

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).

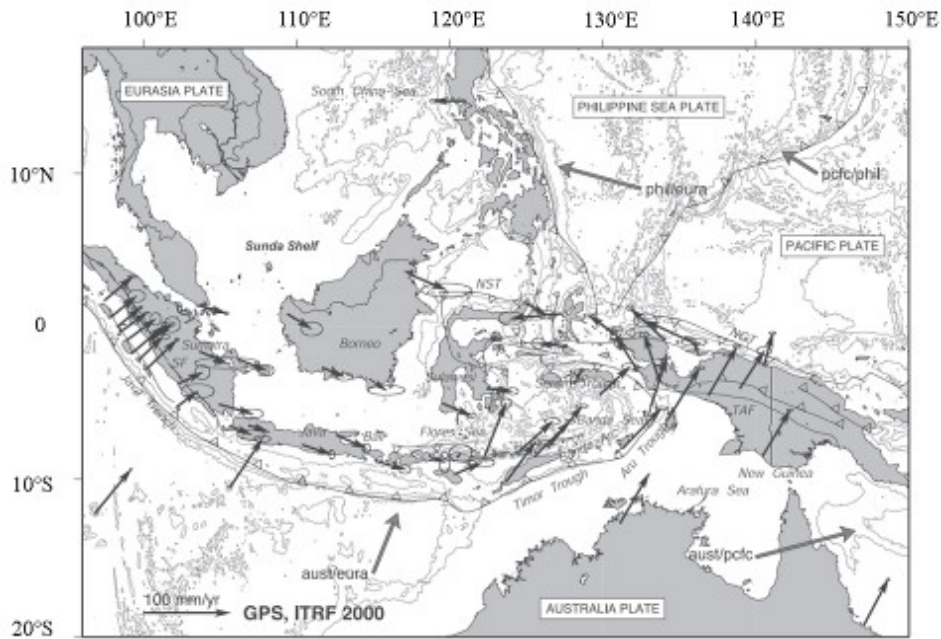
Kompleksitas tektonik yang berasosiasi dengan zona-zona tumbukan lempeng ini mengakibatkan tingginya frekuensi kejadian gempa bumi di sepanjang wilayah ini sehingga

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

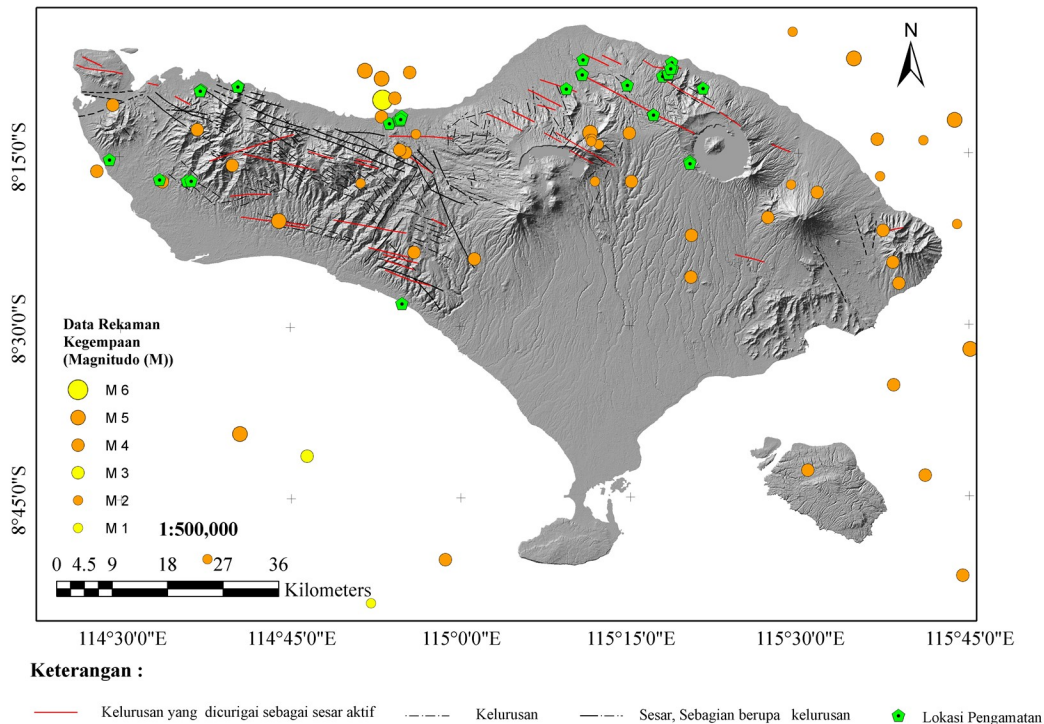
mancanegara mendorong perlu dilakukannya upaya antisipasi untuk mengurangi bencana yang timbul akibat gempa bumi di wilayah ini.

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,

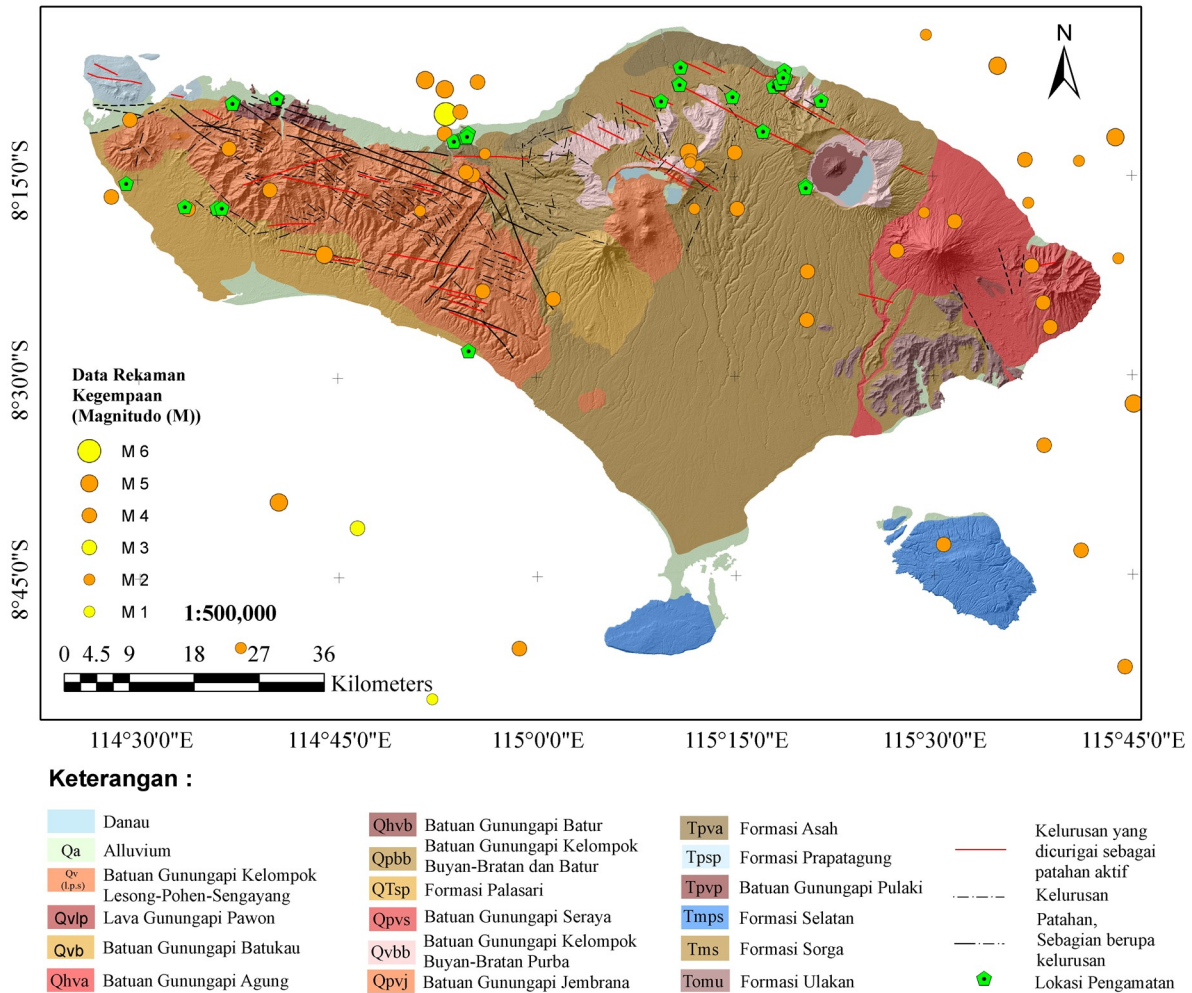
dkk 2016; Susilo,dkk,2016; Daryono, 2011) yang dirangkum dalam Peta Sumber dan Bahaya Gempa Bumi Indonesia oleh Pusgen, 2017 (Gambar 2). Dalam peta itu disebutkan adanya dua struktur utama yang menyumbang tingginya seismisitas di wilayah Bali yaitu sesar naik Bali di lepas pantai selatan Bali, dan sesar 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 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 kegerampaan untuk melihat asosiasi kegerampaan 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 kegerampaan, yang diperoleh dari katalog USGS (tahun 1963-2020) juga digunakan untuk melihat asosiasi struktur yang terpetakan dengan kegerampaan. Struktur yang berasosiasi dengan kegerampaan 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 (QTsp). 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).

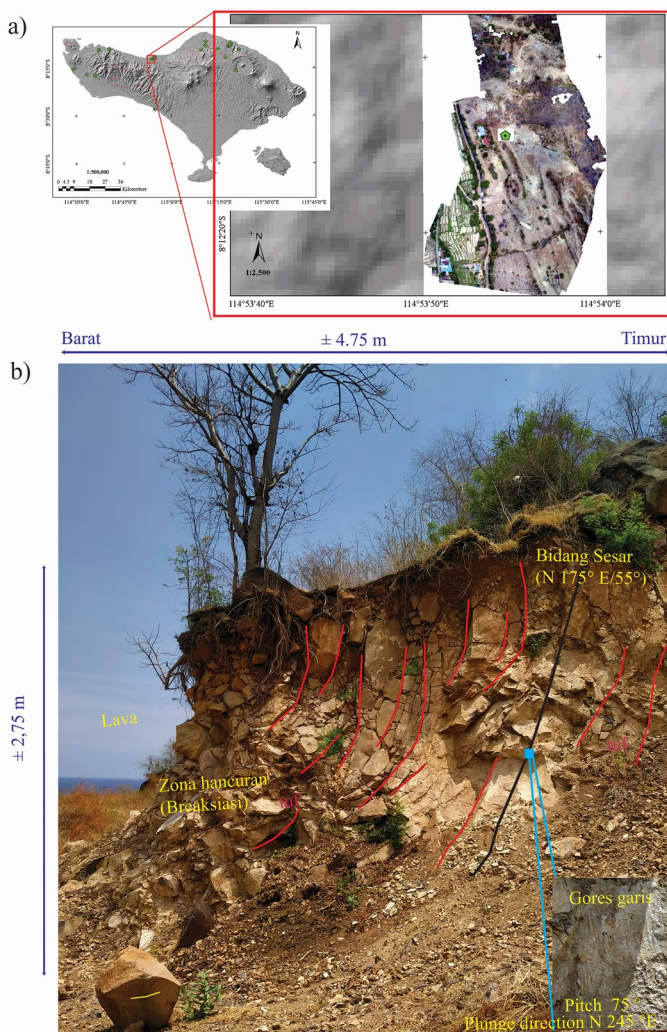
Geometri dan Indikator Kinematika Sesar

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 perlapisan 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



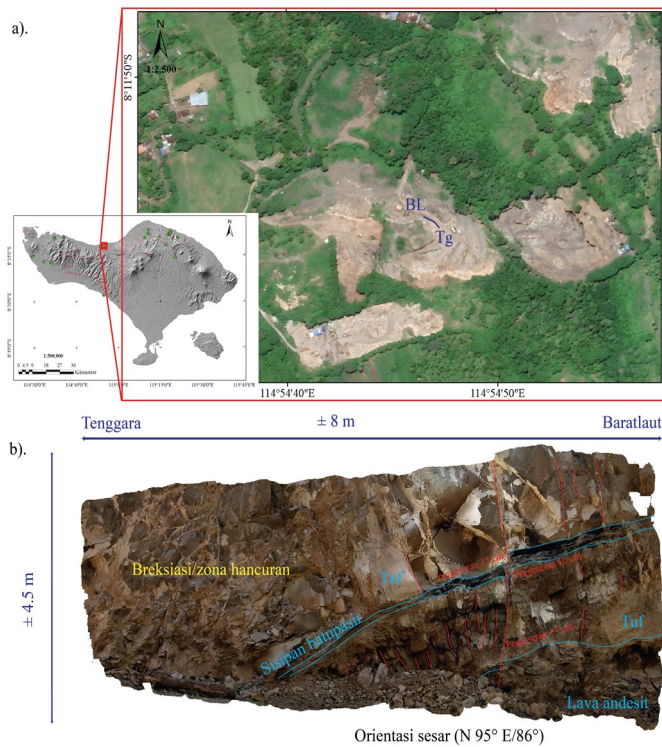
Gambar 5. Kenampakan topografi zona breksiasi dan *drag fold* berupa ortofoto yang diperoleh melalui metode fotogrametri, tanda bintang berwarna merah lokasi zona breksiasi dan *drag fold* (a) Foto singkapan unit lava dengan indikasi breksiasi dan *drag fold* (b)

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).

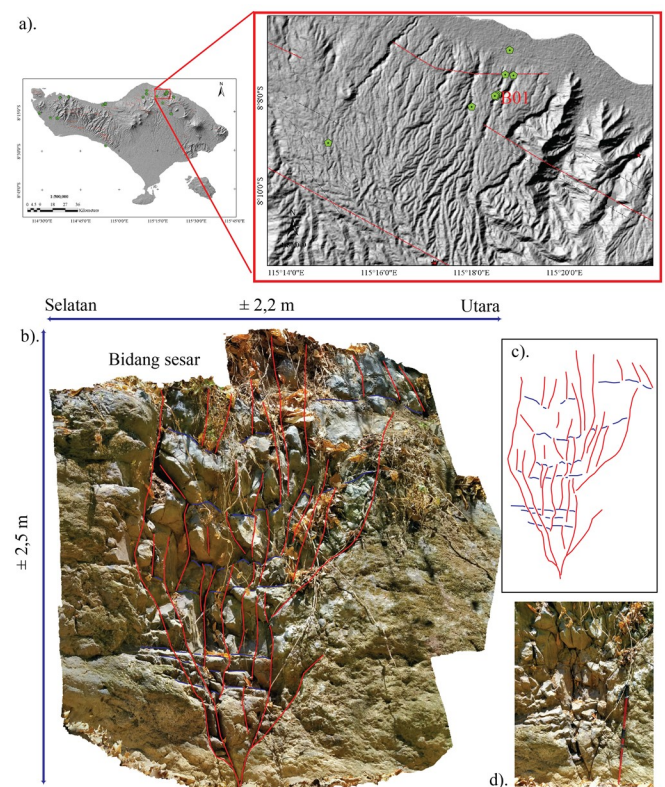
Di area yang sama, 1 km ke sebelah timur, sekitar 650 m ke selatan dari jalan utama Singaraja-Gilimanuk, dijumpai pensesaran pada lapisan lapili dan tuf yang menumpang pada unit lava yang tersingkap pada singkapan berdimensi ± 4,5 x 8 m (Gambar 6a). Kedudukan umum perlapisan lapilli dan tuff menunjukkan 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 ≤ 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).



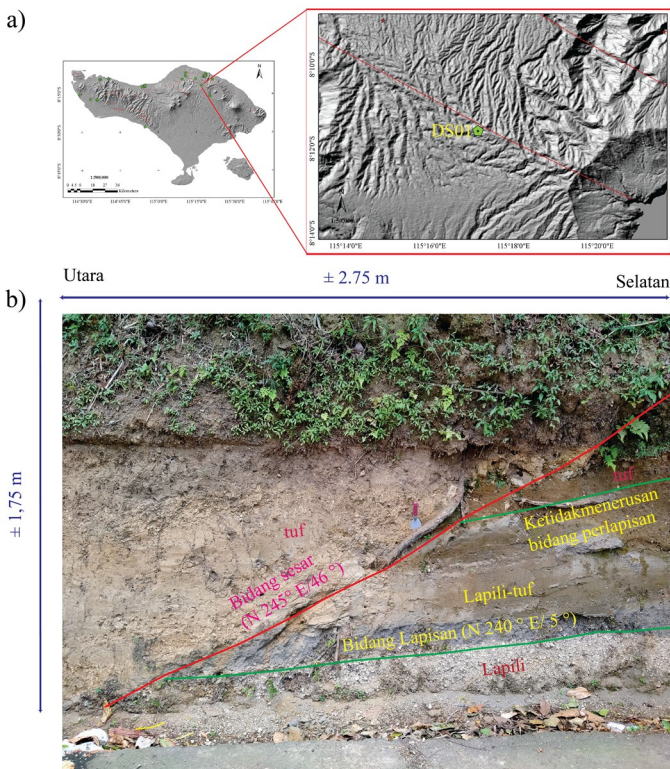
Gambar 7. Menunjukkan lokasi singkapan batuan dengan kode B01 (a) dan Zona sesar pada singkapan lava dengan geometri berbentuk bunga mekar mini (*flower structure*) yang diinterpretasi sebagai bagian paling ujung dari struktur sesar geser (b, c dan d)

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.

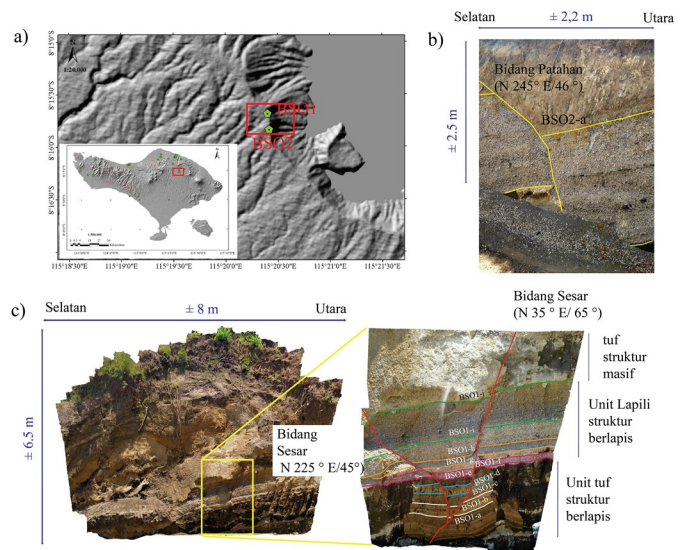
Di sekitar sisi barat kaldera Gunung Batur, sekitar 25 meter dari Jalan Raya Panelokan di Desa Batur Selatan, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli dijumpai singkapan berupa sesar turun yang memotong batuan vulkanilastik berupa tuf dan lapilli (Gambar 9a). Batuan di lokasi ini tersingkap

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.



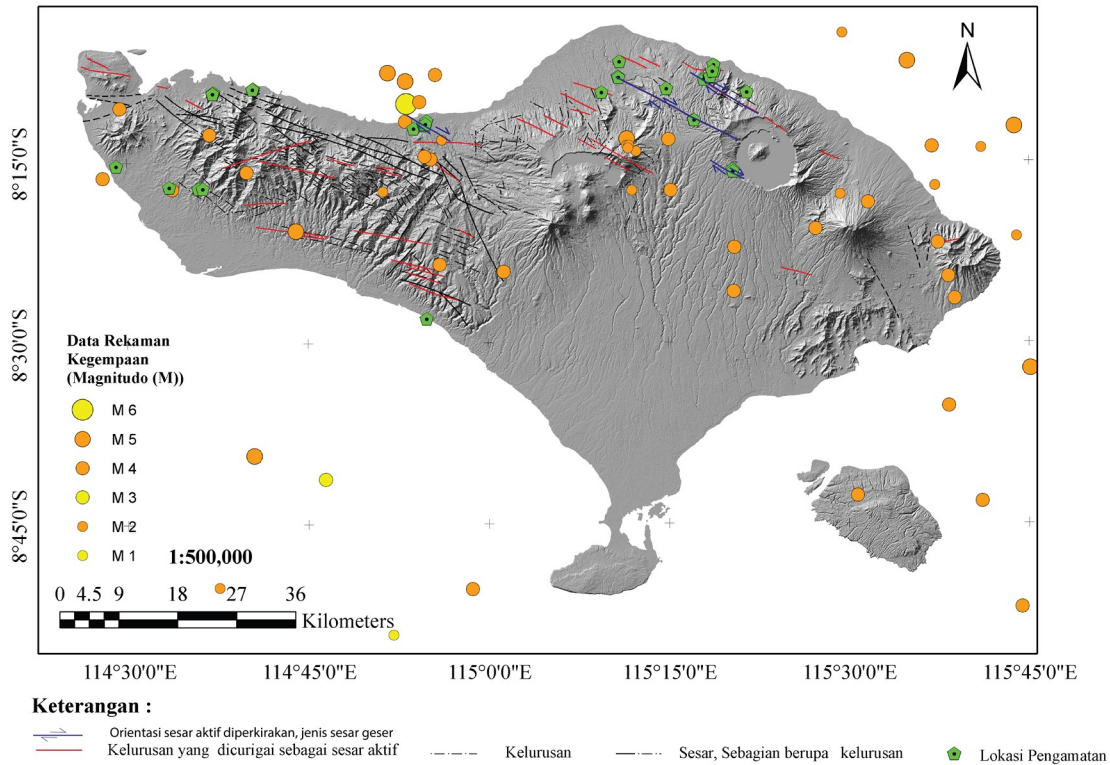
Gambar 8. Lokasi singkapan berada di tepi Jalan Raya Gunung Batur desa Dausa, Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli (a). Terdapat bidang ketidakkemenerusan pada unit tephra (b).



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-a	BS01-b	BS01-c	BS01-d	BS01-e	BS01-e	BS01-f	BS01-g	BS01-h	BS01-i	BS02-a
Ofset (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). Paleoseismology 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.