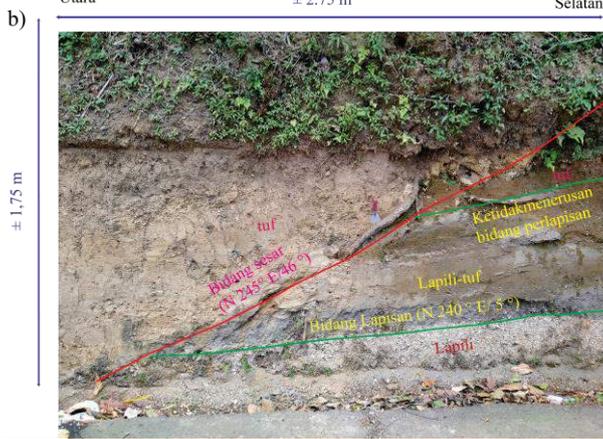
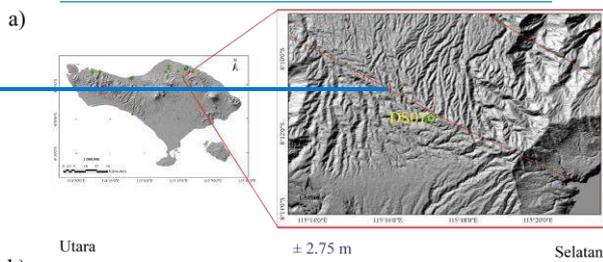
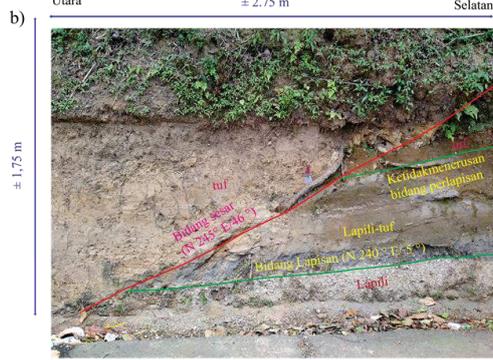
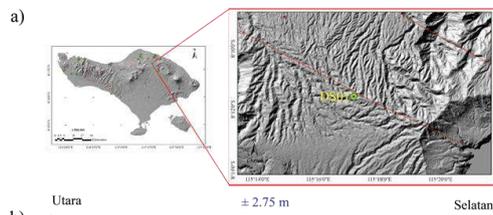


Formatted: Font: Bold

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

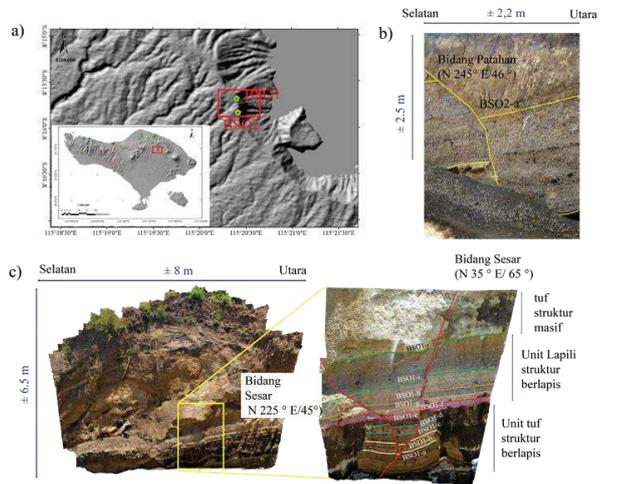
324
325
326 [Gambar 10. Terdapat unit tuf yang tersesarkan membentuk graben kecil \(a\) dan unit lapili yang](#)
327 [tersesarkan menunjukkan komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur \(b\)](#)
328

329 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
330 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
331 Singkapan memiliki dimensi tinggi $\pm 1,75$ m dan panjang $\pm 2,75$ m. Susunan litologi dari bawah ke
332 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
333 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuartar. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
334 unit ini berarah $N240^{\circ}E/5^{\circ}$. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi
335 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya ($N245^{\circ}E/46^{\circ}$) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona
336 sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 9b). Data seismitas tahun 2009-
337 2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60
338 km (Gambar 2) (BMKG, 2019katalog USGS). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona
339 sesar yang menegenai batuan berumur Kuartar mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa
340 dikategorikan sebagai sesar aktif.



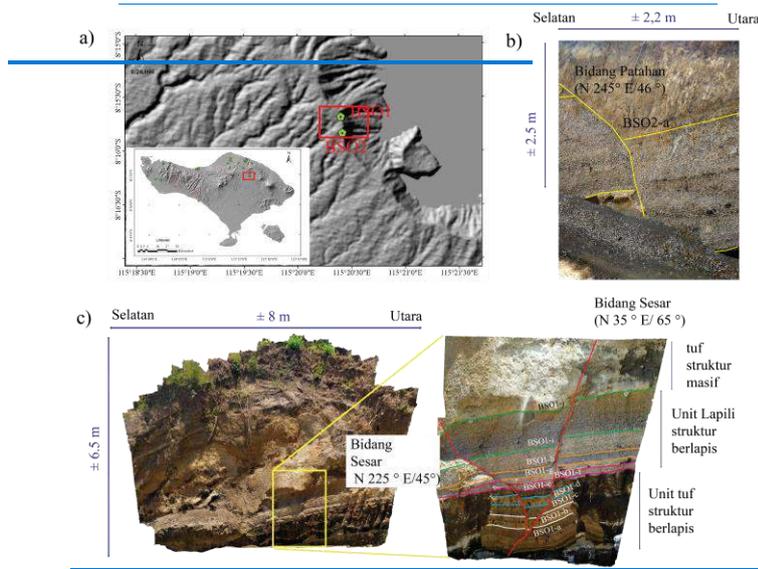
Gambar 9. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra (b).

346 Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di
347 Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun
348 yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli. Batuan di lokasi ini tersingkap berkat
349 adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka
350 pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakmenerusan
351 bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di
352 sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10a) terdapat bidang sesar
353 berarah $N35^{\circ}E/65^{\circ}$ dan $N225^{\circ}E/45^{\circ}$. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan
354 lapili di bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang perlapisan berarah $N165^{\circ}E/10^{\circ}$. Bidang
355 sesar yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari
356 bidang perlapisan menunjukkan kisaran 7– 18 cm ([tabel/Tabel 1](#)). Pada lokasi pengamatan kedua
357 (BS02, Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh
358 lapukan tuf, memiliki bidang perlapisan $N152^{\circ}E/25^{\circ}$ tersesarkan oleh sesar turun berarah $N245^{\circ}E/46^{\circ}$
359 (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismisitas dangkal
360 (Gambar 2) ([katalog USGSBMKG, 2019](#)). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan
361 yang terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

362



363

364 [Gambar 10. Lokasi singkapan batuan \(a\), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan](#)
 365 [komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 \(b\) dan unit tuf yang tersesarkan](#)
 366 [membentuk graben kecil di lokasi BS01 \(c\).](#)

367

Formatted: Centered, Indent: First line: 0 cm

368

Tabel 1. Nilai ~~pergeseran~~ [pergeseran](#) lapisan unit tephra yang tersesarkan

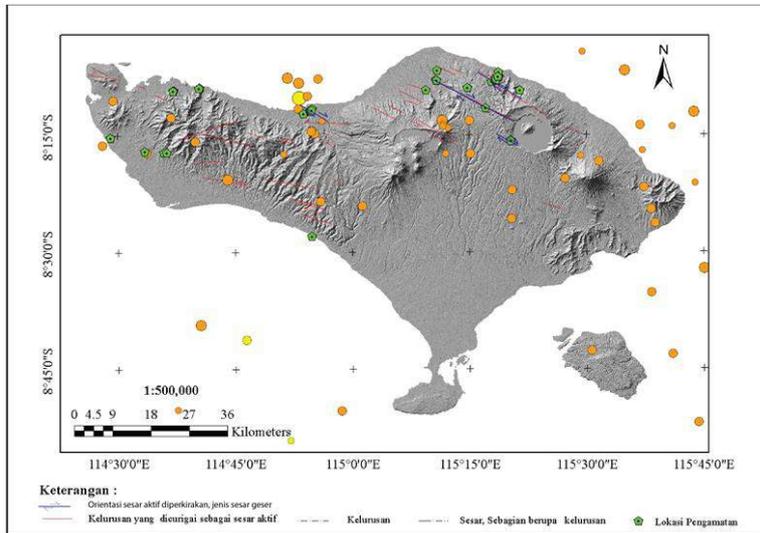
Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a

Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55
------------	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

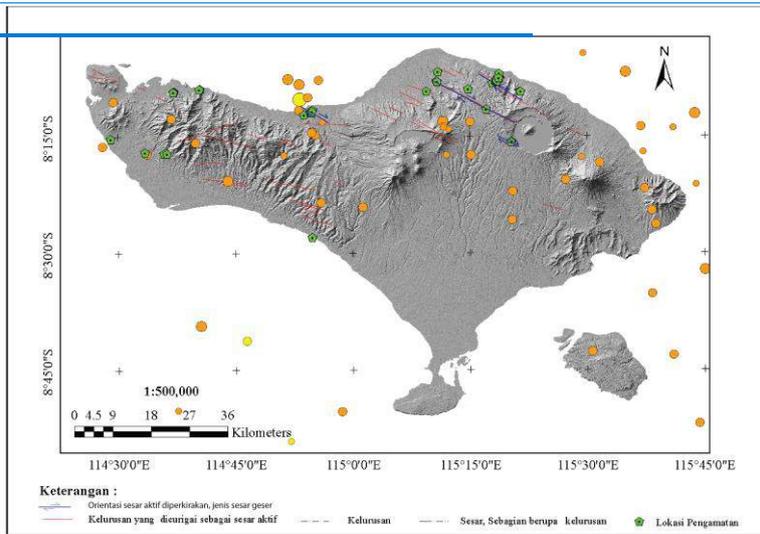
369
370 Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali
371 didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar
372 turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar
373 turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 11). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan
374 oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah
375 TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut
376 teridentifikasi memotong batuan berumur Kuartar.

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

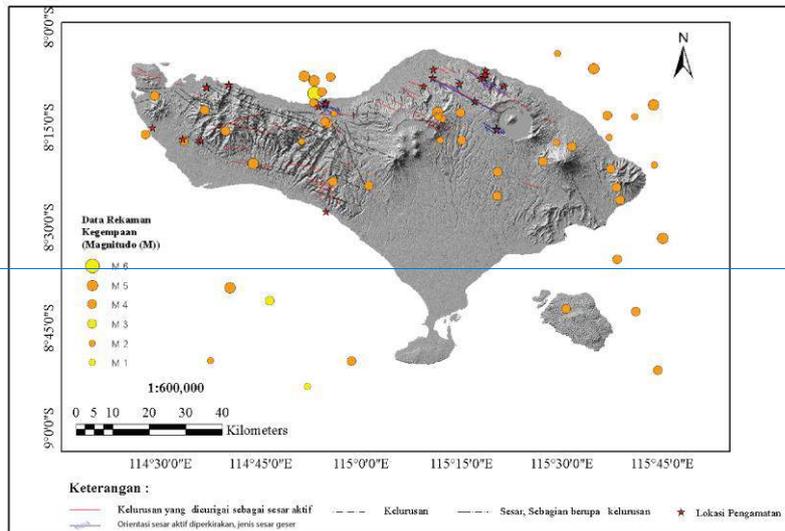
Formatted: Normal, Indent: First line: 0 cm, Line spacing: single, Tab stops: 1,25 cm, Left



377



378



379
380 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
381

382 KESIMPULAN

383 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
384 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
385 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
386 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
387 kemiringan 65-85° sedangkan kemiringan pada sesar turun ~40° dengan kemiringan ke arah TL.
388 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
389 Kuartar. [Analisa Analisis](#) data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
390 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
391 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
392 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
393 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
394 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
395 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
396 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
397 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
398 gempa bumi di Pulau Bali.

399 UCAPAN TERIMA KASIH

401

402 [Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan](#)
403 [Tinggi \(DRPM Dikti\) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen](#)
404 [Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian](#)
405 [Masyarakat dan Inovasi \(LPPMI\)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian,](#)
406 [mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu](#)
407 [Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya](#)
408 [kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu](#)
409 [dalam pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Ifitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten](#)
410 [lapangan.](#)

413 [DINAS PENANAMAN MODAL DAN PELAYANAN TERPADU](#) 414 [SATU PINTU](#)

415 [semua pihak yang telah mendanai penelitian](#)Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu
416 [yang telah membantu dalam pengumpulan data lapangan, terima kasih kami ucapakan kepad](#)
417
418 [Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Indonesia Institut Teknologi Mineral Yogyakarta,](#)
419
420 [yang telah membantu banyak hal atas kesuksesan pelaksanaan penelitian.](#)

422 KONTRIBUSI PENULIS

423 [Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis](#)
424 [dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip , mengambil data lapangan, penulisan](#)
425 [manuskrip, analisis dan interpretasi data, editing manuskrip](#)
426 [Gayatri Indah Marlyani: analisis dan intepretasi data, pengeditan manuskrip](#)
427 [Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi](#)
428 [data, pengeditan, pengeditan editing manuskrip.](#)
429 [s](#)

430 DAFTAR PUSTAKA

- 431 [Badan Informasi Geospasial. \(, 2020\)., DEMNAS, http:](#)
432 <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
- 433 Hady,H.K.& Marliyani, G.I. ,(in Press2020), Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of
434 the Sumatran Fault System in North 1 Sumatra, Indonesia, Journal of Applied Geology
435 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
436 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
437 measurements. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B8).
- 438 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
439 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Metereologi Klimatologi dan
440 Geofisika

- 441 Daryono, M. R. (2016). Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar
442 Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- 443 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
444 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research*
445 *letters*, 21(20), 2191-2194.
- 446 Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print.Off.
- 447 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. Geological Society of America Bulletin,
448 100(10), 1503-1527.
- 449 ~~Hadiwidjojo Purbo Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., T.C.Amin, T.C., 1998, Peta Geologi Lembar~~
450 ~~Bali, Nusa Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi,~~
451 ~~Edisi Kedua.~~
- 452 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A.
453 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
454 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- 455 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
456 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- 457 Masturyono. (1994). Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
458 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- 459 ~~McCalpin, J. P. (2009). Paleoseismology. McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology.~~
- 460 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
461 example of a nascent continental fold? and? thrust belt. *Journal of Geophysical Research: Solid*
462 *Earth*, 92(B1), 441-460.
- 463 ~~Hall, R. (2011). Australia-SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. Geological Society,~~
464 ~~London, Special Publications, 355(1), 75-109.~~
- 465 ~~Purbo-Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., & T.C.Amin, T.C. (-1998). Peta Geologi Lembar Bali,~~
466 ~~Nusa Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi~~
467 ~~Kedua.~~
- 468
- 469 ~~Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017.~~
470 ~~Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Pusat LitBang~~
471 ~~Perumahan dan Pemukiman, Badan Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman Rakyat. Peta~~
472 ~~sumber dan bahaya gempa Indonesia, tahun 2017.~~
- 473 ~~Pusat Studi Gempa Nasional, Pusat LitBang Perumahan dan Pemukiman, Badan~~
474 ~~Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman Rakyat, Peta sumber dan bahaya gempa~~
475 ~~Indonesia, tahun 2017.~~
- 476 ~~Pusat Gempabumi dan Tsunami, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Katalog Gempabumi,~~
477 ~~signifikan dan merusak tahun 1821-2018, 2019.~~
- 478 Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016).
479 On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System
480 (IGRS) 2013. FIG Working Week.
- 481 ~~U.S. Geological Survey, 2020, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,~~
482 ~~https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/~~
- 483 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
484 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
- 485 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
486 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
- 487 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
- 488 Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs
489 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
- 490 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
491 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
492 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
- 493
- 494 Referensi websites:

Formatted: English (United States)

Formatted: Left, Indent: Left: 0 cm, Hanging: 0,5 cm

Formatted: Left

Formatted: Highlight

Formatted: Font: Bold

495 [Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php](http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php)

496

497 [U.S. Geological Survey. Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,](https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/)

498

499

Formatted: Not Highlight

1 Article

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4
5 **Abstrak** pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi.
6 Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona
7 sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini,
8 gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk
9 melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey
10 lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m
11 serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis ~~isa~~ kelurusan
12 menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timulaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa
13 kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar oblique dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong
14 batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona
15 kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa
16 sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini
17 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang
18 akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

19
20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

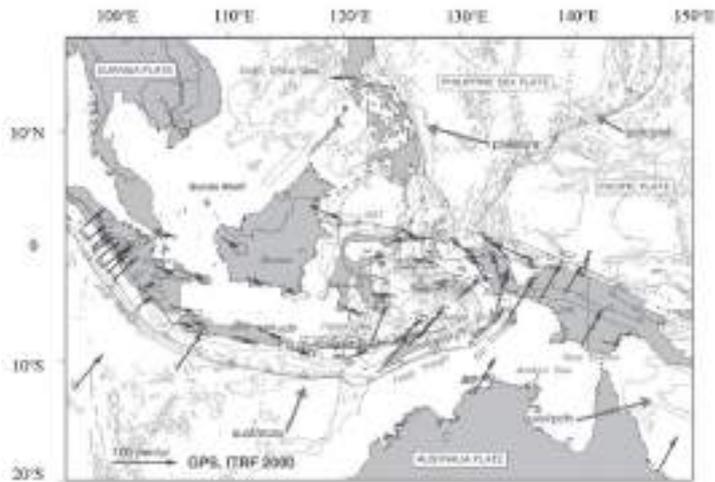
21 **Abstract** Bali and its surrounding region is located within proximity of Sunda-Banda subduction zone making it prone to
22 earthquake hazards. The main structure that caused earthquake in Bali mainly are from the front subduction faults and from
23 the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occurred in the inland fault
24 system. This study aims to map the inland active faults in Bali using combination of remotely-based and field-mapping
25 methods. We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from
26 photogrammetry processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis ~~identify~~ identifies northwest-southeast
27 and northeast-southwest lineaments. Our field observation ~~confirm~~ confirms this lineaments to be associated with strike slip,
28 oblique and normal faults. These faults ~~dissects~~ dissect Quaternary until recent rock units. In addition, seismicity data
29 indicate the occurrence of shallow earthquake in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures
30 are active. Results from this study provide new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the
31 seismic hazard analysis and contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

32
33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

34
35 **PENDAHULUAN**

36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, J. T., 1966; Hamilton, W. B., 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi
39 Sunda di mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia.
40 Subduksi Sunda ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga
41 di selatan kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di

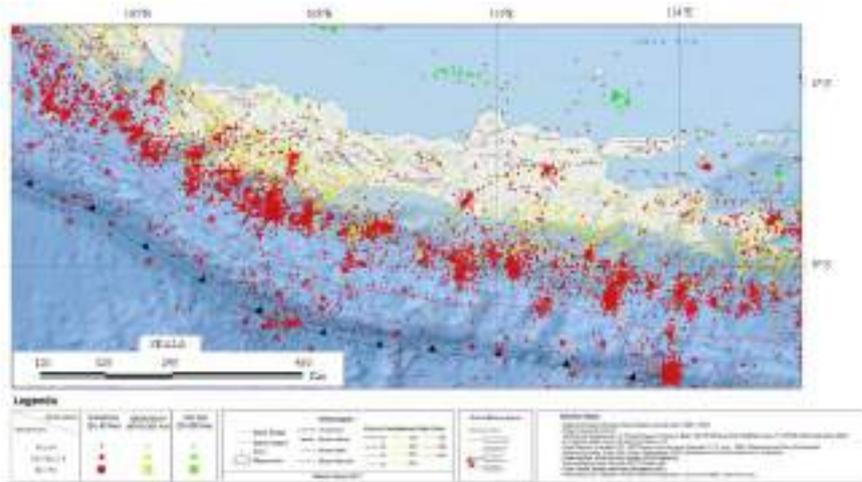
42 sekitar selatan kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram
43 (Hamilton, W.B., 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1.).
44



45
46 Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock, 2003)
47

48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya [frekuensi kejadian](#) gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu [pengurangan](#)
51 [mengurangi risiko](#) bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau
52 Bali. Pulau Bali merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang
53 tahun. Rekaman seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah
54 ini (Katalog BMKG, 2009-2018; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di wilayah ini belum
55 banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona subduksi, banyak juga
56 terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan sumber gempa berada
57 di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah dibandingkan dengan daerah Jawa
58 dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan
59 domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya antisipasi untuk mengurangi bencana
60 yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.

Commented [A1]: Perlu ditampilkan data yang menunjukkan tingginya frekuensi kejadian gempa di Pulau Bali, dan data lokasi dan kedalaman pusat gempa (berupa tabel dengan kisaran waktu tertentu). Peta yang sudah ditampilkan sebaiknya lebih meng-highlight Bali sebagai objek kajian.



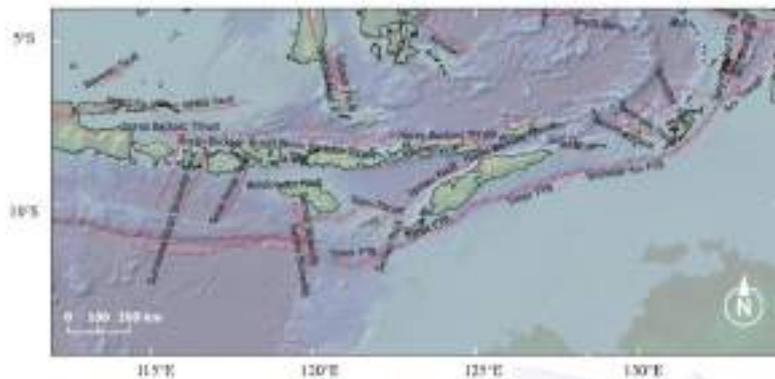
Gambar 2. Peta aktivitas kegempaan (seismisitas) Sunda Timur (BMKG, 2018)

Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo < M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditenggarai menjadi penyebab terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi pada batuan dan endapan berumur Kuarter sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa dijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentuk morfologi dan geometri sesar yang dikenali di

85 lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau
86 Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi
87 terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)

88



89
90 Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta Gempa
91 Nasional 2017

92

93 **Tatanan Geologi Regional Pulau Bali**

94 Pulau Bali, Sumbawa, Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan
95 yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas
96 pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan
97 menunjani ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets
98 dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran
99 struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar
100 naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011).
101 Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang
102 terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di
103 belakang busur ini diperkuat oleh Yazid (1999) dan Yadnya, dkk (2012) yang meneliti daerah ini
104 menggunakan data seismisitas menggunakan relokasi hiposenter data kegempaan yang dari jaringan
105 seismik lokal mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali yang merupakan perpanjangan
106 Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar naik ini juga pernah dilakukan
107 dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di wilayah Bali dan sekitar, hasil
108 analisis menunjukkan bahwa aktivitas kegempaan lokal dan dangkal tersebut mengindikasikan
109 keberadaan sesar naik tersebut (Masturyono, 1994).

129 Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi
130 berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda
131 serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar
132 aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui
133 struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi
134 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 5) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan
135 tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
136 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
137 dipetakan.

138 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
139 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
140 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar Bali
141 1707 dan 1807 dengan skala 1:250.000 juga digunakan sebagai acuan data untuk penentuan umur
142 batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif, bisa dikenali melalui data DEM
143 dan turunannya (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti contohnya perubahan kelerengan
144 topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang membentuk kelurusan (*lineament*)
145 (Hady & Marliyani, *in press*). Lineament ini bisa dikenali dari adanya kelurusan sungai, lembah,
146 punggung dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, *in press*).

147 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
148 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
149 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
150 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
151 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur
152 Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan
153 struktur sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh
154 dari katalog BMKG (tahun 1821-2018) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang
155 terpetakan dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi
156 bahwa sesar tersebut aktif.

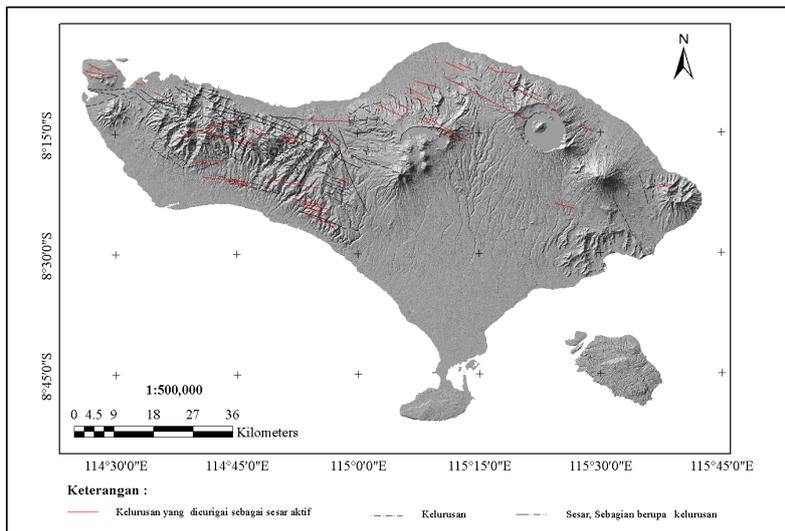
157

158 **HASIL DAN PEMBAHASAN**

159 Analisis Kelurusan

160 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
161 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBD-TTG) dan pola kelurusan
162 minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 5). Pola kelurusan yang
163 berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut
164 Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian
165 besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb).

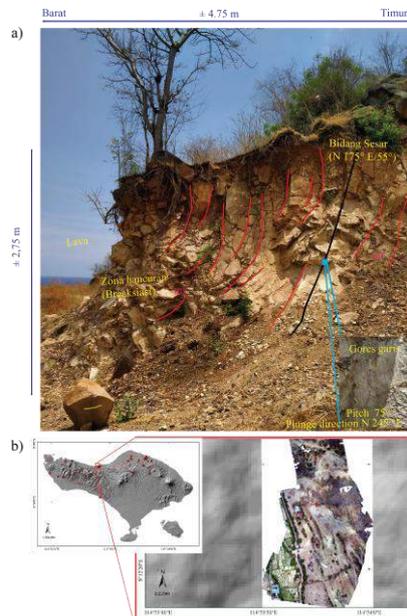
166 Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok
167 Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb).
168 Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb
169 dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau
170 Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi
171 Jembrana (Qvpj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb,
172 Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang
173 memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing
174 trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km
175 - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan
176 berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).



177
178 Gambar 5. Peta Analisis Kelurusan Pulau Bali, terdapat 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar
179 aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil
180 berarah Timur Laut – Baratdaya (BD-TL)

181 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

182 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
183 yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan
184 antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang
185 intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui. Kami
186 melakukan pengecekan lapangan dengan petunjuk peta kelurusan, setiap delineasi kelurusan kami
187 telusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang berasosiasi dengan
188 kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

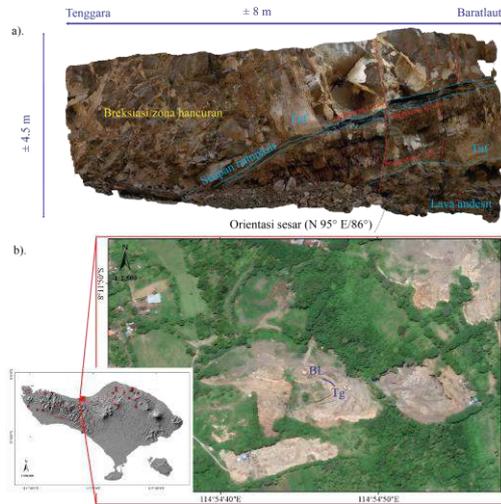


190
191 Gambar 6. Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (a). Kenampakan
192 topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh melalui metode fotogrametri,
193 tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (b)
194

195 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
196 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpvp), Formasi
197 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
198 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar
199 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar
200 yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai
201 55cm.

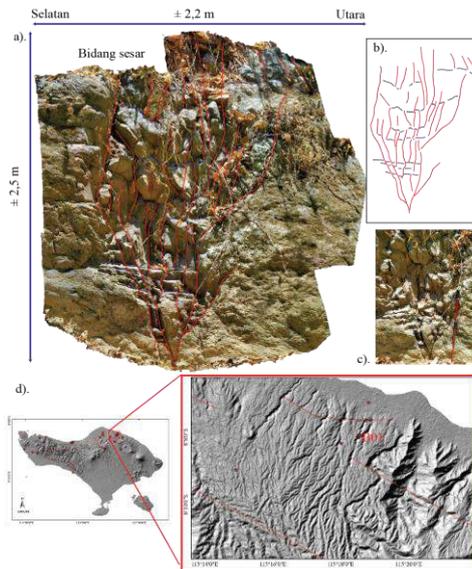
202 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
203 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
204 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
205 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
206 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
207 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
208 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Menurut pada definisi sesar aktif ini, pola
209 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif.

Commented [A3]: Definisi menurut siapa?



210
211 Gambar 7. a) Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
212 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat
213 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*).b).
214 Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu.
215

216 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
217 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
218 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
219 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
220 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Hadiwidjojo, dkk., 1998). Pada satu
221 lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 6b), dijumpai unit
222 batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75 \times 7,5$ m. Unit lava ini
223 mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur (terbreksiasikan)
224 dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat ekstensional (membuka).
225 Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke bagian bawah terlihat
226 butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian bawah, fragmen-fragmen
227 ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan adanya *drag fold* (Gambar 6a).
228 Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD (N 175°E/55°). Kami menginterpretasikan
229 adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal ini dibuktikan dengan
230 hadirnya gores garis dengan orientasi N 245°E dengan pitch 75° dengan jenis sesar normal dengan
231 blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-timurlaut (Gambar 6a).



232

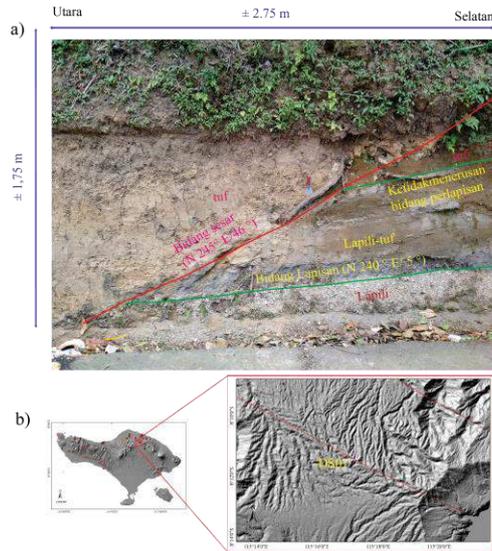
233

234 Gambar 8. Zona sesar pada singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower*
235 *structure*) yang diinterpretasi sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (a, b c dan d)
236

237

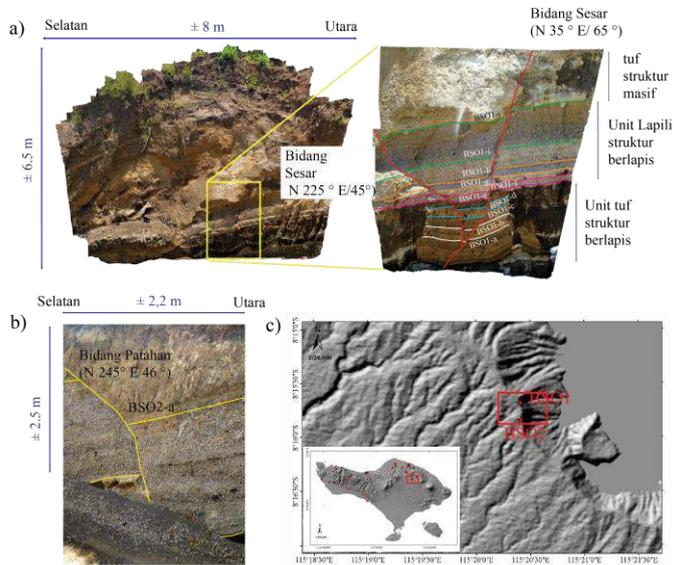
238 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
239 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava
240 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
241 menunjukkan orientasi $N195^{\circ}E/25^{\circ}W$. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
242 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf
243 yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh
244 ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N
245 $95^{\circ}E/86^{\circ}$ dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm. Orientasi
246 pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi
247 dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang
248 diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
249 (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur,
250 rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG
251 (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 2009-2018 (BMKG) menunjukkan asosiasi gempa
252 dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang diamati
253 di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang diamati
menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuartar. Adanya asosiasi kegempaan serta

254 melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar
255 di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



256
257 Gambar 9. Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra (a), lokasi berada di tepi Jalan Raya
258 Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli (b)

259
260 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
261 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
262 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
263 bagian dari Formasi Qybb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
264 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar
265 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan
266 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
267 *flower structure*) dengan tinggi $> 2,5$ m di sepanjang zona hancuran selebar $\pm 1,5$ m (Gambar 8a).
268 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
269 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
270 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
271 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa BMKG tahun
272 2009-2018, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km
273 dengan skala $M \leq 4$ (Gambar 2) (BMKG, 2019). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur
274 batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini
275 aktif.



276

277

278 Gambar 10. Terdapat unit tuf yang tersesarkan membentuk graben kecil (a) dan unit lapili yang
279 tersesarkan menunjukkan komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur (b)

280

281 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
282 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
283 Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75 m. Susunan litologi dari bawah ke
284 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
285 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuarter. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
286 unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi
287 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya (N245°E/46°) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona
288 sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 9b). Data seismitas tahun 2009-
289 2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60
290 km (Gambar 2) (BMKG, 2019). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona sesar yang
291 menegenai batuan berumur Kuarter mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa dikategorikan sebagai
292 sesar aktif.

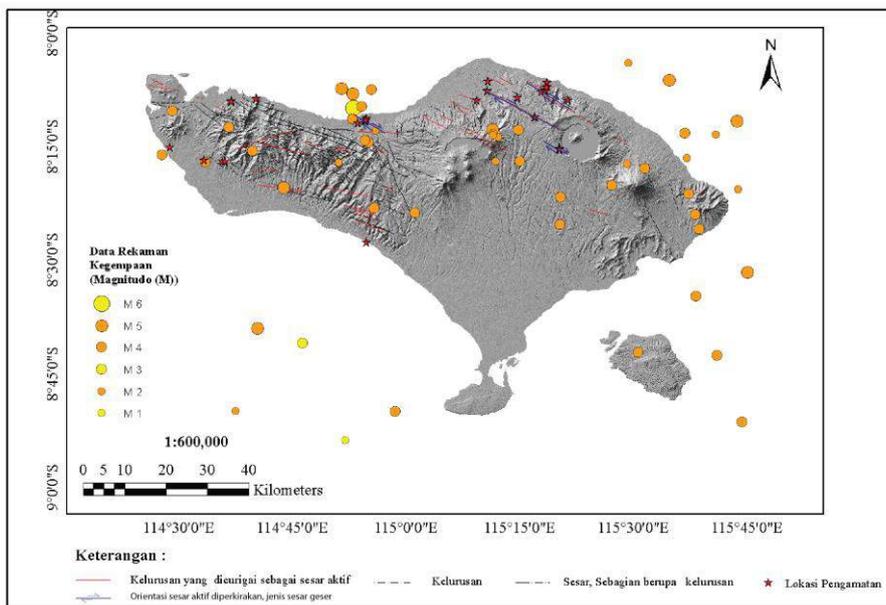
293 Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di
294 Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun
295 yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli. Batuan di lokasi ini tersingkap berkat
296 adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka
297 pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakkemenerusan
298 bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di

299 sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10a) terdapat bidang sesar
 300 berarah N35°E/65° dan N 225° E/45°. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan
 301 lapili di bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang perlapisan berarah N165°E/10°. Bidang
 302 sesar yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari
 303 bidang perlapisan menunjukkan kisaran 7– 18 cm (tabel 1). Pada lokasi pengamatan kedua (BS02,
 304 Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh lapukan
 305 tuf, memiliki bidang perlapisan N152°E/25° tersesarkan oleh sesar turun berarah N245°E/46°
 306 (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismisitas dangkal
 307 (Gambar 2) (BMKG, 2019). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi
 308 yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

309 Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a
Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55

310



311 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
 312
 313

314 **KESIMPULAN**

315 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
316 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
317 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
318 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
319 kemiringan 65-85° sedangkan kemiringan pada sesar turun ~40° dengan kemiringan ke arah TL.
320 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
321 Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
322 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
323 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
324 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
325 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
326 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
327 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
328 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
329 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
330 gempa bumi di Pulau Bali.

331

332 UCAPAN TERIMA KASIH

333

334

335 KONTRIBUSI PENULIS

336

337

338 DAFTAR PUSTAKA

- 339 Badan Informasi Geospasial, 2020, DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
340 Hady, H.K. & Marliyani, G.I. (in Press), Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the
341 Sumatran Fault System in North I Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*
342 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
343 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
344 measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
345 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
346 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, *Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan*
347 *Geofisika*
348 Daryono, M. R. (2016). *Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar*
349 *Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.*
350 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
351 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research*
352 *letters*, 21(20), 2191-2194.
353 Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print. Off.*
354 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*,
355 100(10), 1503-1527.
356 Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., T.C.Amin, T.C., 1998, *Peta Geologi Lembar Bali, Nusa*
357 *Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.*

- 358 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., ... & Syafi'i, M. A.
359 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
360 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- 361 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
362 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- 363 Masturyono.(1994).Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
364 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- 365 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
366 example of a nascent continental fold?and?thrust belt. *Journal of Geophysical Research:Solid*
367 *Earth*, 92(B1), 441-460.
- 368 Hall, R. (2011). Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. *Geological Society,*
369 *London, Special Publications*, 355(1), 75-109.
- 370 Pusat Studi Gempa Nasional, Pusat LitBang Perumahan dan Pemukiman, Badan
371 Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman Rakyat, Peta sumber dan bahaya gempa
372 Indonesia, tahun 2017.
- 373 Pusat Gempabumi dan Tsunami, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Katalog Gempabumi
374 signifikan dan merusak tahun 1821-2018, 2019.
- 375 SUSILO, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., PRIJATNA, K., SAPIIE, B., WIJANARTO, A. B., &
376 EFENDI, J. (2016). On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial
377 Reference System (IGRS) 2013. FIG Working Week.
- 378 U.S. Geological Survey, 2020, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,
379 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- 380 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
381 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
- 382 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
383 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
- 384 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
- 385 Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs
386 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
- 387 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
388 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
389 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, InstitutTeknologi Bandung
390

Respon terhadap hasil review manuskrip berjudul **“Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi permukaan dan morfologi tektonik”**

Pertama-tama kami ucapkan terima kasih atas review dan saran perbaikan yang diberikan oleh kedua reviewer pada manuskrip kami. Pada prinsipnya kami tidak berkeberatan dengan hasil review tersebut, dan dokumen berikut menunjukkan perubahan pada manuskrip berdasarkan saran yang diberikan. Tanggapan yang kami berikan kami tunjukkan dengan tanda huruf berwarna biru.

Yogyakarta, 3 Februari 2021

Hurien Helmi

Tanggapan terhadap reviewer 1 (file 61928-197739-1-RV)

- Line 5 : rubah pulau → Pulau, sudah dilakukan
- Line 11 : Analisa → Analisis, sudah dilakukan
- Line 26 : identify → identifies, sudah dilakukan
- Line 27 : confirm → confirms, sudah dilakukan
- Line 28 : dissect → dissect, sudah dilakukan
- Line 49 : → Frekuensi kejadian, sudah dilakukan
- Line 50 : pengurangan → mengurangi, sudah dilakukan
- Line 51 : resiko → risiko, sudah dilakukan
- Line 52-56 : Perlu ditampilkan data yang menunjukkan tingginya frekuensi kejadian gempa di Pulau Bali, dan data lokasi dan kedalaman pusat gempa (berupa tabel dengan kisaran waktu tertentu). Peta yang sudah ditampilkan sebaiknya lebih meng-highlight Bali sebagai objek kajian
Tanggapan: Frekuensi kegempaan sudah ditampilkan sebagai peta seismisitas (yang sudah direvisi untuk menghighlight area Bali, di gambar 2), dari gambar tersebut sudah dapat dilihat frekuensi kejadian, besaran, serta sebaran lokasi kegempaan. Kami tidak merasa perlu untuk membuat table khusus karena justru tidak akan memberikan gambaran yang jelas untuk kegempaan pada zona sesar di darat, yang menjadi fokus penelitian kami.
- Line 70 : nail → naik, sudah dilakukan
- Line 94 : menambahkan spasi, sudah dilakukan
- Line 111 : Gambar 4: Gambar sebaiknya ditampilkan setelah uraian atau narasi.
Tanggapan: Layout final akan dilakukan oleh publisher, untuk keperluan proses review, penempatan gambar dirubah sesuai dengan saran yang diberikan.
- Line 115 : menambahkan spasi –di beberapa , , sudah dilakukan
- Line 143 : turunannya → turunannya, sudah dilakukan
- Line 146 : punggung → punggung, sudah dilakukan
- Line 151 : berumu → berumur, sudah dilakukan
- Line 152 : struktuur → struktur, sudah dilakukan
- Line 255 : kehgempaan → kegempaan, sudah dilakukan
- Line 184 : yan → yang, sudah dilakukan
- Line 199 : tanpa spasi → dengan spasi, sudah dilakukan

Line 226 : fragment → fragmen, sudah dilakukan
Line 240 : Diatasnya → Di atasnya, , sudah dilakukan
Line 254 : dikategorika → dikategorikan, sudah dilakukan
Line 309 : pergeseran → pergeseran, sudah dilakukan
Line 321 : analisa → analisis, sudah dilakukan

Tanggapan terhadap reviewer 2 (file 61928-198978-1-RV)

Line 5 : pulau → Pulau, sudah diakomodasi pada tanggapan reviewer 1
Line 21 : is → are, of Sunda-Banda, sudah dilakukan
Line 22 : earthquake → earthquakes, sudah dilakukan
Line 23 : Frequently ocured → frequently occur, sudah dilakukan
Line 24 : combination → a combination, sudah dilakukan
Line 26 : identify → identifies, sudah dilakukan
Line 27 : confirm this lineament → confirms these lineaments, sudah dilakukan
Line 27 : strike slip → strike-slip, sudah dilakukan
Line 28 : dissects → dissect, recernt → recent, sudah dilakukan
Line 29 : earthquake → earthquakes, sudah dilakukan
Line 30 : provide new → provide a new, sudah dilakukan
Line 38 : Penulisan sitasi cukup nama belakang saja, nama singkatan tidak perlu
Tanggapan: penulisan sitasi disesuaikan dengan kaidah yang benar, Wilson, J. T., 1966; Hamilton, W. B., 1979 → Wilson, 1966; Hamilton, 1979, perubahan dilakukan pada bagian ini dan keseluruhan teks
Line 43 : Hamilton, W., B, 1988 → Hamilton, 1988, sudah dilakukan
Line 46 : Dalam referensi ada banyak penulis, seharusnya (Bock dkk, 2003)
Tanggapan: sudah dilakukan revisi penulisan referensi menjadi Bock dkk, 2003

Line 53 : Katalog BMKG, 2009-2018, Belum ada di dalam daftar pustaka, tambahkan
Tanggapan: telah diperbaiki dengan perubahan data

Line 62 : BMKG, 2018 Belum ada di dalam daftar pustaka, tambahkan
Tanggapan: telah diperbaiki dengan referensi

Line 70 : Nail → naik, sudah dilakukan
Line 72 : ditenggarai → ditengarai, sudah dilakukan
Line 91-92 : (Peta Gempa Nasional, 2017) Crosscheck dan tambahkan dalam daftar pustaka jika referensinya belum ada

Tanggapan: penulisan referensi diperbaiki dan referensi sudah ada dalam daftar pustaka

Line 94 : --> ditambahkan 'dan', sudah dilakukan
Line 102 -107 : Kalimat ini terlalu panjang dan tidak baku, perbaiki struktur dan pola kalimatnya
Tanggapan: kalimat direvisi menjadi: Keberadaan sesar naik di belakang busur ini diperkuat oleh Yazid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya, dkk (2012) yang melakukan relokasi data seismisitas yang ditangkap oleh jaringan seismik lokal. Studi yang dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono,

1994). Hasil analisis oleh Masturyono (1994). menunjukkan bahwa keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya aktivitas kegempaan lokal dan dangkal di wilayah tersebut.

Line 111 : Gambar 4: Gambar 4 ini sebaiknya ditempatkan setelah penyebutannya pada paragraph di bawah Agar lebih terlihat, simbol lokasi pengamatan diberi warna yang kontras dengan warna2 dari geologi regionalnya

Tanggapan: penempatan gambar sudah disesuaikan, simbol warna untuk lokasi pengamatan dirubah supaya lebih jelas terlihat.

Line 123 : McCalpin, 2009 Tidak ada di daftar pustaka?? Tambahkan

Tanggapan: referensi untuk McCalpin, 2009 sudah ditambahkan dalam daftar pustaka

Line 140 -142 : Peta Geologi Regional lembar Bali 1707 dan 1807 -- Referensi peta nya dari? Perlu ditambahkan dalam daftar pustaka

Tanggapan: referensi untuk peta-peta geologi bali sudah ditambahkan dalam daftar pustaka

Line 145 : in press → 2020, Lineament → *Lineament*, Sudah dilakukan

Line 146 : Punggung → Punggungan, in press → 2020, sudah dilakukan

Line 151 : berumu → berumur, sudah dilakukan

Line 152 : struktuur → struktur, sudah dilakukan

Line 155 : kehgempaan → kegempaan, sudah dilakukan

Line 161 : BBD → BBL, sudah dilakukan

Line 184 : yan → yang, sudah dilakukan

Line 186-189 : Perbaiki struktur dan pola kalimatnya, tidak perlu ada 'kami'

Tanggapan : telah diperbaiki struktur kalimat dengan tidak menggunakan kata kami

Line 192 : drag fold → *drag fold*, sudah dilakukan

Line 210 : Gambar 7: Gambar 7 belum tersebut di dalam text, sebaiknya tersebut dalam text lebih dahulu baru ditampilkan gambarnya.

Apakah 7a dan 7b ada pada lokasi yang sama? Jika iya maka sebaiknya lokasi singkapannya lebih dulu baru kemudian detail singkapan yang dimaksud

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 7 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan

Line 230 : Paragraf ini menyebutkan Gambar 6, tetapi Gambar 6 nya ditampilkan lebih dulu di halaman sebelumnya. Ini KELIRU/TERBALIK. Perbaiki

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 6 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph.

Line 233 : Gambar 8: Apakah 8a,b,c,d ada pada lokasi yang sama? Jika iya maka sebaiknya lokasi singkapannya lebih dulu baru kemudian detail singkapan yang dimaksud

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 8 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan

Line 247 : layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 7 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan

Line 249-250 : Pernyataan pada kalimat ini serupa dengan penjelasan di dekat gambar 2, kenapa harus disebutkan kembali?

Tanggapan: untuk menekankan kembali singkapan yang dijumpai berasosiasi dengan sesar aktif ditunjukkan dengan rekaman kegempaan dan kelurusan di lokasi tersebut

Line 254 : dikategorikan → dikategorikan , sudah dilakukan

Line 256 : Apakah 9a dan b ada pada lokasi yang sama? Jika iya maka sebaiknya lokasi lebih dulu baru kemudian detail bidang ketidakmenerusan yang dimaksud

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 9 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan.

Line 270 : Referensi gambar 8b: Paragraf ini menyebutkan Gambar 8, tetapi Gambar 8 nya ditampilkan lebih dulu di halaman sebelumnya. Ini KELIRU/TERBALIK. Perbaiki dengan diatur/tata ulang

Tanggapan: : layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 8 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan.

Line 272 : referensi BMKG, 2009 Belum ada di dalam daftar pustaka, tambahkan

Tanggapan: telah diperbaiki dengan referensi lain

Line 278 : Gambar 10: Diatur ulang gambarnya, $c \rightarrow a$, dan $a \rightarrow c$

Tanggapan: : layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 10 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan

Line 287 : referensi gambar 9a: Paragraf ini menyebutkan Gambar 9, tetapi Gambar 9nya ditampilkan lebih dulu di halaman sebelumnya. Ini KELIRU/TERBALIK. Perbaiki dengan diatur/tata ulang

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 9 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan.

Line 303 : tabel 1 → Tabel 1

Line 305 : Paragraf ini menyebutkan Gambar 10, tetapi Gambar 10 nya ditampilkan lebih dulu di halaman sebelumnya. Ini KELIRU/TERBALIK. Perbaiki dengan diatur/tata ulang

Tanggapan: layout final biasanya akan difinalisasi oleh publisher, akan tetapi untuk mengakomodasi saran ini, posisi gambar 10 dipindah sesudah penyebutannya di dalam paragraph dan telah diperbaiki lokasi singkapan ditulis terlebih dahulu baru kemudian detail singkapan.

Line 306 : referensi BMKG, 2019 : Daftar pustaka?

Tanggapan: telah diperbaiki

Line 311 : Gambar 11: Gambar belum disebutkan di dalam text

Tanggapan: referensi gambar 11 telah diakomodir di dalam teks

Line 331 ucapan terima kasih TIDAK ADA ACKNOWLEDGMENT??? BELUM LENGKAP??

Tanggapan: sudah dilengkapi

Line 334 TIDAK ADA PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS??? BELUM LENGKAP??

Tanggapan: sudah dilengkapi

Daftar Pustaka

Line 338 Penulisan referensi tidak konsisten, ada yang tahunnya dalam kurung ada yang tidak, harus diperbaiki

Tanggapan: sudah diperbaiki

Line 339: Referensi ini HARUS ada tahunnya

Tanggapan: sudah ditambahkan

Line 342: Tidak konsisten, di referensi lain ada penulisan & ada yang tidak

Tanggapan: sudah diperbaiki

Line 367: Referensi ini tidak ada sitasinya di dalam text

Tanggapan: sudah diperbaiki

Line 372: Referensi ini tidak ada sitasinya di dalam text. Penulisan tahun disini juga tidak konsisten dengan referensi lainnya

Tanggapan: sudah diperbaiki

Line 374: Capital font, tidak konsisten dengan penulisan referensi lainnya. Perbaiki

Tanggapan: capital font sudah diperbaiki

Line 377: Adakah tersitasi di dalam text???

Tanggapan: telah diperbaiki

Line 388: Referensi ini tidak ada sitasinya di dalam text

Tanggapan: Sudah diperbaiki

1 *Article*

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4

5 **Abstrak** Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi.
6 Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona
7 sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini,
8 gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk
9 melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey
10 lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m
11 serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis kelurusan
12 menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa
13 kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong
14 batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona
15 kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa
16 sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini
17 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang
18 akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

19

20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

21 **Abstract** Bali and its surrounding region are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone
22 to earthquake hazards. The structures that caused earthquakes in Bali are mainly from the front subduction faults and from
23 the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occur in the inland fault system.
24 This study aims to map the inland active faults in Bali using a combination of remotely-based and field-mapping methods.
25 We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry
26 processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest
27 lineaments. Our field observation confirms these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults.
28 These faults dissect Quaternary to recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow
29 earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study
30 provide a new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and may
31 contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

32

33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

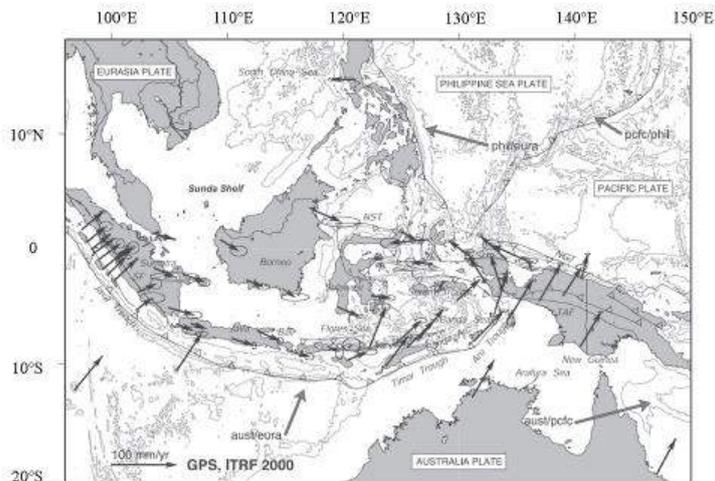
34

35 **PENDAHULUAN**

36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, 1966; Hamilton, 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi Sunda di
39 mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Subduksi Sunda
40 ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga di selatan
41 kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di sekitar selatan

42 kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram (Hamilton,
43 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1.).

44

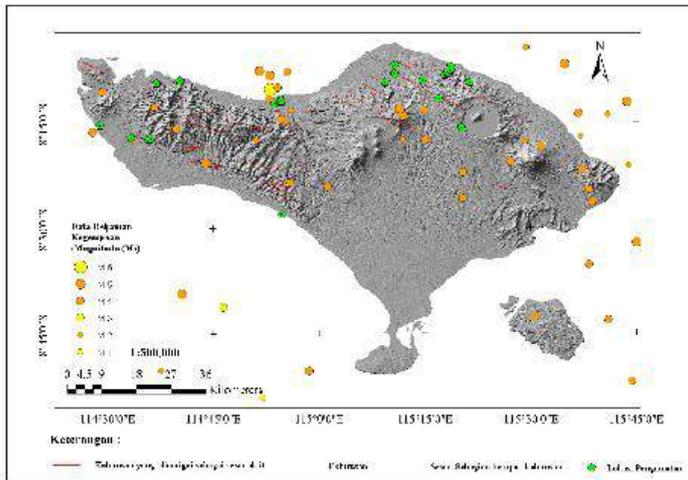


45

46 Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock dkk., 2003)

47

48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu mengurangi risiko
51 bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau Bali. Pulau Bali
52 merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang tahun. Rekaman
53 seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah ini (Katalog
54 USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di
55 wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona
56 subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan
57 sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah
58 dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang
59 ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya
60 antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.



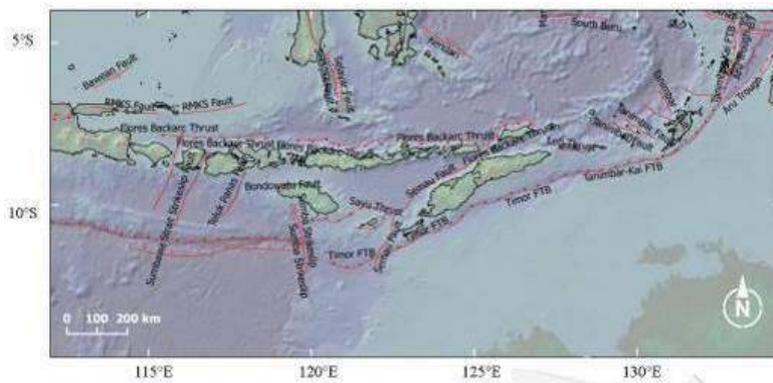
61
62 Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020
63 (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) dan hasil analisis kelurusan Pulau
64 Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi
65 kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur
66 Laut –Baratdaya (BD-TL)
67

68 Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran
69 hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo <
70 M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan
71 bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh
72 beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta
73 Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan
74 adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik
75 Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara
76 pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditengarai menjadi penyebab
77 terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

78 Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan
79 metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode
80 penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami
81 gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS
82 (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui
83 pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle
84 (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi
85 pada batuan dan endapan berumur Kuartar sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan
86 pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara

87 keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa dijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis
88 sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentukan morfologi dan geometri sesar yang dikenali di
89 lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau
90 Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi
91 terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)

92



93

94 Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta Sumber dan
95 Bahaya Gempa Bumi Nasional (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).

96

97 **Tatanan Geologi Regional Pulau Bali**

98 Pulau Bali, Sumbawa, dan Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan
99 yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas
100 pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan
101 menunjat ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets
102 dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran
103 struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar
104 naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011).
105 Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang
106 terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di
107 belakang busur ini diperkuat oleh Yasid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya dkk.
108 (2012) yang melakukan relokasi data seismisitas yang ditangkap oleh jaringan seismik lokal. Studi
109 yang dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali
110 yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar
111 naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di
112 wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994). Hasil analisis oleh Masturyono (1994).
113 menunjukkan bahwa keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya aktivitas kegempaan
114 lokal dan dangkal di wilayah tersebut. Batuan yang tersingkap di Bali didominasi oleh batuan

137 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan
138 tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
139 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
140 dipetakan.

141 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
142 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
143 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar
144 Bali, Nusatenggara dengan skala 1:250.000 (Purbo-Hadiwidjojo dkk., 1998) juga digunakan sebagai
145 acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif,
146 bisa dikenali melalui data DEM dan turunannya (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti
147 contohnya perubahan kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang
148 membentuk kelurusan (*lineament*) (Hady & Marliyani, 2020). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya
149 kelurusan sungai, lembah, punggung, dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, 2020).

150 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
151 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
152 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
153 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
154 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur
155 Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur
156 sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh dari
157 katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan
158 dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar
159 tersebut aktif.

160

161 **HASIL DAN PEMBAHASAN**

162 Analisis Kelurusan

163 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
164 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBL-TTG) dan pola kelurusan
165 minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 2). Pola kelurusan yang
166 berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut
167 Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian
168 besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb).
169 Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok
170 Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb).
171 Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb
172 dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau
173 Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi

174 Jembrana (Qvpj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb,
175 Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang
176 memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing
177 trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km
178 - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan
179 berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).

180

181 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

182 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
183 yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan
184 antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang
185 intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui.
186 Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada petunjuk peta kelurusan, kemudian setiap delineasi
187 kelurusan kami ditelusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang
188 berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

189 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
190 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpv), Formasi
191 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
192 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar
193 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar
194 yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai
195 55cm.

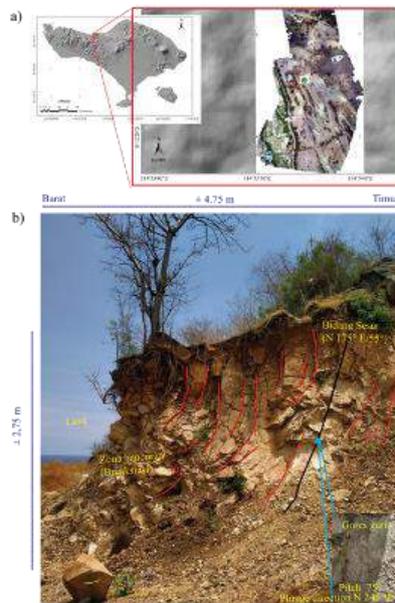
196 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
197 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
198 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
199 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
200 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
201 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
202 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola
203 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif (Boschi, 1996;
204 Machette, 2000; IAEA, 2010).

205 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
206 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
207 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
208 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
209 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998).
210 Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 6b),

Commented [A1]: Penulis belum menguraikan referensi yang digunakan dalam menyampaikan argumen dalam kalimat ini. Hal ini perlu dijelaskan.

Commented [A2R1]: Sudah dilakukan

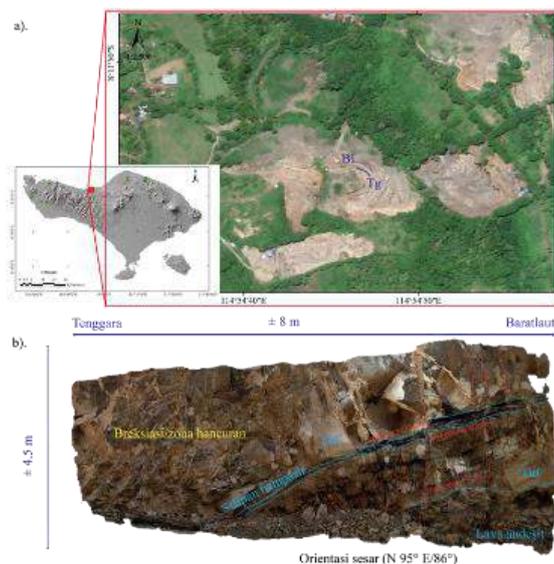
211 dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75 \times 7,5$ m. Unit lava
212 ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur
213 (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat
214 ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke
215 bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian
216 bawah, fragmen-fragmen ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan
217 adanya *drag fold* (Gambar 6a). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD (N 175°E/55°).
218 Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal
219 ini dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi N 245°E dengan pitch 75° dengan jenis
220 sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-
221 timurlaut (Gambar 6a).



222
223 Gambar 6. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh
224 melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a)
225 Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)
226

227 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
228 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava
229 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
230 menunjukkan orientasi N195°E/25°W. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
231 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf
232 yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh

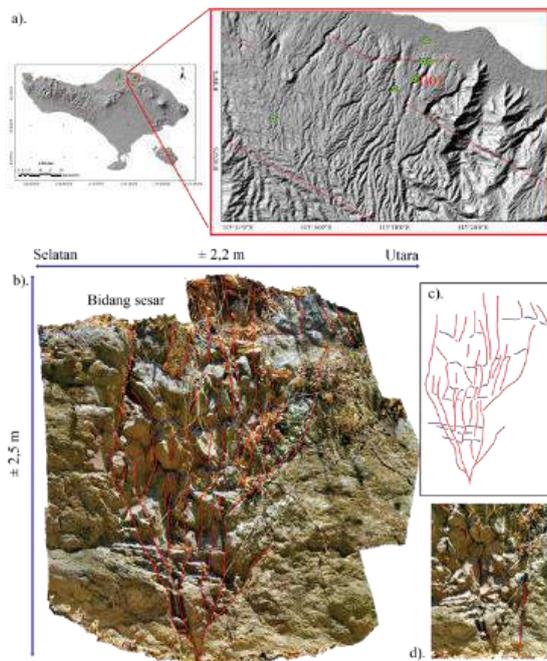
233 ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N
234 $95^{\circ}\text{E}/86^{\circ}$ dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm. Orientasi
235 pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi
236 dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang
237 diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
238 (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur,
239 rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG
240 (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 1963-2020 (katalog USGS) menunjukkan asosiasi
241 gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang
242 diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang
243 diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuartar. Adanya asosiasi kegempaan
244 serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona
245 sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



246
247 Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu
248 (a). Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
249 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik *shearing* pada bidang sesar dapat
250 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (b).
251

252 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
253 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
254 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
255 bagian dari Formasi Qvbb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
256 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar

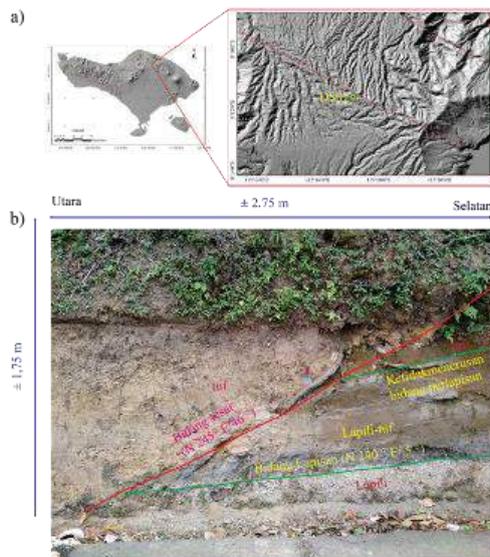
257 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan
258 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
259 *flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 8a).
260 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
261 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
262 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
263 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa USGS tahun 1963-
264 2020, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km dengan skala
265 $M \leq 4$ (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
266 terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



267
268 Gambar 8. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada
269 singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi
270 sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)
271

272 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
273 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
274 Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75 m. Susunan litologi dari bawah ke
275 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
276 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuartar. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
277 unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi

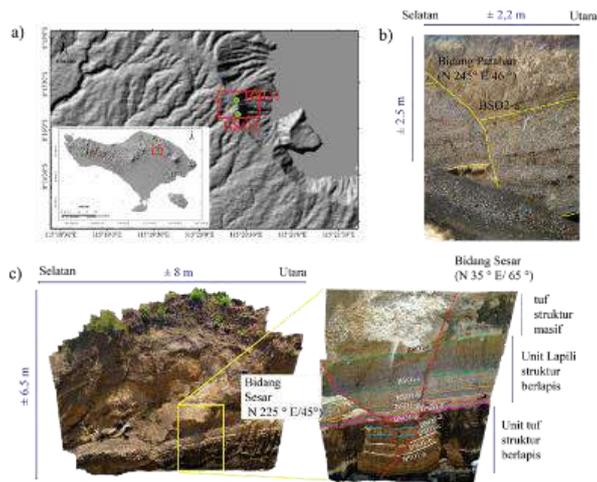
278 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya ($N245^{\circ}E/46^{\circ}$) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona
279 sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 9b). Data seismitas tahun 2009-
280 2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60
281 km (Gambar 2) (katalog USGS). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona sesar yang
282 menegenai batuan berumur Kuarter mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa dikategorikan sebagai
283 sesar aktif.



284
285 Gambar 9. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan
286 Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra (b).

287 Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di
288 Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun
289 yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli. Batuan di lokasi ini tersingkap berkat
290 adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka
291 pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakmenerusan
292 bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di
293 sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10a) terdapat bidang sesar
294 berarah $N35^{\circ}E/65^{\circ}$ dan $N 225^{\circ} E/45^{\circ}$. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan lapili di
295 bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang perlapisan berarah $N165^{\circ}E/10^{\circ}$. Bidang sesar
296 yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari
297 bidang perlapisan menunjukkan kisaran 7– 18 cm (Tabel 1). Pada lokasi pengamatan kedua (BS02,
298 Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh lapukan
299 tuf, memiliki bidang perlapisan $N152^{\circ}E/25^{\circ}$ tersesarkan oleh sesar turun berarah $N245^{\circ}E/46^{\circ}$

300 (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismisitas dangkal
 301 (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
 302 terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

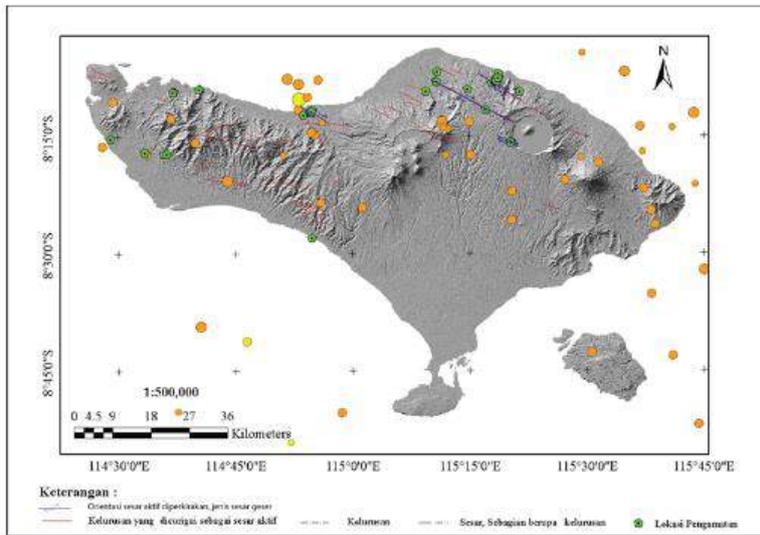


303
 304 Gambar 10. Lokasi singkapan batuan (a), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan
 305 komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 (b) dan unit tuf yang tersesarkan
 306 membentuk graben kecil di lokasi BS01 (c).
 307

308 Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a
Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55

309
 310 Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali
 311 didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar
 312 turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar
 313 turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 11). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan
 314 oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah
 315 TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut
 316 teridentifikasi memotong batuan berumur Kuarter.



317
318 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
319

320 KESIMPULAN

321 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
322 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
323 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
324 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
325 kemiringan 65-85° sedangkan kemiringan pada sesar turun ~40° dengan kemiringan ke arah TL.
326 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
327 Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
328 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
329 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
330 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
331 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
332 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
333 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
334 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
335 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
336 gempa bumi di Pulau Bali.

337 UCAPAN TERIMA KASIH

339 Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan
340 Tinggi (DRPM Dikti) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen

341 Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian
342 Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian,
343 mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu
344 Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya
345 kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam
346 pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Iftitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten lapangan.

347

348 KONTRIBUSI PENULIS

349 Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis
350 dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip

351 Gayatri Indah Marlyani: analisis dan intepretasi data, pengenditan manuskrip

352 Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi data,
353 pengeditan manuskrip.

354

355 DAFTAR PUSTAKA

- 356 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
357 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
358 measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
- 359 Boschi, E. (1996). New trends in active faulting studies for seismic hazard assessment.
- 360 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
361 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan
362 Geofisika
- 363 Daryono, M. R. (2016). Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar
364 Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- 365 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
366 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research
367 letters*, 21(20), 2191-2194.
- 368 Hady, H.K. & Marliyani, G.I. (2020). Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the
369 Sumatran Fault System in North I Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*
- 370 Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print. Off.
- 371 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*,
372 100(10), 1503-1527.
- 373 IAEA, S. S. G. N. (2010). SSG-9, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations.
374 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- 375 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A.
376 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
377 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- 378 Machette, M. N. (2000). Active, capable, and potentially active faults—a paleoseismic perspective.
379 *Journal of Geodynamics*, 29(3-5), 387-392.
- 380 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
381 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- 382 Masturyono. (1994). Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
383 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- 384 McCalpin, J. P. (2009). Paleoseismology. McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology.
- 385 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
386 example of a nascent continental fold? and thrust belt. *Journal of Geophysical Research: Solid
387 Earth*, 92(B1), 441-460.

Commented [A3]: Mohon dapat diurutkan sesuai abjad dan disebutkan nomor volume dan issue-nya.

Commented [A4R3]: Sudah dilakukan

- 388 Purbo-Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., & Amin, T.C. (1998). Peta Geologi Lembar Bali, Nusa
389 Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.
390 Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017,
391 Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
392 Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016).
393 On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System
394 (IGRS) 2013. FIG Working Week.
395 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
396 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
397 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
398 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
399 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
400 Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D V_p , V_s , Rasio V_p/V_s
401 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
402 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
403 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
404 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
405

406 **Referensi websites:**

- 407 Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
408 U.S. Geological Survey, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,
409 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
410

Bukti koonfirmasi review kedua dan hasil
review kedua

(8 Februari 2021)



Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

[MGI] R1-61928 Editor Decision

1 pesan

Dr. Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>
Kepada: Mr Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

8 Februari 2021 pukul 09.42

Mr Hurien Helmi:

We have reached a decision regarding your submission to Majalah Geografi Indonesia, "Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi permukaan dan morfologi tektonik".

Our decision is: Minor Revisions Required.

Please revise your paper according to the comments from the Editor in the attachments. Please highlight the revised parts in the final version of your paper and give a response according to the comments.

Furthermore, to ensure the fast publication of your paper, please answer all queries/suggestions, and we expect to receive the revised version of this paper manuscript within 2 days after this email has been sent.

Dr. Bachtiar Mutaqin
Coastal and Watershed Research Group
Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada
55281 Yogyakarta, Indonesia
mutaqin@ugm.ac.id

Chief Editor
Majalah Geografi Indonesia
<http://jurnal.ugm.ac.id/mgi>
ISSN 01251-1790 (print), ISSN 2540-945X (online)

**R1-61928-203896-1-ED.docx**
1781K

1 *Article*

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4

5 **Abstrak** Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi.
6 Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona
7 sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini,
8 gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk
9 melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey
10 lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m
11 serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis kelurusan
12 menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa
13 kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong
14 batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona
15 kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa
16 sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini
17 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang
18 akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

19

20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

21 **Abstract** Bali and its surrounding region are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone
22 to earthquake hazards. The structures that caused earthquakes in Bali are mainly from the front subduction faults and from
23 the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occur in the inland fault system.
24 This study aims to map the inland active faults in Bali using a combination of remotely-based and field-mapping methods.
25 We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry
26 processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest
27 lineaments. Our field observation confirms these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults.
28 These faults dissect Quaternary to recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow
29 earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study
30 provide a new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and may
31 contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

32

33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

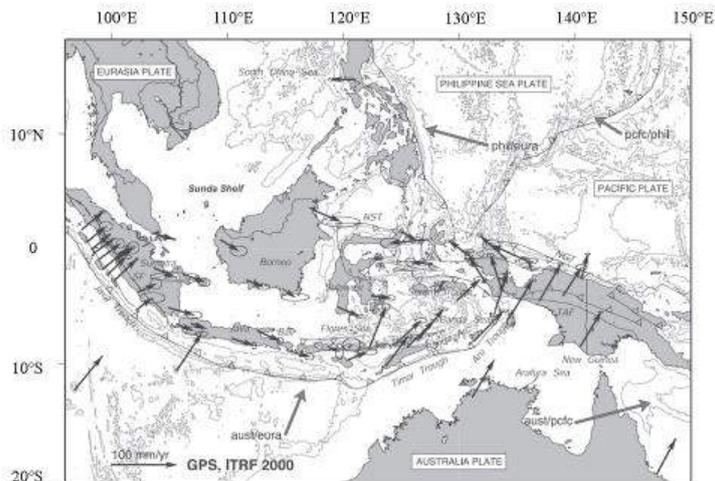
34

35 **PENDAHULUAN**

36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, 1966; Hamilton, 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi Sunda di
39 mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Subduksi Sunda
40 ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga di selatan
41 kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di sekitar selatan

42 kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram (Hamilton,
43 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1.).

44

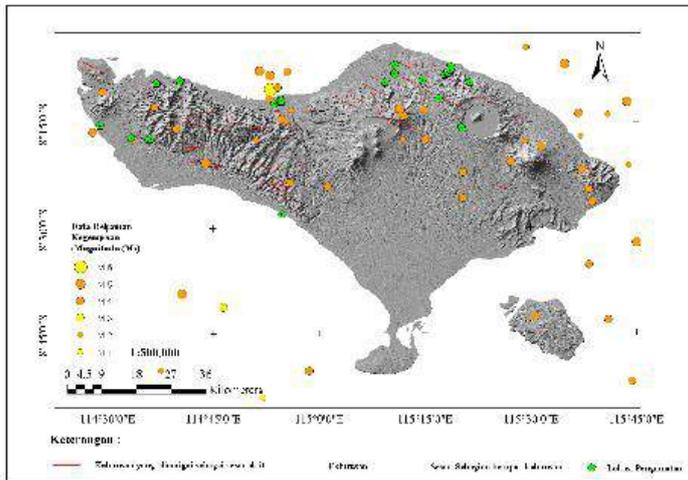


45

Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock dkk., 2003)

46

47
48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu mengurangi risiko
51 bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau Bali. Pulau Bali
52 merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang tahun. Rekaman
53 seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah ini (Katalog
54 USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di
55 wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona
56 subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan
57 sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah
58 dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang
59 ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya
60 antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.

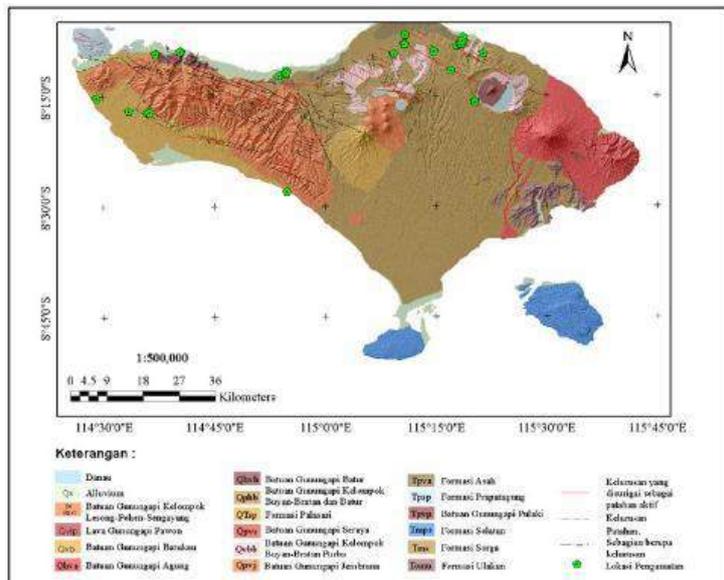


61
62 Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020
63 (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) dan hasil analisis kelurusan Pulau
64 Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi
65 kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur
66 Laut –Baratdaya (BD-TL)
67

68 Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran
69 hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo <
70 M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan
71 bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh
72 beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta
73 Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan
74 adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik
75 Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara
76 pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditengarai menjadi penyebab
77 terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

78 Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan
79 metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode
80 penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami
81 gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS
82 (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui
83 pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle
84 (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi
85 pada batuan dan endapan berumur Kuartar sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan
86 pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara

115 gunungapi berumur Kuartar yang terdiri atas lava, breksi vulkanik, pumis, lapili, tuf dan lahar yang
116 bersumber dari berbagai sumber gunung api kuartar dan di beberapa daerah tersingkap batuan
117 sedimen yang tersusun atas batugamping, napal, batupasir, batugamping terumbu dan batupasir
118 gampingan yang berumur Oligosen-Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998). Struktur yang
119 berkembang dan mendominasi di Pulau Bali berorientasi Baratlaut-Tenggara (BL-TG) yang sebagian
120 besar sesar yang berkembang berada di bagian barat Pulau Bali (Gambar 4) (Purbo-Hadiwidjojo, dkk.,
121 1998).



122
123 Gambar 4. Peta Geologi Regional Pulau Bali (modifikasi dari Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998)

124
125 **METODE PENELITIAN**

126 Parameter sesar aktif yang perlu diketahui dalam analisis bahaya seismik meliputi geometri,
127 sejarah gempa bumi, laju pergerakan, dan perulangan gempa (McCalpin, 2009). Pemetaan merupakan
128 tahap awal dalam rangkaian studi sesar aktif yang diteliti. Untuk mengetahui sejarah, laju dan
129 pergerakan dan perulangan gempa perlu dilakukan studi paleoseismologi yang bertujuan untuk
130 mengetahui lokasi, waktu kejadian dan estimasi magnitudo gempa yang terjadi di masa lampau
131 (Wallace, 1981; Daryono, 2016).

132 Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi
133 berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda
134 serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar
135 aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui
136 struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi

137 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan
138 tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
139 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
140 dipetakan.

141 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
142 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
143 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar
144 Bali, Nusatenggara dengan skala 1:250.000 (Purbo-Hadiwidjojo dkk., 1998) juga digunakan sebagai
145 acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif,
146 bisa dikenali melalui data DEM dan turunannya (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti
147 contohnya perubahan kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang
148 membentuk kelurusan (*lineament*) (Hady & Marliyani, 2020). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya
149 kelurusan sungai, lembah, punggung, dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, 2020).

150 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
151 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
152 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
153 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
154 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur
155 Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur
156 sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh dari
157 katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan
158 dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar
159 tersebut aktif.

160

161 **HASIL DAN PEMBAHASAN**

162 Analisis Kelurusan

163 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
164 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBL-TTG) dan pola kelurusan
165 minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 2). Pola kelurusan yang
166 berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut
167 Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian
168 besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb).
169 Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok
170 Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb).
171 Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb
172 dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau
173 Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi

174 Jembrana (Qpvj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb,
175 Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang
176 memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing
177 trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km
178 - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan
179 berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).

180

181 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

182 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
183 yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan
184 antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang
185 intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui.
186 Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada petunjuk peta kelurusan, kemudian setiap delineasi
187 kelurusan kami ditelusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang
188 berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

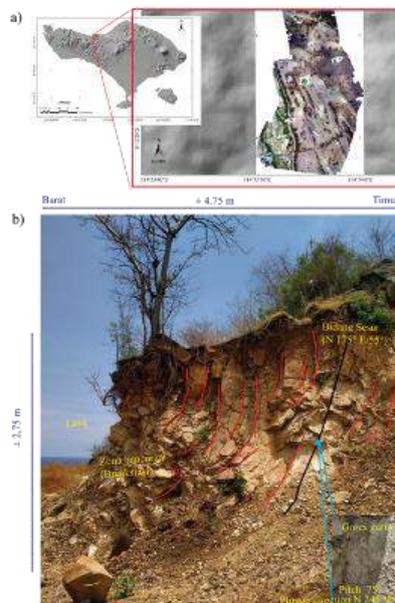
189 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
190 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpv), Formasi
191 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
192 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar
193 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar
194 yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai
195 55cm.

196 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
197 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
198 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
199 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
200 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
201 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
202 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola
203 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif.

204 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
205 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
206 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
207 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
208 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998).
209 Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 6b),
210 dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75$ x 7,5 m. Unit lava

Commented [A1]: Penulis belum menguraikan referensi yang digunakan dalam menyampaikan argumen dalam kalimat ini. Hal ini perlu dijelaskan.

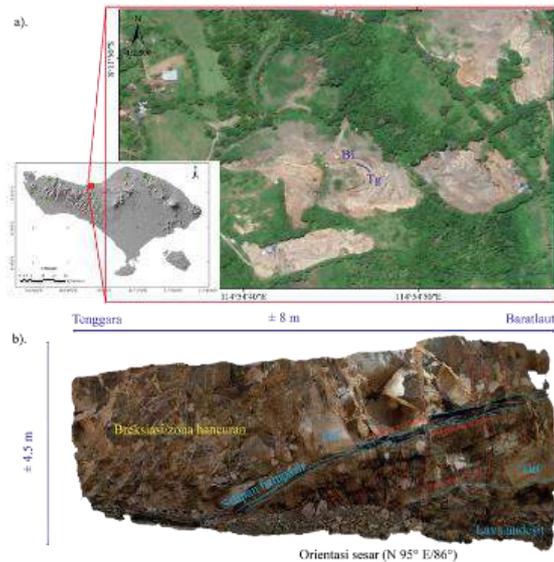
211 ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur
212 (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat
213 ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke
214 bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian
215 bawah, fragmen-fragmen ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan
216 adanya *drag fold* (Gambar 6a). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD ($N 175^{\circ}E/55^{\circ}$).
217 Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal
218 ini dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi $N 245^{\circ}E$ dengan pitch 75° dengan jenis
219 sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-
220 timurlaut (Gambar 6a).



221
222 Gambar 6. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh
223 melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a)
224 Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)
225

226 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
227 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava
228 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
229 menunjukkan orientasi $N195^{\circ}E/25^{\circ}W$. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
230 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf
231 yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh
232 ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N

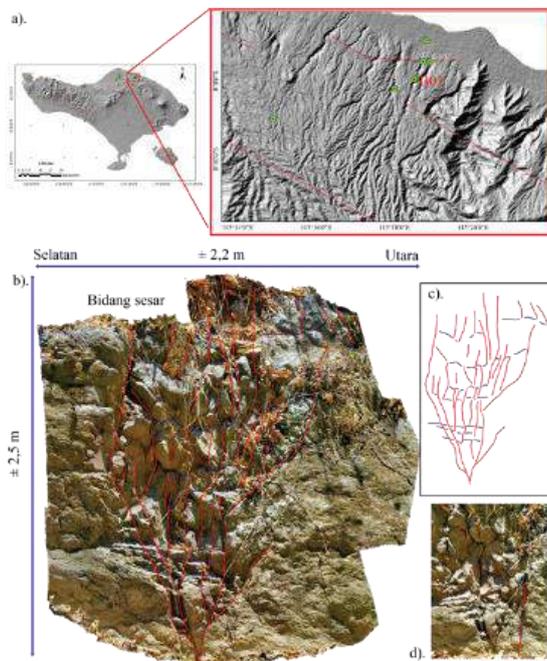
233 95°E/86° dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm. Orientasi
234 pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi
235 dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang
236 diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
237 (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur,
238 rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG
239 (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 1963-2020 (katalog USGS) menunjukkan asosiasi
240 gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang
241 diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang
242 diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuartar. Adanya asosiasi kegempaan
243 serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona
244 sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



245
246 Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu
247 (a). Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
248 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat
249 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (b).
250

251 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
252 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
253 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
254 bagian dari Formasi Qvbb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
255 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar
256 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah $N295^{\circ}E$ dan

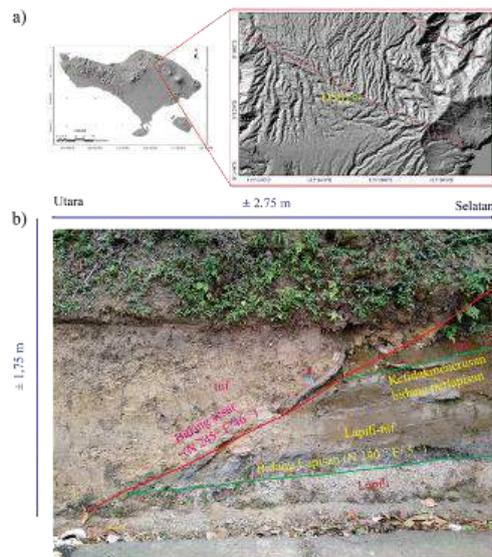
257 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
258 *flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 8a).
259 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
260 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
261 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
262 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa USGS tahun 1963-
263 2020, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km dengan skala
264 $M \leq 4$ (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
265 terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



266
267 Gambar 8. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada
268 singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi
269 sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)
270

271 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
272 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
273 Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75 m. Susunan litologi dari bawah ke
274 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
275 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuartar. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
276 unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi
277 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya (N245°E/46°) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona

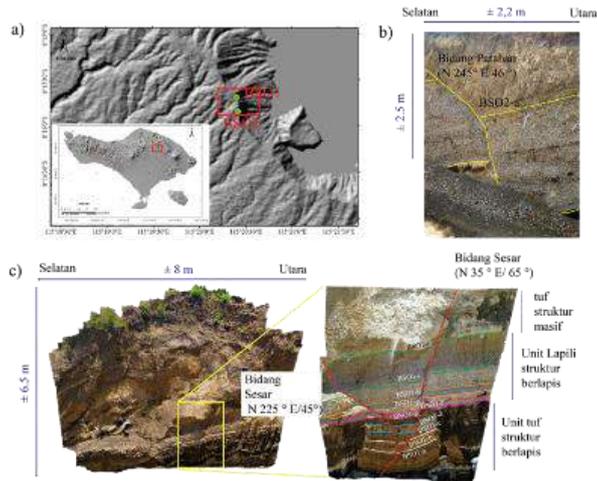
278 sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 9b). Data seismitas tahun 2009-
279 2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60
280 km (Gambar 2) (katalog USGS). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona sesar yang
281 menegenai batuan berumur Kuartar mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa dikategorikan sebagai
282 sesar aktif.



283
284 Gambar 9. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan
285 Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra (b).

286 Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di
287 Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun
288 yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli. Batuan di lokasi ini tersingkap berkat
289 adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka
290 pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakmenerusan
291 bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di
292 sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10a) terdapat bidang sesar
293 berarah $N35^{\circ}E/65^{\circ}$ dan $N225^{\circ}E/45^{\circ}$. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan lapili di
294 bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang peralihan berarah $N165^{\circ}E/10^{\circ}$. Bidang sesar
295 yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari
296 bidang peralihan menunjukkan kisaran 7– 18 cm (Tabel 1). Pada lokasi pengamatan kedua (BS02,
297 Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh lapukan
298 tuf, memiliki bidang peralihan $N152^{\circ}E/25^{\circ}$ tersesarkan oleh sesar turun berarah $N245^{\circ}E/46^{\circ}$
299 (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismisitas dangkal

300 (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
 301 terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

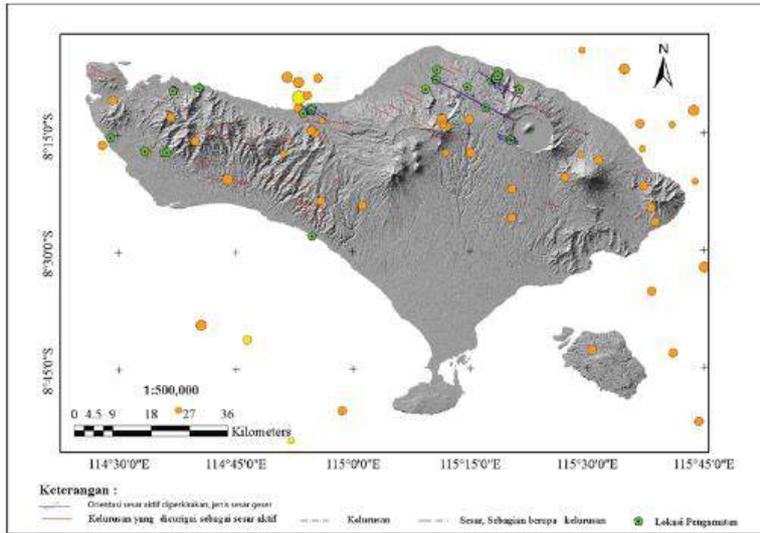


302
 303 Gambar 10. Lokasi singkapan batuan (a), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan
 304 komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 (b) dan unit tuf yang tersesarkan
 305 membentuk graben kecil di lokasi BS01 (c).
 306

307 Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a
Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55

308
 309 Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali
 310 didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar
 311 turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar
 312 turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 11). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan
 313 oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah
 314 TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut
 315 teridentifikasi memotong batuan berumur Kuartar.



316
317 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
318

319 KESIMPULAN

320 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
321 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
322 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
323 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
324 kemiringan $65-85^\circ$ sedangkan kemiringan pada sesar turun $\sim 40^\circ$ dengan kemiringan ke arah TL.
325 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
326 Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
327 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
328 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
329 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
330 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
331 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
332 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
333 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
334 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
335 gempa bumi di Pulau Bali.

336 UCAPAN TERIMA KASIH

337 Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan
338 Tinggi (DRPM Dikti) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen
339

340 Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian
341 Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian,
342 mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu
343 Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya
344 kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam
345 pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Iftitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten lapangan.

346

347 KONTRIBUSI PENULIS

348 Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis
349 dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip

350 Gayatri Indah Marlyani: analisis dan interpretasi data, pengeditan manuskrip

351 Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi data,
352 pengeditan manuskrip.

353

354 DAFTAR PUSTAKA

- 355 Hady,H.K.& Marliyani, G.I. (2020), Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the
356 Sumatran Fault System in North 1 Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*
- 357 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
358 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
359 measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
- 360 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
361 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan
362 Geofisika
- 363 Daryono, M. R. (2016). Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar
364 Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- 365 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
366 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research
367 letters*, 21(20), 2191-2194.
- 368 Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print.Off.
- 369 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*,
370 100(10), 1503-1527.
- 371 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A.
372 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
373 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- 374 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
375 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- 376 Masturyono.(1994).Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
377 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- 378 McCalpin, J. P. (2009). Paleoseismology. McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology.
- 379 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
380 example of a nascent continental fold?and?thrust belt. *Journal of Geophysical Research:Solid
381 Earth*, 92(B1), 441-460.
- 382 Purbo-Hadiwidjojo,P.M.M., Samodra, H., & Amin, T.C. (1998). Peta Geologi Lembar Bali, Nusa
383 Tenggara,Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.
384 Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017,
385 Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.

Commented [A2]: Mohon dapat diurutkan sesuai abjad dan disebutkan nomor volume dan issue-nya.

- 386 Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016).
387 On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System
388 (IGRS) 2013. FIG Working Week.
389 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
390 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
391 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
392 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
393 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
394 Yadhya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs
395 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
396 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
397 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
398 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
399

400 **Referensi websites:**

- 401 Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
402 U.S. Geological Survey, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,
403 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
404

1 *Article*

2 **Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi**
3 **permukaan dan morfologi tektonik**

4
5 **Abstrak** Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi.
6 Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona
7 sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini,
8 gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk
9 melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey
10 lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m
11 serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis kelurusan
12 menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa
13 kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong
14 batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona
15 kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa
16 sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini
17 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang
18 akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

19
20 **Kata kunci:** gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

21 **Abstract** Bali and its surrounding region are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone
22 to earthquake hazards. The structures that caused earthquakes in Bali are mainly from the front subduction faults and from
23 the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occur in the inland fault system.
24 This study aims to map the inland active faults in Bali using a combination of remotely-based and field-mapping methods.
25 We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry
26 processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest
27 lineaments. Our field observation confirms these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults.
28 These faults dissect Quaternary to recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow
29 earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study
30 provide a new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and may
31 contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

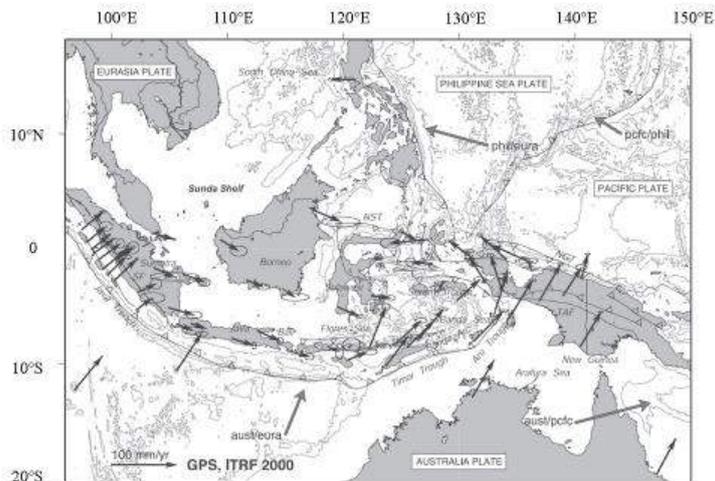
32
33 **Keywords:** earthquake, active fault, Bali, active tectonic.

34
35 **PENDAHULUAN**

36 Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-
37 Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini
38 (Wilson, 1966; Hamilton, 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi Sunda di
39 mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Subduksi Sunda
40 ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga di selatan
41 kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di sekitar selatan

42 kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram (Hamilton,
43 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1.).

44

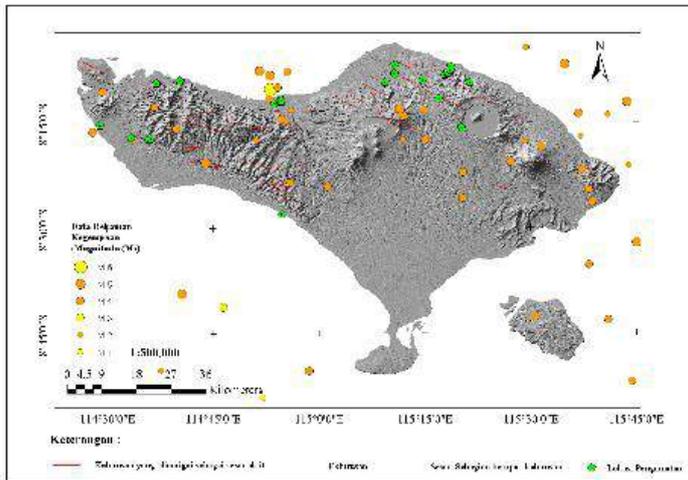


45

46 Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock dkk., 2003)

47

48 Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini
49 mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga penelitian
50 mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu mengurangi risiko
51 bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau Bali. Pulau Bali
52 merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang tahun. Rekaman
53 seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah ini (Katalog
54 USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di
55 wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona
56 subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan
57 sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah
58 dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang
59 ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya
60 antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.



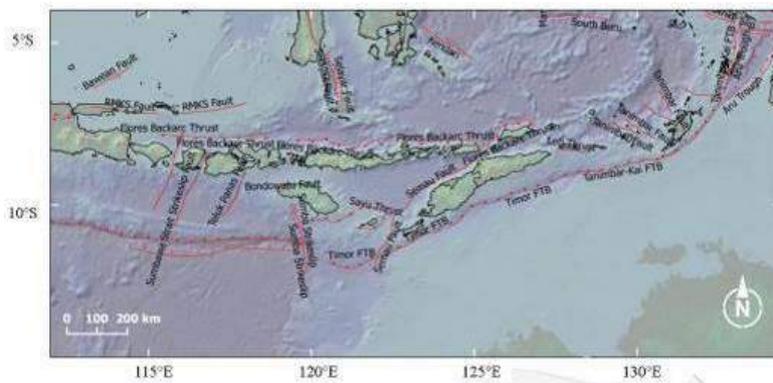
61
62 Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020
63 (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) dan hasil analisis kelurusan Pulau
64 Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi
65 kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur
66 Laut –Baratdaya (BD-TL)
67

68 Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran
69 hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo <
70 M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan
71 bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh
72 beberapa peneliti (Koulali, dkk 2016; Susilo, dkk, 2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta
73 Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan
74 adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik
75 Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara
76 pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditengarai menjadi penyebab
77 terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).

78 Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan
79 metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode
80 penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami
81 gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS
82 (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui
83 pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle
84 (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi
85 pada batuan dan endapan berumur Kuartar sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan
86 pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara

87 keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa dijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis
88 sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentukan morfologi dan geometri sesar yang dikenali di
89 lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau
90 Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi
91 terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)

92



93

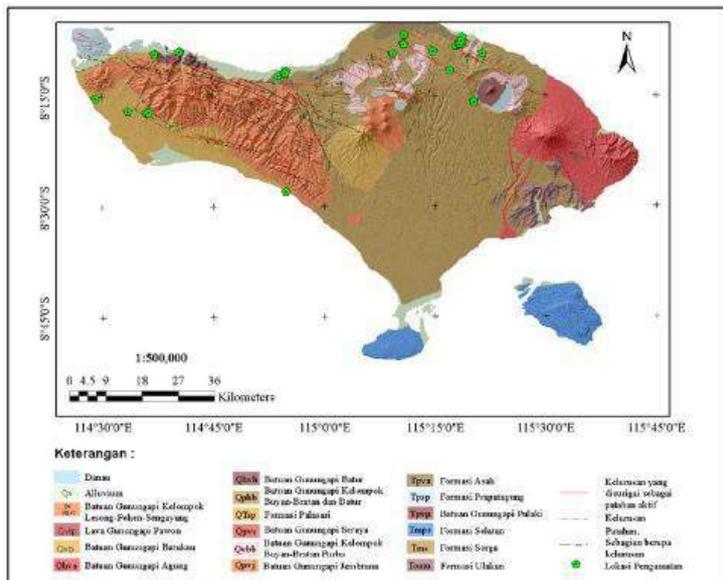
94 Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta Sumber dan
95 Bahaya Gempa Bumi Nasional (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).

96

97 **Tatanan Geologi Regional Pulau Bali**

98 Pulau Bali, Sumbawa, dan Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan
99 yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas
100 pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan
101 menunjat ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets
102 dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran
103 struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar
104 naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011).
105 Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang
106 terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di
107 belakang busur ini diperkuat oleh Yasid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya dkk.
108 (2012) yang melakukan relokasi data seismisitas yang ditangkap oleh jaringan seismik lokal. Studi
109 yang dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali
110 yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar
111 naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di
112 wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994). Hasil analisis oleh Masturyono (1994).
113 menunjukkan bahwa keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya aktivitas kegempaan
114 lokal dan dangkal di wilayah tersebut. Batuan yang tersingkap di Bali didominasi oleh batuan

115 gunungapi berumur Kuartar yang terdiri atas lava, breksi vulkanik, pumis, lapili, tuf dan lahar yang
116 bersumber dari berbagai sumber gunung api kuartar dan di beberapa daerah tersingkap batuan
117 sedimen yang tersusun atas batugamping, napal, batupasir, batugamping terumbu dan batupasir
118 gampingan yang berumur Oligosen-Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998). Struktur yang
119 berkembang dan mendominasi di Pulau Bali berorientasi Baratlaut-Tenggara (BL-TG) yang sebagian
120 besar sesar yang berkembang berada di bagian barat Pulau Bali (Gambar 4) (Purbo-Hadiwidjojo, dkk.,
121 1998).



122
123 Gambar 4. Peta Geologi Regional Pulau Bali (modifikasi dari Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998)

124 125 METODE PENELITIAN

126 Parameter sesar aktif yang perlu diketahui dalam analisis bahaya seismik meliputi geometri,
127 sejarah gempa bumi, laju pergerakan, dan perulangan gempa (McCalpin, 2009). Pemetaan merupakan
128 tahap awal dalam rangkaian studi sesar aktif yang diteliti. Untuk mengetahui sejarah, laju dan
129 pergerakan dan perulangan gempa perlu dilakukan studi paleoseismologi yang bertujuan untuk
130 mengetahui lokasi, waktu kejadian dan estimasi magnitudo gempa yang terjadi di masa lampau
131 (Wallace, 1981; Daryono, 2016).

132 Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi
133 berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda
134 serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar
135 aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui
136 struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi

137 dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan
138 tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan
139 pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang
140 dipetakan.

141 Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model
142 elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui
143 website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar
144 Bali, Nusatenggara dengan skala 1:250.000 (Purbo-Hadiwidjojo dkk., 1998) juga digunakan sebagai
145 acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif,
146 bisa dikenali melalui data DEM dan turunannya (*hillshade, slope map, drainage pattern*) seperti
147 contohnya perubahan kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang
148 membentuk kelurusan (*lineament*) (Hady & Marliyani, 2020). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya
149 kelurusan sungai, lembah, punggung, dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, 2020).

150 Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan
151 pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya
152 sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike, dip, pitch, rake*) dan pergerakan relatif
153 dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini
154 dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur
155 Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur
156 sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh dari
157 katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan
158 dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar
159 tersebut aktif.

160

161 **HASIL DAN PEMBAHASAN**

162 Analisis Kelurusan

163 Secara umum, delineasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang
164 berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBL-TTG) dan pola kelurusan
165 minor yang berarah baratbaratdaya-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 2). Pola kelurusan yang
166 berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut
167 Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian
168 besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb).
169 Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok
170 Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb).
171 Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb
172 dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau
173 Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi

174 Jembrana (Qvpj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb,
175 Formasi PrapatAgung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang
176 memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing
177 trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km
178 - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan
179 berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).

180

181 Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

182 Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan
183 yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan
184 antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang
185 intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui.
186 Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada petunjuk peta kelurusan, kemudian setiap delineasi
187 kelurusan kami ditelusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang
188 berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

189 Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan.
190 Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpv), Formasi
191 Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah
192 N 280°E – N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar
193 normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar
194 yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai
195 55cm.

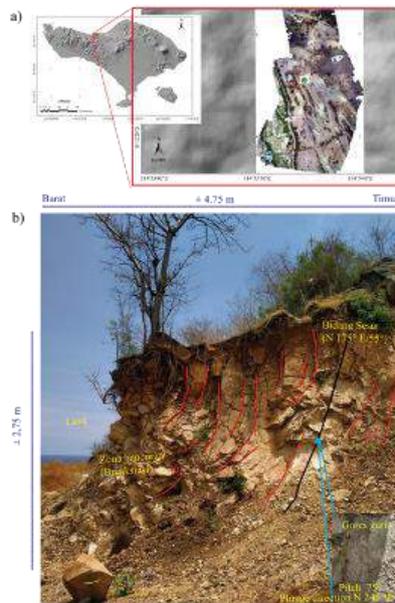
196 Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif
197 waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong perlapisan batuan dengan
198 umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran
199 terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi
200 berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan
201 definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau
202 sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola
203 kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif (Boschi, 1996;
204 Machette, 2000; IAEA, 2010).

205 Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan
206 Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan
207 penambangan batu di kawasan tersebut. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan
208 kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang
209 bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998).
210 Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 6b),

Commented [A1]: Penulis belum menguraikan referensi yang digunakan dalam menyampaikan argumen dalam kalimat ini. Hal ini perlu dijelaskan.

Commented [A2R1]: Sudah dilakukan

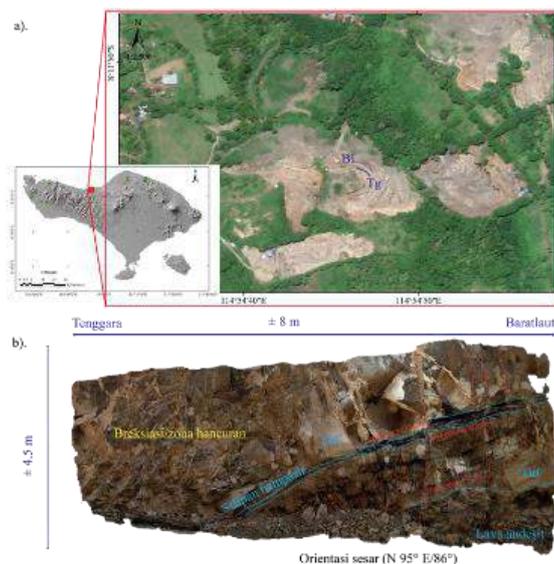
211 dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75 \times 7,5$ m. Unit lava
212 ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur
213 (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat
214 ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke
215 bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian
216 bawah, fragmen-fragmen ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan
217 adanya *drag fold* (Gambar 6a). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD (N 175°E/55°).
218 Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal
219 ini dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi N 245°E dengan pitch 75° dengan jenis
220 sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-
221 timurlaut (Gambar 6a).



222
223 Gambar 6. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh
224 melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a)
225 Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)
226

227 Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama
228 Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava
229 yang tersingkap pada singkapan berdimensi $\pm 4,5 \times 8$ m. Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff
230 menunjukkan orientasi N195°E/25°W. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava
231 masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf
232 yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh

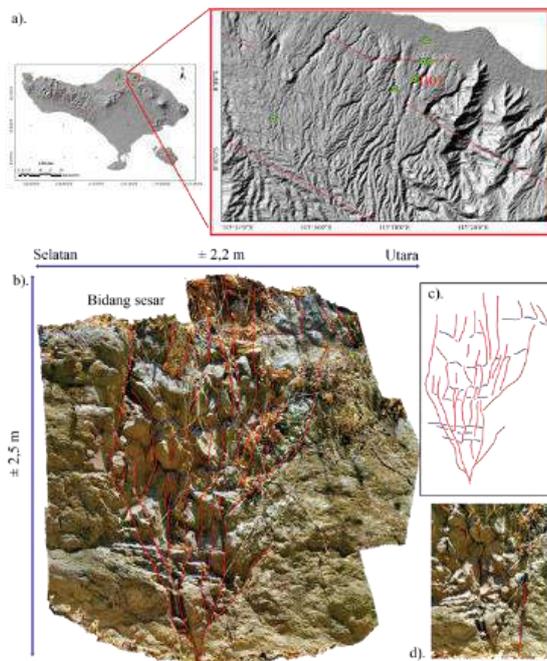
233 ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7a). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N
234 $95^{\circ}\text{E}/86^{\circ}$ dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara $\pm 10 - 17$ cm. Orientasi
235 pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi
236 dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang
237 diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*)
238 (Gambar 7a). Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur,
239 rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG
240 (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 1963-2020 (katalog USGS) menunjukkan asosiasi
241 gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang
242 diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi kelurusan yang
243 diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuartar. Adanya asosiasi kegempaan
244 serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona
245 sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.



246
247 Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu
248 (a). Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang
249 perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik shearing pada bidang sesar dapat
250 menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (b).
251

252 Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa
253 Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi
254 dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar
255 bagian dari Formasi Qybb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi
256 ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar

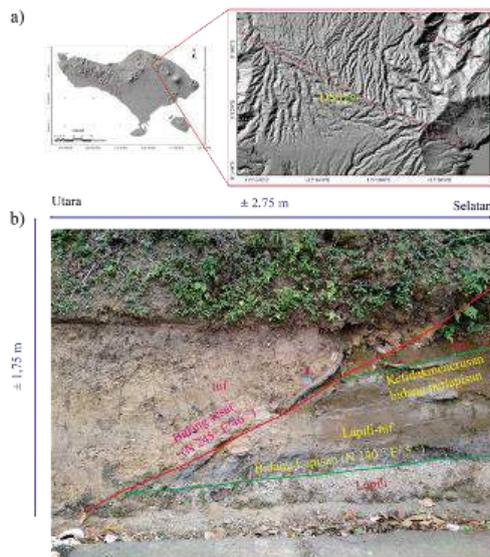
257 tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan
258 N175°E (Gambar 8a). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini*
259 *flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 8a).
260 Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang
261 rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini
262 diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan
263 pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa USGS tahun 1963-
264 2020, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km dengan skala
265 $M \leq 4$ (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
266 terdeformasi yang berumur Kuartar, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



267
268 Gambar 8. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada
269 singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi
270 sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)
271

272 Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi
273 batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur.
274 Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75 m. Susunan litologi dari bawah ke
275 atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok
276 Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuartar. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada
277 unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi

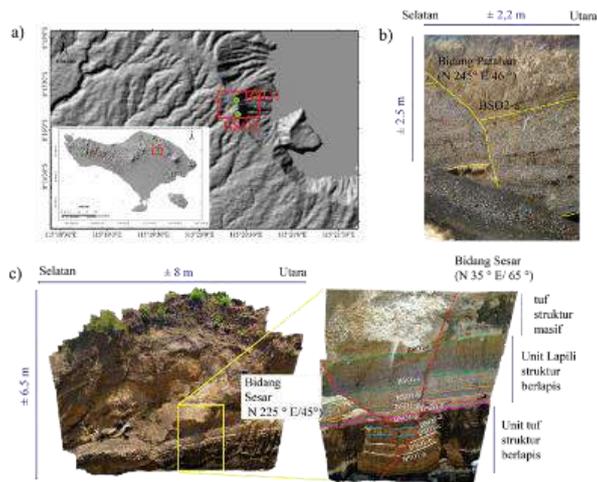
278 oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya ($N245^{\circ}E/46^{\circ}$) dengan jenis sesar normal (Gambar 9a). Zona
279 sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 9b). Data seismitas tahun 2009-
280 2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60
281 km (Gambar 2) (katalog USGS). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona sesar yang
282 menegenai batuan berumur Kuarter mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa dikategorikan sebagai
283 sesar aktif.



284
285 Gambar 9. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan
286 Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakmenerusan pada unit tephra (b).

287 Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di
288 Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun
289 yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli. Batuan di lokasi ini tersingkap berkat
290 adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka
291 pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakmenerusan
292 bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di
293 sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10a) terdapat bidang sesar
294 berarah $N35^{\circ}E/65^{\circ}$ dan $N 225^{\circ} E/45^{\circ}$. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan lapili di
295 bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang perlapisan berarah $N165^{\circ}E/10^{\circ}$. Bidang sesar
296 yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari
297 bidang perlapisan menunjukkan kisaran 7– 18 cm (Tabel 1). Pada lokasi pengamatan kedua (BS02,
298 Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh lapukan
299 tuf, memiliki bidang perlapisan $N152^{\circ}E/25^{\circ}$ tersesarkan oleh sesar turun berarah $N245^{\circ}E/46^{\circ}$

300 (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismisitas dangkal
 301 (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang
 302 terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

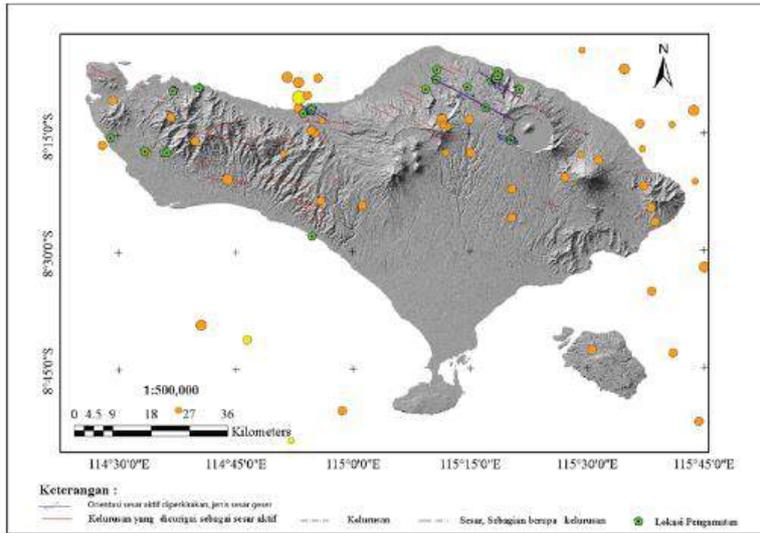


303
 304 Gambar 10. Lokasi singkapan batuan (a), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan
 305 komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 (b) dan unit tuf yang tersesarkan
 306 membentuk graben kecil di lokasi BS01 (c).
 307

Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BSO1										BSO1
	BS01	BS02									
	-a	-b	-c	-d	-e	-e	-f	-g	-h	-i	-a
Ofset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55

309
 310 Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali
 311 didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar
 312 turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar
 313 turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 11). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan
 314 oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah
 315 TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut
 316 teridentifikasi memotong batuan berumur Kuarter.



317
318 Gambar 11. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru
319

320 KESIMPULAN

321 Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di
322 darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar
323 turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang
324 dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut
325 kemiringan 65-85° sedangkan kemiringan pada sesar turun ~40° dengan kemiringan ke arah TL.
326 Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur
327 Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola
328 kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan
329 sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan
330 kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar
331 aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang
332 meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan
333 untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini
334 memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi
335 kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana
336 gempa bumi di Pulau Bali.

337 UCAPAN TERIMA KASIH

339 Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan
340 Tinggi (DRPM Dikti) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen

341 Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian
342 Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian,
343 mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu
344 Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya
345 kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam
346 pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Iftitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten lapangan.

347

348 KONTRIBUSI PENULIS

349 Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis
350 dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip

351 Gayatri Indah Marlyani: analisis dan interpretasi data, pengeditan manuskrip

352 Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi data,
353 pengeditan manuskrip.

354

355 DAFTAR PUSTAKA

- 356 Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya,
357 C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system
358 measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
- 359 Boschi, E. (1996). New trends in active faulting studies for seismic hazard assessment.
- 360 Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan
361 Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan
362 Geofisika
- 363 Daryono, M. R. (2016). Paleoseismology tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar
364 Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- 365 DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the
366 geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research
367 letters*, 21(20), 2191-2194.
- 368 Hady, H.K. & Marliyani, G.I. (2020). Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the
369 Sumatran Fault System in North I Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*
- 370 Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region (No. 1078). US Govt. Print. Off.
- 371 Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*,
372 100(10), 1503-1527.
- 373 IAEA, S. S. G. N. (2010). SSG-9, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations.
374 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- 375 Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A.
376 (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda
377 arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- 378 Machette, M. N. (2000). Active, capable, and potentially active faults—a paleoseismic perspective.
379 *Journal of Geodynamics*, 29(3-5), 387-392.
- 380 Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate
381 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- 382 Masturyono. (1994). Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On
383 Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- 384 McCalpin, J. P. (2009). Paleoseismology. McCalpin, J. P. (2012). Paleoseismology.
- 385 McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an
386 example of a nascent continental fold and thrust belt. *Journal of Geophysical Research: Solid
387 Earth*, 92(B1), 441-460.

Commented [A3]: Mohon dapat diurutkan sesuai abjad dan disebutkan nomor volume dan issue-nya.

Commented [A4R3]: Sudah dilakukan

- 388 Purbo-Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., & Amin, T.C. (1998). Peta Geologi Lembar Bali, Nusa
389 Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.
390 Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017,
391 Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
392 Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016).
393 On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System
394 (IGRS) 2013. FIG Working Week.
395 Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia.
396 *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
397 Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United
398 States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
399 Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?
400 Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs
401 Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13(1), 32-41.
402 Yasid, M. (1999). Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter
403 dan Solusi Bidang Sesar. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan
404 Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung
405

406 **Referensi websites:**

- 407 Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>
408 U.S. Geological Survey, Earthquake Catalog, diakses, 16 Agustus, 2020,
409 <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
410

Bukti konfirmasi artikel accepted
(10 Februari 2021)



Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

[MGI] R2-61928 Editor Decision

1 pesan

Dr. Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>
Kepada: Mr Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

10 Februari 2021 pukul 07.02

Mr Hurien Helmi:

We have reached a decision regarding your submission to Majalah Geografi Indonesia, "Identifikasi sesar aktif di Pulau Bali dengan menggunakan data pemetaan geologi permukaan dan morfologi tektonik".

Our decision is to: Accept Submission.

Our technical staff will contact you soon related to proofreading and administrative stuff.

Dr. Bachtiar Mutaqin
Coastal and Watershed Research Group
Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada
55281 Yogyakarta, Indonesia
mutaqin@ugm.ac.id

Chief Editor
Majalah Geografi Indonesia
<http://jurnal.ugm.ac.id/mgi>
ISSN 01251-1790 (print), ISSN 2540-945X (online)

Bukti konfirmasi artikel published online
(Maret 2021)



Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

[MGI] Proofreading Request (Author)

4 pesan

Winarsih Winarsih <wiwin_geo@ugm.ac.id>
Kepada: Mr Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>
Cc: Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>

3 Maret 2021 pukul 13.42

Dear. Mr Hurien Helmi:

Naskah Bapak/Ibu telah diterima dan akan diterbitkan dalam Majalah Geografi Indonesia (untuk edisi Maret 2021 apakah anda setuju?) Jika Bapak/Ibu sudah setuju mohon untuk koreksi kesalahan tata letak dan penulisan untuk terakhir kalinya sebelum artikel ini kami publish, kami tunggu secepatnya perbaikannya, jika tidak ada perbaikan kami menganggap Bapak/Ibu sudah menyetujui artikel ini.

Selain itu mohon segera menyelesaikan biaya kontribusi penerbitan Rp 750.000 (Tujuh ratus lima puluh ribu rupiah) ke Rekening berikut.

Kontribusi penerbitan ini bertujuan untuk menjaga kualitas penerbitan Majalah Geografi Indonesia.

Rekening:

PERPUSTAKAAN FAKULTAS GEOGRAFI UGM PTNBH

Acc No.: 0721159041

Bank BNI Cabang UGM

1. Silahkan menyelesaikan biaya ini selama 15 hari terhitung dari Bapak/Ibu menerima email.
 2. Silakan kirim email tanda terima transfer ke mgi@ugm.ac.id untuk konfirmasi
- Jika Bapak/Ibu memiliki pertanyaan tentang ini, silahkan menghubungi Winarsih, 085228595633, wiwin_geo@ugm.ac.id.

Submission URL: <https://jurnal.ugm.ac.id/mgi/author/submissionEditing/61928>

Username: hurien_helmi

Winarsih Winarsih
Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada
wiwin_geo@ugm.ac.id
Assistant Editor
Indonesian Journal of Geography and
Majalah Geografi

Chief Editor
Majalah Geografi Indonesia
<http://jurnal.ugm.ac.id/mgi>
ISSN 01251-1790 (print), ISSN 2540-945X (online)

 **6.pdf**
1269K

Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>
Kepada: Winarsih Winarsih <wiwin_geo@ugm.ac.id>, Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>

9 Maret 2021 pukul 18.57

Selamat malam Bu

Berdasarkan versi terakhir dari paper tersebut masih ada yang perlu diperbaiki tetapi saya tidak bisa mengupload revisi paper di sistem. dibawah ini terlampir koreksi dari saya, mohon dibantu untuk merevisinya, terima kasih

salam

Hurien Helmi

[Kutipan teks disembunyikan]

2 lampiran**Catatan review_hurien.docx**

15K

**revisi 9 Maret2021_hurien.pdf**

1271K

Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

24 Maret 2021 pukul 08.07

Kepada: Winarsih Winarsih <wiwin_geo@ugm.ac.id>, Bachtiar Mutaqin <mutaqin@ugm.ac.id>

Selamat Pagi Bapak/Ibu

Saya beberapa hari yang lalu mengirimkan email ini untuk revisi paper saya, namun saya belum menerima respon saat ini. Mohon konfirmasinya apakah masukan dari saya sudah terakomodasi. Terima kasih

Salam

Hurien Helmi

[Kutipan teks disembunyikan]

2 lampiran**Catatan review_hurien.docx**

15K

**revisi 9 Maret2021_hurien.pdf**

1271K

Wiwin Winarsih <wiwin_geo@ugm.ac.id>

26 Maret 2021 pukul 08.17

Kepada: Hurien Helmi <hurien.helmi@itny.ac.id>

Yth.Bapak Hurein Helmi

Catatan sudah kami terima.terima kasih.

[Kutipan teks disembunyikan]

Identifikasi Sesar Aktif di Pulau Bali dengan Menggunakan Data Pemetaan Geologi Permukaan dan Morfologi Tektonik

Hurien Helmi^{1*}, Gayatri Indah Marliyani^{1,2} dan Siti Nur'aini^{1,2}

¹Prodi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

²Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Korespondet Email: hurien.helmi@itny.ac.id

Direvisi: 2020-12-23. Diterima: 2021-02-10
©2021 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak. Pulau Bali dan sekitarnya berada dekat dengan zona subduksi sehingga rawan terhadap bencana gempa bumi. Struktur utama yang menyebabkan gempa bumi di Bali umumnya berada di zona subduksi di bagian selatan dan di zona sesar naik belakang busur di utara yang dikenal dengan sesar naik Flores. Selain potensi gempa dari kedua zona sesar ini, gempa yang berasal dari zona sesar di darat juga bisa menimbulkan bahaya yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan sesar aktif di darat dengan menggunakan kombinasi antara metode penginderaan jauh dengan survey lapangan. Data yang digunakan sebagai peta dasar adalah data digital elevation (DEM) model DEMNAS beresolusi 8 m serta data DEM beresolusi 0.5 m yang dihasilkan melalui proses fotogrametri dari foto udara. Analisis kelurusan menunjukkan adanya pola berarah baratlaut-tenggara dan timulaut-baratdaya. Validasi di lapangan menunjukkan bahwa kelurusan ini berasosiasi dengan keberadaan sesar-sesar geser, sesar *oblique* dan sesar turun. Sesar-sesar ini memotong batuan berumur Kuartar hingga endapan masa kini. Selain itu, data sebaran seismisitas menunjukkan adanya zona kegempaan dangkal yang berada pada area di sekitar kelurusan yang dipetakan. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif. Hasil dari penelitian ini memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

Kata kunci: gempa bumi, sesar aktif, Bali, tektonika aktif.

Abstract. Bali and its surrounding region are located within proximity of the Sunda-Banda subduction zone making it prone to earthquake hazards. The structures that caused earthquakes in Bali are mainly from the front subduction faults and from the back-arc thrust fault known as the Flores Fault. In addition, earthquakes are frequently occur in the inland fault system. This study aims to map the inland active faults in Bali using a combination of remotely-based and field-mapping methods. We use the 8-m resolution digital elevation model (DEM) of DEMNAS and the 0.5 m resolution DEM from photogrammetry processing of aerial photo as our base maps. Our lineament analysis identifies northwest-southeast and northeast-southwest lineaments. Our field observation confirms these lineaments to be associated with strike-slip, oblique and normal faults. These faults dissect Quaternary to recent rock units. In addition, seismicity data indicate the occurrence of shallow earthquakes in the vicinity of these structures. All of these indicate that these structures are active. Results from this study provide a new understanding of the inland active fault geometry in Bali, useful in the seismic hazard analysis and may contribute to the earthquake mitigation efforts in Bali.

PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia yang berada pada zona pertemuan empat lempeng tektonik yaitu Indo-Australia, Eurasia, Pasifik dan Filipina mengakibatkan kompleksnya tatanan tektonik di wilayah ini (Wilson, 1966; Hamilton, 1979). Salah satu fitur tektonik yang dominan adalah subduksi Sunda di mana lempeng samudera Indo-Australia menunjam di bawah lempeng benua Eurasia. Subduksi Sunda ini memanjang dari lepas pantai Sumatra, selatan Jawa dan Bali, dan menerus hingga di selatan kepulauan Nusa Tenggara. Zona subduksi Sunda ini kemudian berubah menjadi kolisi di sekitar selatan kepulauan Timor. Zona kolisi di Timor ini terus menerus hingga mencapai Pulau Seram (Hamilton, 1988; van der Werff, 1996) (Gambar 1).

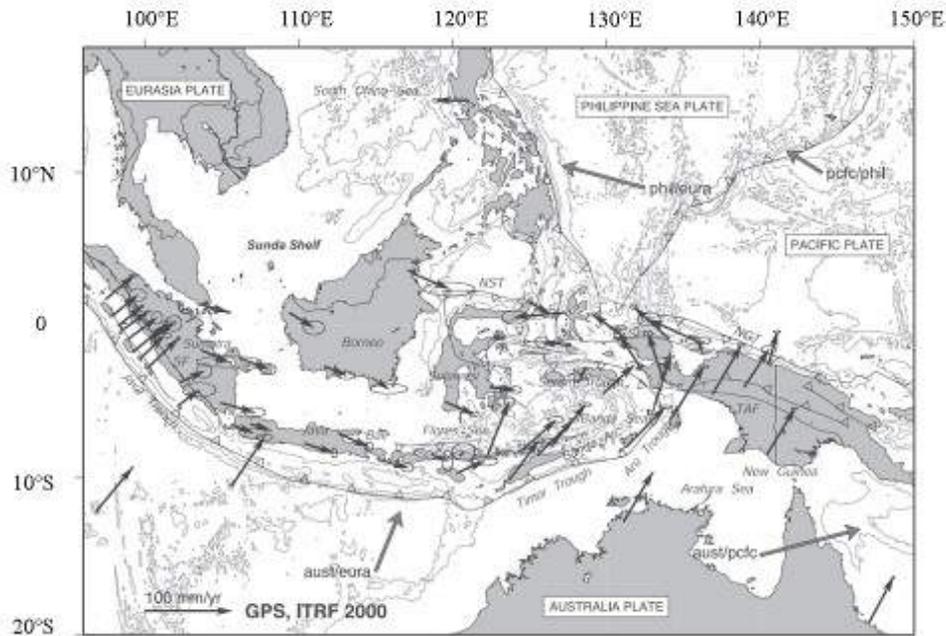
Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga

penelitian mengenai sumber-sumber gempa bumi di wilayah ini diperlukan untuk membantu mengurangi risiko bencana gempa bumi. Salah satu area yang menarik untuk diteliti adalah Pulau Bali. Pulau Bali merupakan pulau tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan sepanjang tahun. Rekaman seismisitas di sekitar pulau Bali menunjukkan tingginya angka kegempaan di wilayah ini (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>; Gambar 2), akan tetapi pemetaan sesar aktif di wilayah ini belum banyak dilakukan. Walaupun dominan kejadian gempa bumi terjadi pada zona subduksi, banyak juga terjadi gempa bumi yang dilihat dari lokasi dan kedalamannya mengindikasikan sumber gempa berada di darat. Meskipun frekuensi kegempaan di Bali relatif lebih rendah dibandingkan dengan daerah Jawa dan Sumatra, keberadaan Bali sebagai daerah tujuan wisata yang ramai dikunjungi oleh wisatawan domestik dan

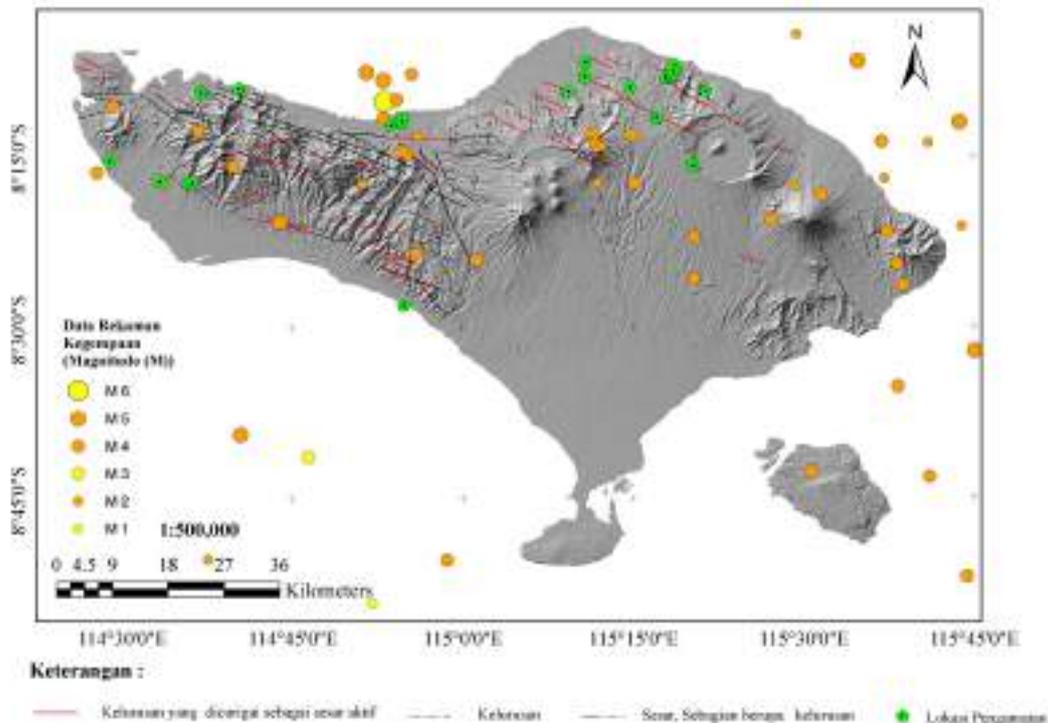
mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.

Kejadian gempa di daratan pulau Bali selama sepuluh tahun terakhir memiliki kisaran hiposenter gempa yang relatif dangkal (<60 km) hingga menengah (60-300 km) dengan magnitudo < M7. Frekuensi kejadian gempa yang cukup tinggi selama rentang waktu tersebut memperlihatkan bahwa wilayah ini aktif mengalami deformasi. Sumber gempa bumi di wilayah ini telah dipetakan oleh beberapa peneliti (Koulali,

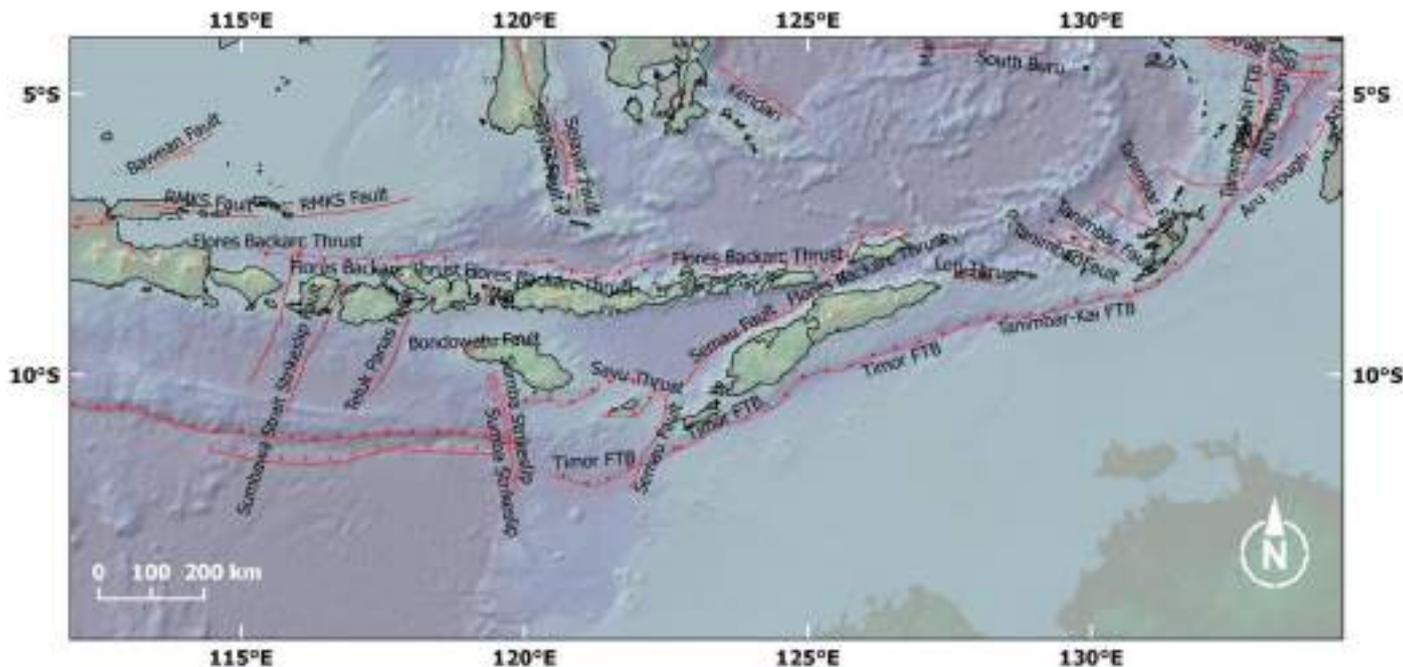
dkk 2016; Susilo,dkk,2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar naik Bali-Flores yang berada di lepas pantai sebelah utara pulau Bali. Keberadaan sesar aktif di darat sebagai struktur yang ditengarai menjadi penyebab terjadinya gempa dangkal di darat belum dipetakan dengan baik (Gambar 3).



Gambar 1. Peta tatanan tektonik wilayah Kepulauan Indonesia (Bock dkk., 2003)



Gambar 2. Peta menunjukkan sebaran rekaman kegempaan Pulau Bali pada rentang tahun 1963-2020 (Katalog USGS, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) dan hasil analisis kelurusan Pulau Bali yang teridentifikasi sebanyak 31 kelurusan yang dicurigai sebagai jalur sesar aktif. Orientasi kelurusan didominasi oleh kelurusan yang berarah relatif BL-TG dan sebagian kecil berarah Timur Laut –Baratdaya (BD-TL)



Gambar 3. Sebaran Sesar Aktif Daerah Bali-Nusa Tenggara-Banda dalam rangkuman Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Na-

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan sesar aktif di Pulau Bali dengan metode pemetaan geologi permukaan dan geomorfologi tektonik. Pemetaan dilakukan dengan metode penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan survey lapangan. Data penginderaan jauh yang kami gunakan berupa data digital elevation model (DEM) beresolusi 8-m dari DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan juga data DEM beresolusi 4,5 m yang kami buat melalui pemrosesan fotogrametri pada foto udara yang diambil dengan menggunakan unmanned aerial vehicle (UAV). Selain dari aktifitas kegempaan, sesar aktif bisa dikenali dengan adanya deformasi yang terjadi pada batuan dan endapan berumur Kuartar sehingga pemetaan geologi yang kami lakukan difokuskan pada satuan batuan tersebut. Tidak semua sesar berpotensi menghasilkan gempa bumi, asosiasi antara keberadaan sesar dengan sebaran kegempaan bisa dijadikan petunjuk bahwa sesar tersebut aktif. Jenis sesar bisa diketahui dengan menganalisis bentukan morfologi dan geometri sesar yang dikenali di lapangan. Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran lokasi dan geometri sesar aktif di Pulau Bali yang dapat dijadikan acuan untuk penelitian lebih lanjut. Penelitian ini akan berkontribusi terhadap proses pembaruan data-data sesar aktif di Indonesia (Gambar 3.)

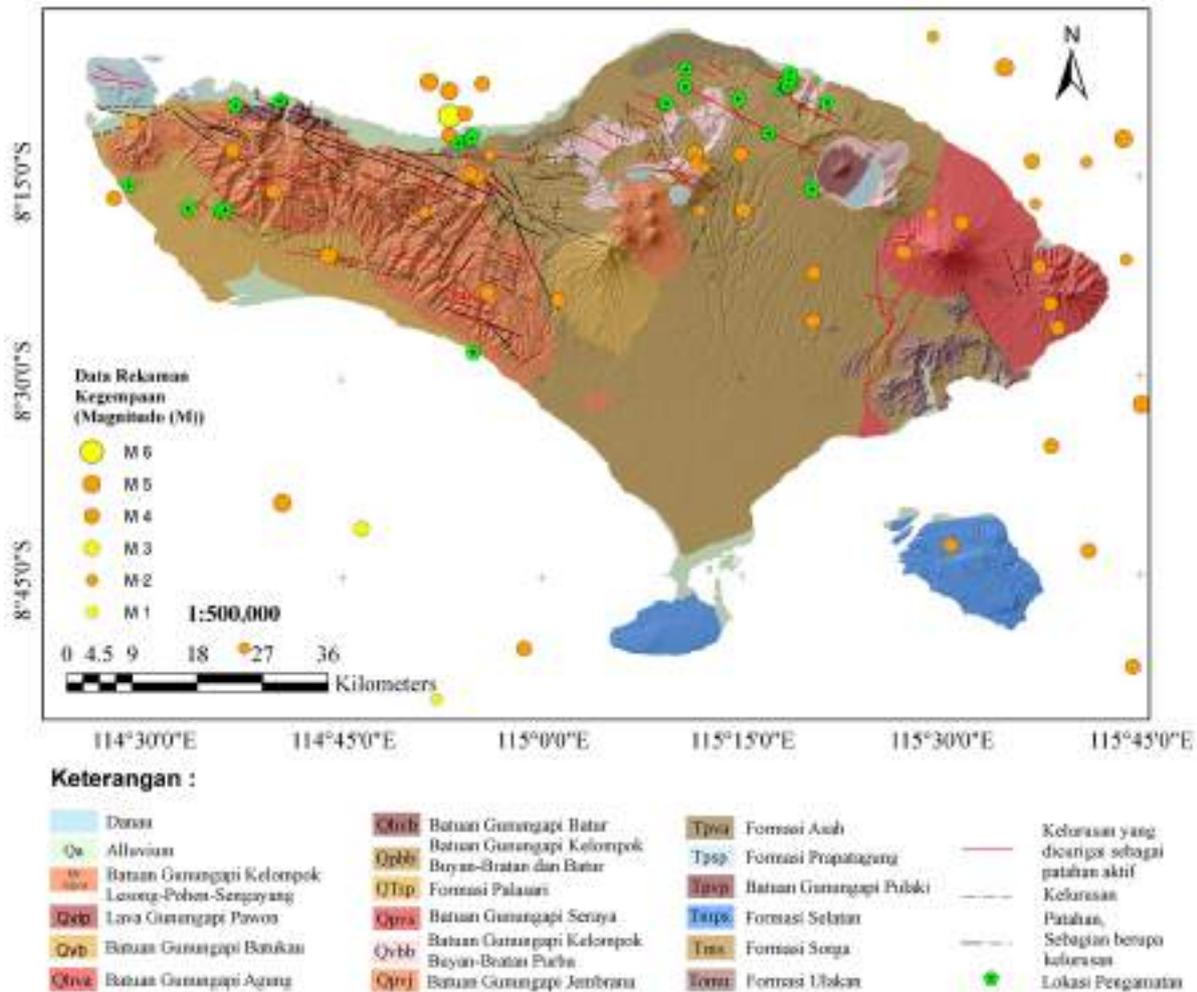
Tatanan Geologi Regional Pulau Bali

Pulau Bali, Sumbawa, dan Nusa Tenggara merupakan bagian dari rangkaian busur kepulauan yang sering dikenal sebagai Sunda kecil. Busur kepulauan ini terbentuk oleh proses subduksi di lepas pantai selatan Pulau Bali. Di zona subduksi ini, Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan pergerakan ± 70 mm per tahun (DeMets dkk., 1994). Tumbukan dua lempeng utama ini yang berpengaruh terhadap orientasi dan sebaran struktur geologi Pulau Bali dan area di sekitarnya. Struktur utama yang terbentuk berupa sesar-sesar naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal di darat dengan skala yang kecil (Daryono, 2011). Selain itu, di belakang busur kepulauan juga terbentuk

struktur sesar naik (*back arc thrust*) yang terdeteksi berdasarkan survey geofisika (McCaffrey & Nabelek, 1987). Keberadaan sesar naik di belakang busur ini diperkuat oleh Yasid (1999) yang melakukan studi tomografi dan Yadnya dkk. (2012) yang melakukan relokasi data seismisitas yang ditangkap oleh jaringan seismik lokal. Studi yang dilakukan oleh Yadnya, dkk (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai utara Bali yang merupakan perpanjangan Sesar Naik Flores di bagian timur. Studi identifikasi keberadaan sesar naik ini juga pernah dilakukan dengan menggunakan data sebaran seismisitas gempa dangkal di wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994). Hasil analisis oleh Masturyono (1994), menunjukkan bahwa keberadaan sesar naik tersebut diindikasikan oleh tingginya aktivitas kegempaan lokal dan dangkal di wilayah tersebut. Batuan yang tersingkap di Bali didominasi oleh batuan gunungapi berumur Kuartar yang terdiri atas lava, breksi vulkanik, pumis, lapili, tuf dan lahar yang bersumber dari berbagai sumber gunung api kuartar dan di beberapa daerah tersingkap batuan sedimen yang tersusun atas batugamping, napal, batupasir, batugamping terumbu dan batupasir gampingan yang berumur Oligosen-Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998). Struktur yang berkembang dan mendominasi di Pulau Bali berorientasi Barat-laut-Tenggara (BL-TG) yang sebagian besar sesar yang berkembang berada di bagian barat Pulau Bali (Gambar 4) (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998).

METODE PENELITIAN

Parameter sesar aktif yang perlu diketahui dalam analisis bahaya seismik meliputi geometri, sejarah gempa bumi, laju pergerakan, dan perulangan gempa (McCalpin, 2009). Pemetaan merupakan tahap awal dalam rangkaian studi sesar aktif yang diteliti. Untuk mengetahui sejarah, laju dan pergerakan dan perulangan gempa perlu dilakukan studi paleoseismologi yang bertujuan untuk mengetahui lokasi, waktu kejadian dan estimasi magnitudo gempa yang terjadi di masa lampau (Wallace, 1981; Daryono, 2016).



Gambar 4. Peta Geologi Regional Pulau Bali (modifikasi dari Purbo-Hadiwidjojo, dkk.,1998)

Penelusuran sesar aktif di suatu wilayah dapat dilakukan dengan pengamatan pada topografi berupa pergeseran sistematis komponen-komponen geomorfik, adanya deformasi pada batuan muda serta hadirnya gawir-gawir dan bidang sesar yang masih jelas terlihat (Marliyani, 2016). Studi sesar aktif dalam penelitian ini diawali dengan melakukan pemetaan geologi permukaan untuk mengetahui struktur geologi dan sebaran litologi Kuartar serta mengenali objek-objek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif (Gambar 4 dan Gambar 2) pada data penginderaan jauh dan dilanjutkan dengan tahap pemetaan langsung di lapangan. Selanjutnya hasil pemetaan ini dikorelasikan dengan pengamatan data kegempaan untuk melihat asosiasi kegempaan dengan sebaran struktur yang dipetakan.

Tahap pemetaan berbasis penginderaan jauh dilakukan dengan menggunakan data model elevasi digital (DEM) beresolusi spasial ~ 8 m yang diperoleh secara gratis dari DEMNAS melalui website <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>. Selain itu, Peta Geologi Regional lembar Bali, Nusatenggara dengan skala 1:250.000 (Purbo-Hadiwidjojo dkk., 1998) juga digunakan sebagai acuan data untuk penentuan umur batuan. Aspek-aspek morfologi yang berasosiasi dengan sesar aktif, bisa dikenali melalui data DEM dan turunannya (*hillshade*, *slope map*, *drainage pattern*) seperti contohnya perubahan kelerengan topografi secara tiba-tiba (*significant topographic break*) yang membentuk kelurusan

(*lineament*) (Hady & Marliyani, 2020). *Lineament* ini bisa dikenali dari adanya kelurusan sungai, lembah, punggung, dan muka bukit (Marliyani, 2016; Hady & Marliyani, 2020).

Setelah pola kelurusan diketahui dan dipetakan, tahap berikutnya yaitu melakukan pengecekan ke lapangan. Pada tahapan ini, semua aspek yang berkaitan dengan bukti-bukti adanya sesar aktif seperti data kinematika pada bidang sesar (*strike*, *dip*, *pitch*, *rake*) dan pergerakan relatif dari sesar tersebut direkam dan dipetakan sebarannya secara spasial. Hubungan struktur geologi ini dengan stratigrafi juga diselidiki, prioritas diberikan pada sesar yang memotong batuan berumur Kuartar. Data pengukuran struktur di lapangan digunakan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur sesar aktif yang terindikasi dalam peta kelurusan. Data sebaran kegempaan, yang diperoleh dari katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan dengan kegempaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegempaan memberikan indikasi bahwa sesar tersebut aktif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kelurusan

Secara umum, deliniasi kelurusan di daerah penelitian didominasi oleh pola kelurusan yang berarah baratlaut-tenggara (BL-TG), baratbaratlaut – timurtenggara (BBL-TTG) dan pola kelurusan minor yang berarah baratbaratdaya

-utara – timurlaut (BBD-UTL) (Gambar 2). Pola kelurusan yang berarah BL-TG (N 300° E) tersebar di bagian utara dari kompleks Gunung Bratan dan timurlaut Gunung Batur. Semua pola kelurusan ini melewati setidaknya satu unit batuan gunungapi. Sebagian besar pola kelurusan melewati unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb). Beberapa diantaranya, yaitu yang berarah BL-TG memotong unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan unit batuan Gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Purba (Qvbb). Pola kelurusan yang berarah BBD-TTG melintasi setidaknya tiga unit batuan yaitu unit Qpbb, Qvbb dan Unit Batuan Gunungapi Kelompok Lesong-Pohen Sengayang. (Qv (l.p.s)). Di bagian barat pulau Bali, orientasi pola kelurusan yang berarah BBD-TTG umumnya melintasi unit batuan gunungapi Jembrana (Qpvj), beberapa diantaranya melewati Formasi Palasari (QTsp), unit QTsp dan Qpbb, Formasi Prapat Agung (QTpsp). Selain itu, terdapat juga kelurusan yang berarah BBD-UTL yang memotong tiga unit satuan batuan Qpbb, Formasi Asah (Tpva) dan Qvpj. Panjang dari masing-masing trend kelurusan tersebut yang bervariasi. Pola kelurusan BL-TG memiliki dimensi panjang $\pm 2,5$ km - 20 km, pola kelurusan BBD-TTG berkisar antara ± 2 km - 14 km, sedangkan pola kelurusan

berarah BBD-UT memiliki panjang ± 8 km - 12 km (Gambar 4).

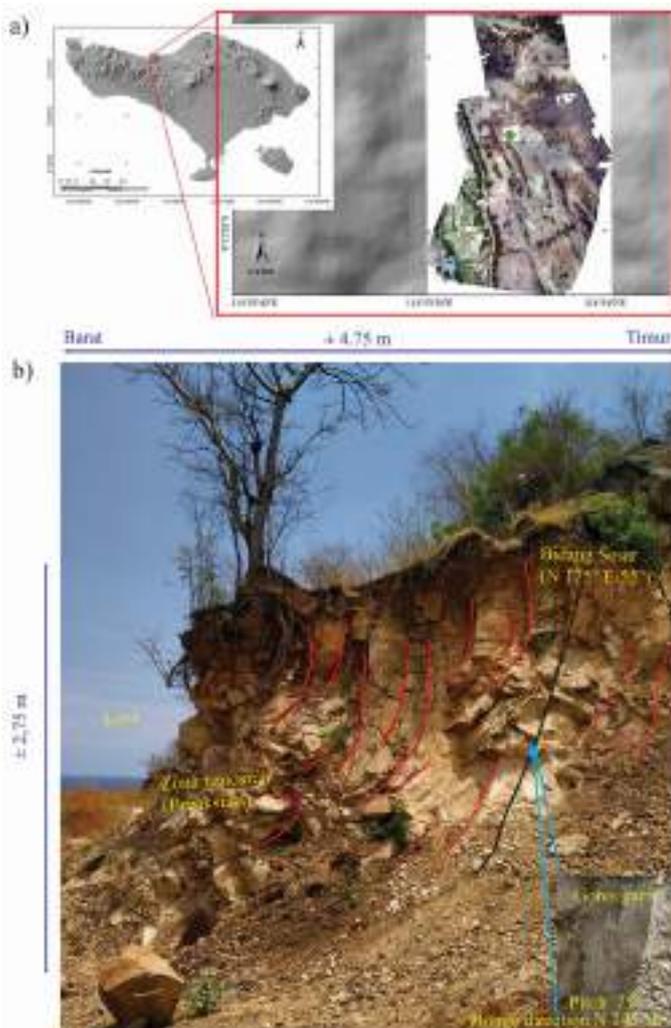
Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

Hasil pengamatan lapangan menunjukkan adanya bukti-bukti sesar yang terekam pada batuan yang umumnya berupa batuan vulkanik dan vulkaniklastik. Indikasi bukti adanya sesar di lapangan antara lain keberadaan bidang sesar yang berasosiasi dengan zona hancuran (breksiasi), kekar yang intensif, dan pergeseran lapisan batuan. Singkapan sesar di lapangan tidak mudah ditemui. Pengecekan sesar di lapangan mengacu pada petunjuk peta kelurusan, kemudian setiap delineasi kelurusan kami ditelusuri di lapangan untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur geologi yang berasosiasi dengan kelurusan tersebut. Sebaran lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada beberapa lokasi pengamatan menunjukkan adanya singkapan batuan yang tersesarkan. Sesar-sesar ini umumnya ditemukan memotong endapan batuan gunungapi Pulaki (Tpv), Formasi Asah (Tpva) dan endapan batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) dan berarah N 280°E - N 320° E . Umumnya, zona sesar yang diamati di lapangan mencerminkan jenis sesar normal yang diindikasikan oleh adanya pergeseran lapisan batuan di sepanjang zona bidang sesar yang menunjukkan kinematika sesar turun. Pergeseran yang teramati berkisar antara 7 cm sampai 55cm.

Batuan atau sedimen yang terpotong oleh suatu sesar memberikan indikasi waktu relatif waktu terjadinya. Sesar yang teridentifikasi di daerah penelitian memotong per-lapisan batuan dengan umur bervariasi dan seringkali menerus hingga ke permukaan, mencerminkan bahwa pensesaran terjadi hingga masa kini. Umur batuan yang terpotong oleh sesar-sesar yang teridentifikasi berdasarkan peta Geologi Bali lembar 1707 dan 1807, berumur *Pliocene* hingga *recent*. Berdasarkan definisi, suatu sesar dikatakan aktif apabila sesar tersebut memotong batuan berumur Kuartar atau sesar tersebut bergerak sepanjang Zaman Kuartar. Merunut pada definisi sesar aktif ini, pola kelurusan yang terkonfirmasi di lapangan dapat dikategorikan sebagai sesar aktif (Boschi, 1996; Machette, 2000; IAEA, 2010).

Penelusuran terhadap pola kelurusan yang berada di sekitar Desa Umeanyar, Kecamatan Seririt, Kabupaten Buleleng terbantu dengan adanya pemotongan bukit untuk kepentingan penambangan batu di kawasan tersebut lihat gambar 5a. Kompleks penambangan ini menyingkap unit batuan kelompok Formasi Asah (Tpva) yang terdiri atas lava, breksi gunungapi dan tuf batuapung yang bersisipan dengan batuan sedimen gampingan berumur Pliosen (Purbo-Hadiwidjojo, dkk., 1998). Pada satu lokasi di sekitar 500 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk (Gambar 5b), dijumpai unit batuan segar berupa lava pejal pada dinding tebing berdimensi $\pm 2,75 \times 7,5$ m. Unit lava ini mengalami deformasi intensif menghasilkan fragmen-fragmen batuan yang hancur (terbreksiasikan) dengan pola hancuran yang teratur dibatasi oleh kekar-kekar yang bersifat ekstensional (membuka). Sebagian breksiasi membentuk blok-blok yang simetris di mana semakin ke bagian bawah terlihat butiran fragmen cenderung semakin kasar. Teramati juga bahwa di bagian bawah, fragmen-fragmen ini membentuk pola yang melengkung ke bawah yang mencerminkan adanya *drag fold* (Gambar 5b). Orientasi pelengkungan ini berarah relatif UTL-SBD (N 17° E/55°). Kami menginterpretasikan adanya sesar di sepanjang batas bidang pelengkungan di bagian bawah, hal ini



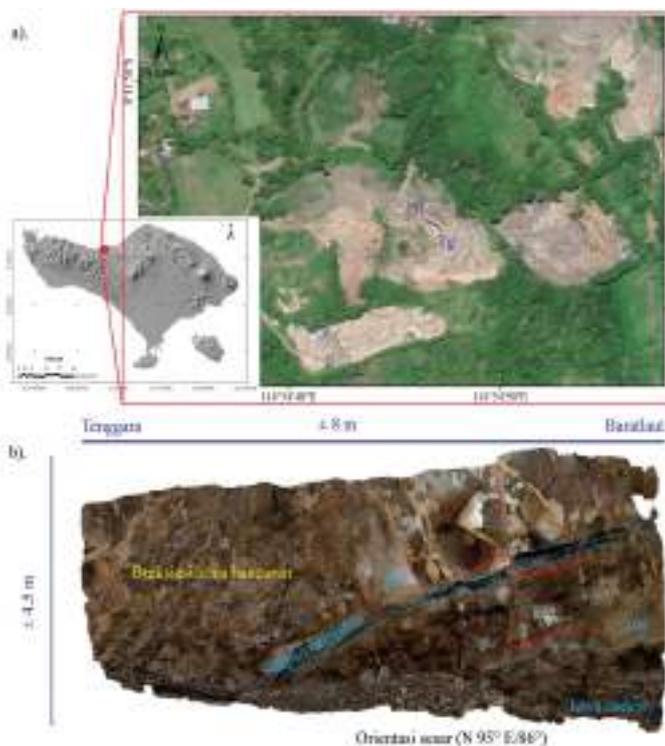
Gambar 5. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a) Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)

dibuktikan dengan hadirnya gores garis dengan orientasi N 245°E dengan pitch 75° dengan jenis sesar normal dengan blok bagian barat—baradaya bergerak turun relatif terhadap blok bagian timur-timurlaut (Gambar 5b).

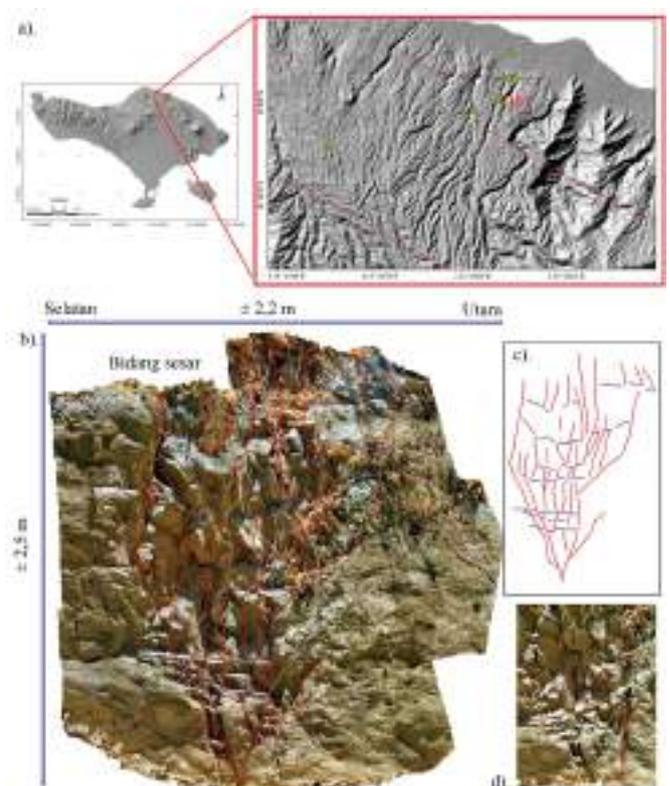
Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava yang tersingkap pada singkapan berdimensi ± 4,5 x 8 m (Gambar 6a). Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuf menunjukkan orientasi N195°E/25°W. Kenampakan fisik di lapangan menunjukkan bahwa unit lava masih segar dan berstruktur lembaran (*sheeting joint*). Di atasnya secara berurutan dijumpai unit tuf yang terkekarkan, lapili dan unit tuf tebal yang terbreksiasikan. Adanya sesar diindikasikan oleh ketidakmenerusan lapisan tuf dan lapilli ini (Gambar 7b). Orientasi bidang sesar tersebut berarah N 95°E/86° dengan pergeseran antar bidang perlapisan berkisar antara ± 10 – 17 cm. Orientasi pergeseran bidang perlapisan batuan menunjukkan offset vertikal, berdasarkan dip sesar yang tinggi dan karakteristik *shearing* yang diamati pada bidang sesar, dapat diinterpretasikan bahwa sesar yang diamati didominasi oleh pergerakan mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (Gambar 6b). - Di sekitar lokasi ini juga dijumpai zona breksiasi yang menunjukkan pola tidak teratur, rapat dan sebaran fragmen yang acak. Zona sesar ini berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 11). Data katalog kegempaan tahun 1963-2020 (katalog USGS) menunjukkan asosiasi gempa dangkal dengan kelurusan di daerah sekitar ini (Gambar 2). Meskipun struktur geologi yang diamati di daerah ini mengenai batuan berumur Tersier Akhir (Pliosen) akan tetapi ke-

lurusan yang diamati menerus ke timur hingga melewati unit batuan berumur Kuarter. Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di lokasi ini termasuk dalam kategori aktif.

Di sekitar Desa Bondalem, sekitar 250 meter ke arah Baratlaut dari Pura Alang Tengah, Desa Bondalem, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng ditemukan adanya zona sesar yang berasosiasi dengan kelurusan berarah BL-TG (Gambar 7a). Zona sesar ini memotong satuan batuan lava segar bagian dari Formasi Qvbb yang tersingkap pada tebing sungai dengan ketinggian ± 20 m. Pada lokasi ini, bagian atas dari singkapan tertimbun oleh tanaman belukar sehingga batas atas dari bidang sesar tidak terlihat dengan jelas. Batuan lava terbreksiasi dengan orientasi kekar berarah N295°E dan N175°E (Gambar 7b). Zona breksiasi yang diamati menunjukkan geometri bunga mekar mini (*mini flower structure*) dengan tinggi > 2,5 m di sepanjang zona hancuran selebar ± 1,5 m (Gambar 7c dan 7d). Orientasi sesar relatif berarah N305°E. Karakteristik zona hancuran dicirikan oleh pola bidang rekahan tidak teratur, tidak rata dan rekahan bersifat terbuka. Struktur *flower structure* ini diinterpretasikan sebagai bagian ujung dari struktur sesar geser. Zona sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan utama yang berarah BL-TG (Gambar 8b). Pada data katalog gempa USGS tahun 1963-2020, di sekitar lokasi ini terdapat kejadian gempa yang berada pada kedalaman ≤ 60 km dengan skala $M \leq 4$ (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.



Gambar 6. Menunjukkan lokasi singkapan batuan yang tersingkap oleh aktivitas penambangan batu (a). Terdapat sesar pada singkapan batuan tuf yang menunjukkan offset vertikal pada bidang perlapisan, dip sesar yang tinggi dan adanya karakteristik *shearing* pada bidang sesar dapat menunjukkan dominasi pergerakan sesar mendatar dengan sedikit komponen turun (sesar *oblique*) (b).



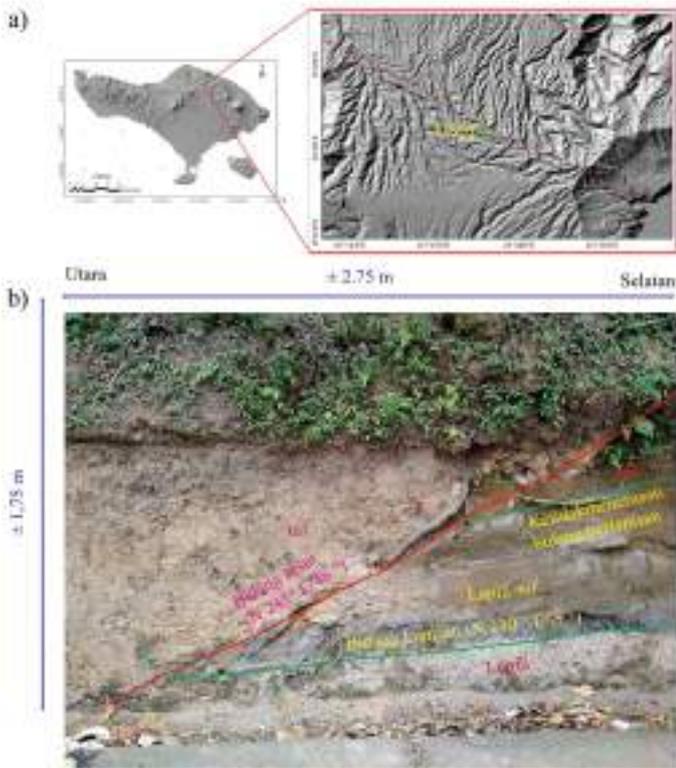
Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)

Di sekitar desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai adanya deformasi batuan pada unit batuan lapilli dan lapilli tuf yang tersingkap di tepi Jalan Raya Gunung Batur. Singkapan memiliki dimensi tinggi ± 1,75 m dan panjang ± 2,75-- m. Susunan litologi dari bawah ke atas secara berurutan terdiri atas lapili dan tuf segar yang termasuk unit batuan gunungapi Kelompok Buyan-Bratan Batur (Qpbb) berumur Kuarter. Secara umum, bidang kedudukan lapisan batuan pada unit ini berarah N240°E/5°. Terlihat adanya ketidakkemenerusan bidang perlapisan batuan dibatasi oleh bidang sesar berarah barat-baratdaya (N245° E/46°) dengan jenis sesar normal (Gambar 8b). Zona sesar ini berasosiasi dengan pola kelurusan berarah BL-TG (Gambar 8b). Data seismitas tahun 2009-2018 menunjukkan di daerah ini terdapat adanya zona kegempaan dengan kedalaman kurang dari 60 km (Gambar 2) (katalog USGS). Asosiasi antara adanya aktifitas seismik dengan zona sesar yang menegenai batuan berumur Kuarter mengindikasikan bahwa zona sesar ini bisa dikategorikan sebagai sesar aktif.

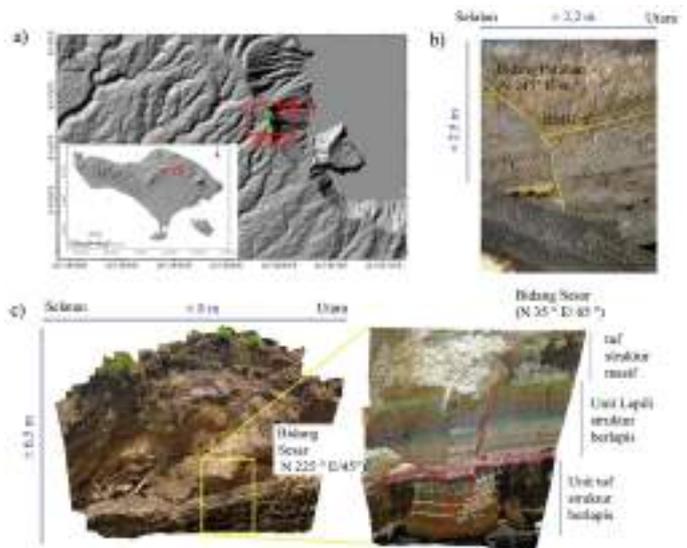
Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli (Gambar 9a). Batuan di lokasi ini tersingkap

berkat adanya proses ekskavasi yang membuka tebing dengan orientasi utara-selatan dalam rangka pembangunan kawasan wisata di tempat tersebut. Di lokasi ini ditemukan adanya ketidakkemenerusan bidang kedudukan lapisan batuan. Kami melakukan pengamatan di dua lokasi pengamatan di sepanjang singkapan ini. Pada lokasi pengamatan pertama (BS01, Gambar 10c) terdapat bidang sesar berarah N35°E/65° dan N 225° E/45°. Batuan yang tersesarkan terdiri atas perulangan tuf dan lapili di bagian bawah dan lapili di bagian atas dengan bidang perlapisan berarah N165°E/10°. Bidang sesar yang terbentuk membentuk struktur graben berskala kecil. Besaran pergeseran yang diukur dari bidang perlapisan menunjukkan kisaran 7– 18 cm (Tabel 1). Pada lokasi pengamatan kedua (BS02, Gambar 10b), lapisan batuan tersusun atas lapili dan tuf serta dibagian atas ditumpangi oleh lapukan tuf, memiliki bidang perlapisan N152°E/25° tersesarkan oleh sesar turun berarah N245°E/46° (Gambar 10b). Kedua lokasi pengamatan ini juga berasosiasi dengan zona seismitas dangkal (Gambar 2) (katalog USGS). Adanya asosiasi kegempaan serta melihat umur batuan yang terdeformasi yang berumur Kuarter, bisa dikategorikan bahwa zona sesar di daerah ini aktif.

Berdasarkan hasil penelitian, keberadaan zona sesar aktif di daratan pulau Bali didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur penyerta berupa sesar turun. Orientasi umum zona sesar geser dan oblique adalah berarah BL-TG sedangkan sesar turun yang dijumpai berarah TL-BD (Gambar 9b dan Gambar 10). Kisaran sudut kemiringan sesar geser dan oblique yang teridentifikasi adalah 65-85°, sedangkan kemiringan sesar turun ~40° ke arah TL. Panjang sesar bervariasi mulai ~2 km hingga ~20 km dan sesar-sesar tersebut teridentifikasi memotong batuan berumur Kuarter.



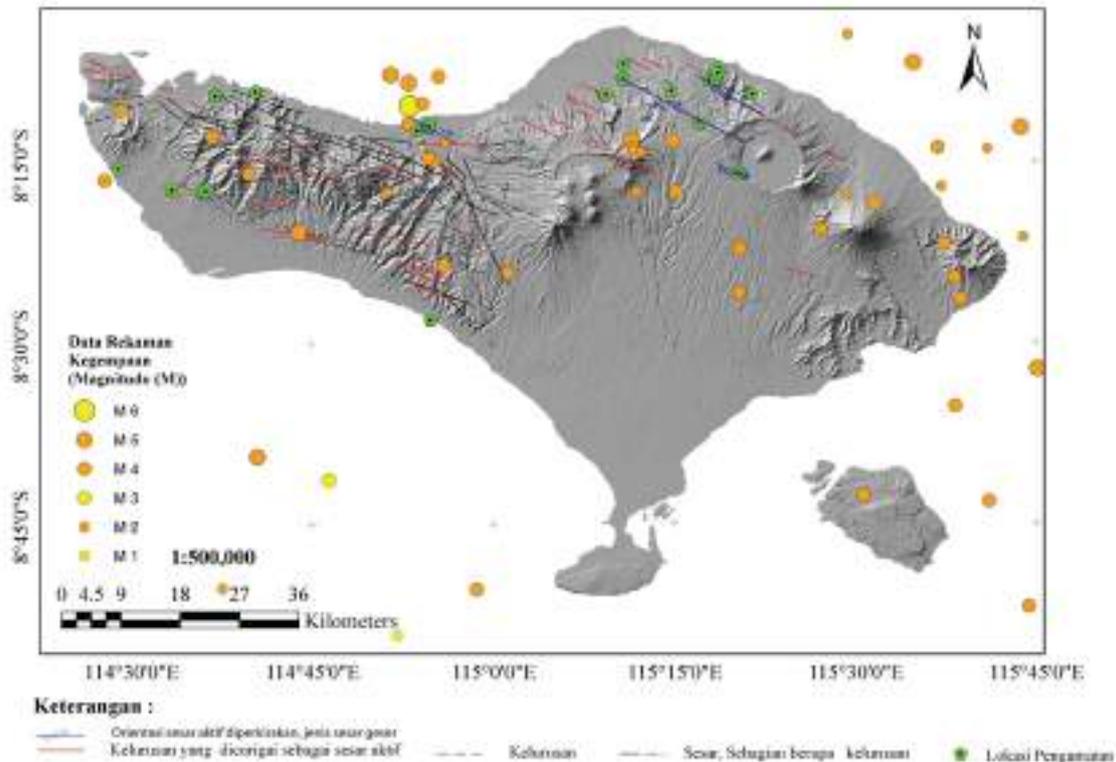
Gambar 8. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakkemenerusan pada unit tephra (b).



Gambar 9. Lokasi singkapan batuan (a), terdiri dari unit lapili yang tersesarkan menunjukkan komponen turun di dinding kaldera Gunung Batur di lokasi BS02 (b) dan unit tuf yang tersesarkan membentuk graben kecil di lokasi BS01 (c).

Tabel 1. Nilai pergeseran lapisan unit tephra yang tersesarkan

Lokasi Pengamatan	BS01										BS01
	BS01-a	BS01-b	BS01-c	BS01-d	BS01-e	BS01-e	BS01-f	BS01-g	BS01-h	BS01-i	BS02-a
Offset (cm)	7	7	10	12	12	15	15	15	18	18	55



Gambar 10. Orientasi keberadaan sesar aktif diperkirakan, jenis sesar geser ditunjukkan oleh garis berwarna biru

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa di pulau Bali terdapat beberapa zona sesar aktif di darat yang didominasi oleh sesar geser dan oblique dengan beberapa struktur minor berupa sesar turun. Arah umum dari zona sesar geser dan oblique berorientasi BL-TG sedangkan sesar turun yang dijumpai berarah TL-BD. Sesar geser dan oblique yang diidentifikasi memiliki kisaran sudut kemiringan $65-85^\circ$ sedangkan kemiringan pada sesar turun $\sim 40^\circ$ dengan kemiringan ke arah TL. Panjang dari sesar bervariasi 2-20 km. Semua sesar yang teridentifikasi memotong batuan berumur Kuartar. Analisis data kegempaan menunjukkan asosiasi sebaran gempa dangkal dengan pola kelurusan dan struktur geologi. Berdasarkan pemahaman bahwa struktur sesar dapat dikategorikan sebagai sesar aktif jika deformasi terjadi pada batuan berumur Kuartar, serta asosiasi dengan kegempaan dangkal, maka bisa diinterpretasikan bahwa sesar-sesar yang teridentifikasi adalah sesar aktif. Untuk mengetahui sejarah kegempaan di sepanjang zona-zona sesar ini, studi lebih lanjut yang meliputi studi paleoseismologi perlu dilakukan. Hasil dari penelitian ini bisa digunakan sebagai acuan untuk menentukan area prospektif untuk studi paleoseismologi. Selain itu, hasil dari penelitian ini memberikan pemahaman baru mengenai geometri sesar aktif yang ada di Pulau Bali dan potensi kegempaan di masa yang akan datang yang memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana gempa bumi di Pulau Bali.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Pendidikan Tinggi (DRPM Dikti) yang telah memberikan dukungan finansial melalui skema Penelitian Dosen Pemula tahun 2019-2020, mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Pengabdian

an Masyarakat dan Inovasi (LPPMI)-ITNY yang telah mendukung terlaksananya kegiatan penelitian, mengucapkan terima kasih kepada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu Provinsi Bali dan Dinas Penanaman Modal dan PTSP Kabupaten Buleleng atas terlaksananya kegiatan lapangan serta mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengambilan data lapangan, Hardi Febri dan Iftitah Khairul Fajari Saputra selaku asisten lapangan.

KONTRIBUSI PENULIS

Hurien Helmi berkontribusi dalam pengambilan data-lapangan, studi literatur, pengolahan data, analisis dan interpretasi, penulisan dan pengeditan manuskrip. Gayatri Indah Marlyani: analisis dan interpretasi data, pengeditan manuskrip. Siti Nur'aini: Persiapan data pra lapangan, Pengambilan data, analisis dan interpretasi data, pengeditan manuskrip.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. DEMNAS, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/DEMNAS.php>.
- Bock, Y. E. H. U. D. A., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8).
- Boschi, E. (1996). New trends in active faulting studies for seismic hazard assessment.
- Daryono, M. R. (2016). Paleoseismologi tropis Indonesia (dengan studi kasus di Sesar Sumatra, Sesar Palukoro-Matano, dan Sesar Lembang). Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung.
- Daryono. (2011). Identifikasi Sesar Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), 2191-2194.
- Hady, H.K. & Marliyani, G.I. (2020). Updated Segmentation Model of the Aceh Segment of the Sumatran Fault System in North 1 Sumatra, Indonesia, *Journal of Applied Geology*, 5(2), 84-100. <https://doi.org/10.22146/jag.56134>.
- Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (No. 1078). US Govt. Print. Off.
- Hamilton, W. B. (1988). Plate tectonics and island arcs. *Geological Society of America Bulletin*, 100(10), 1503-1527.
- IAEA, S. S. G. N. (2010). SSG-9, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., & Syafi'i, M. A. (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda arc. *Geophysical Research Letters*, 43(5), 1943-1949.
- Machette, M. N. (2000). Active, capable, and potentially active faults—a paleoseismic perspective. *Journal of Geodynamics*, 29(3-5), 387-392.
- Marliyani, G. I. (2016). Neotectonics of Java, Indonesia: Crustal deformation in the overriding plate 302 of an orthogonal subduction system. Doctoral dissertation, Arizona State University.
- Masturyono. (1994). Seismicity of The Bali Region From A Local Seismic Network: Constraints On Bali Back Arc Thrusting. Thesis Master of Science. Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- McCaffrey, R., & Nabelek, J. (1987). Earthquakes, gravity, and the origin of the Bali Basin: an example of a nascent continental fold-and-thrust belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B1), 441-460.
- McCalpin, J. P. (2009). *Paleoseismology*. McCalpin, J. P. (2012). *Paleoseismology*.
- Purbo-Hadiwidjojo, P.M.M., Samodra, H., & Amin, T.C. (1998). *Peta Geologi Lembar Bali, Nusa Tenggara, Lembar Bali 1707 dan 1807*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Edisi Kedua.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta sumber gempa dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- Susilo, S., Abidin, H. Z., Meilano, I., Prijatna, K., Sapiie, B., Wijanarto, A. B., & Efendi, J. (2016). On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System (IGRS) 2013. FIG Working Week.
- U.S. Geological Survey, *Earthquake Catalog*, diakses, 16 Agustus, 2020, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Van der Werff, W. (1996). Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(5), 331-349.
- Wallace, R. E. (1981). Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United States. *Earthquake prediction: an international review*, 4, 209-216.
- Wilson, J. T. (1966). Did the Atlantic close and then re-open?.
- Yadnya, P. K., Nugraha, A. D., & Rohadi, S. (2012). Pencitraan Struktur 3-D Vp, Vs, Rasio Vp/Vs Menggunakan Tomografi Double Difference di Wilayah Bali. *Geofisika*, 13 (1), 32-41.
- Yasid, M. (1999). *Studi Seismotektonik Pulau Bali dan Sekitarnya Berdasarkan Relokasi Hiposenter dan Solusi Bidang Sesar*. Tugas Akhir, Program Studi Geofisika, Jurusan Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.