

MITIGASI TSUNAMI BERBASIS HIJAU DI PULAU SERANGAN BALI

I Nyoman Sutarja^{1*}, I Made Dodiek Wirya Ardana², dan Putu Cinthya Pratiwi Kardita²

¹*Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana, Denpasar, Bali, Indonesia*

²*Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia*

**Email: nsutarja@unud.ac.id*

ABSTRAK

Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) pada tahun 2017, Pulau Bali secara umum dan Pulau Serangan secara khusus memiliki potensi gempa bumi dengan magnitudo 8,5 pada Skala Richter (SR). Konsekuensi potensial dari gempa bumi yang sering terjadi adalah tsunami dan likuifaksi. Penelitian tentang potensi bencana gempabumi, tsunami, dan likuifaksi sangat penting untuk dilakukan di salah satu pulau di Bali, yaitu Pulau Serangan. Pulau Serangan, yang merupakan destinasi potensial pariwisata masa depan adalah salah satu pulau paling menarik di Bali. Rencana induk pulau ini menunjukkan bahwa beberapa hotel mewah dan aktivitas kelas atas internasional akan dibangun di lahan seluas 523 hektar. Di Pulau Serangan terdapat satu Pura Sad Khayangan, Pura Sakenan, yang digunakan sebagai pusat ibadah bagi umat Hindu setiap hari Umanis Kuningan. Karena merupakan dataran rendah yang dikelilingi lautan dan terpisah dari Pulau Bali, kondisi alam tersebut menyebabkan wilayah ini memiliki tingkat kerawanan bencana yang tinggi seperti rawan bencana gempa bumi, tsunami dan likuifaksi. Oleh sebab itu studi tentang potensi bencana seperti gempa bumi, tsunami, dan likuifaksi diperlukan untuk memastikan keamanan alam Pulau Serangan dan isinya di masa depan. Hasil penelitian para ahli, yang berasal dari simulasi tsunami menggunakan parameter gempa bumi magnitudo 8,5 SR dan kedalaman 10 km di segmen *Megathrust* Sumba, menunjukkan bahwa di Pulau Serangan terdapat potensi tsunami dengan ketinggian genangan sebesar 3 - 6 m. Pulau Serangan juga memiliki potensi likuifaksi pada kedalaman 0 - 2 m dengan penurunan tanah hingga 10 cm. Mitigasi berbasis hijau untuk bencana tsunami merupakan alternatif yang dapat diterapkan di Pulau Serangan disamping Bangunan Tempat Evakuasi Sementara (TES) yang sudah ada. Mitigasi Hijau yang dimaksud adalah pemanfaatan hutan mangrove dan revitalisasi hijau tempat pengolahan akhir sampah Suwung.

Kata kunci: gempa bumi; tsunami; likuifaksi; Pulau Serangan; mitigasi hijau

GREEN-BASED TSUNAMI MITIGATION ON SERANGAN ISLAND, BALI

ABSTRACT

Based on data issued by Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) in 2017, Bali Island in general and Serangan Island in particular have the potential of earthquakes with 8.5 magnitude in Richter Scale (SR). The potential consequences of earthquakes that often occur are tsunamis and liquefaction. Research on the potential disasters of earthquakes, tsunamis and liquefaction is very important to be carried out on one of the islands in Bali, namely Serangan Island. Serangan Island, which a potential destination of future tourism, is one of the most attractive islands in Bali. The island's masterplan shows that several luxury hotels and international high-end activities will be built on its 523 hectares. On Serangan Island there is one Sad Khayangan Temple, Sakenan Temple, which is used as a worship center for Hindus every Umanis Kuningan day. The study of potential disasters such as earthquakes, tsunamis and liquefaction are needed to ensure the natural safety of Serangan Island and its contents in the future. The results of expert research, that from tsunami simulations using earthquake parameters: magnitude 8.5 SR and depth of 10 km in the Sumba Megathrust segment, shows that on Serangan Island there is potential for a tsunami with a height of 3 - 6m. Serangan Island also has the potential for liquefaction at a depth of 0 - 2m with a land subsidence of up to 10 cm. Green-based tsunami mitigation is the best alternative that can be implemented on Serangan Island, in addition to the existing evacuation (TES) building. This green mitigation includes the utilization of mangrove forests and the revitalization of the Suwung final waste processing facility.

Keywords: earthquake; tsunami; liquefaction; Serangan Island; green mitigation.

1 PENDAHULUAN

Pulau Serangan yang merupakan lokasi Pura Sad Khayangan Sakenan, wisata bahari, penangkaran penyu dan wisata kuliner khas ikan laut, adalah salah satu tujuan kunjungan pariwisata Bali yang cukup terkenal. Dengan total wilayah sebesar 523 hektar, lahan seluas 48 hektar adalah milik Desa Adat Serangan dan sisanya kira-kira seluas 476 hektar adalah milik manajemen *Bali Turtle Island Development (BTID) Masterplan* pulau ini menunjukkan bahwa di lokasi ini akan didirikan beberapa hotel berbintang kelas mewah dan aktivitas berstandar internasional.

Dibalik keindahan alam dan keunikan budayanya, Pulau Serangan yang merupakan dataran rendah yang dikelilingi lautan dan terpisah dari Pulau Bali. Kondisi alam tersebut menyebabkan wilayah ini memiliki tingkat kerawanan bencana yang tinggi seperti rawan bencana gempa bumi, tsunami dan likuifaksi. Secara tektonik, Pulau Serangan memiliki beberapa sumber gempa bumi yang berpotensi menimbulkan tsunami dan likuifaksi. Sumber yang pertama adalah *Bali Back Arc Thrust*, yaitu sesar naik belakang busur Bali yang merupakan perpanjangan dari *Flores Back Arc Thrust* yang terletak di utara Pulau Bali (Daryono, 2019; Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, 2019; PUSGEN, 2017; Subandono, 2010). Sumber yang kedua adalah zona subduksi di selatan Pulau Serangan yang terjadi karena pergerakan lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia dengan kecepatan 7-10 cm per tahun (Subandono, 2010) yang merupakan penyebab utama aktifnya sesar di Bali dan sekitarnya (Daryono, 2010; Kurniawan & Laili, 2019). Dari sumber gempa bumi ini, diperkirakan bahwa jika gempa bumi terjadi di salah satu segmen selatan Bali, maka gelombang tsunami dari area ini hanya memerlukan 30 hingga 60 menit untuk mencapai pantai (Subandono, 2010). Potensi likuifaksi ditandai dengan nilai faktor keamanan $SF < 1$, berada pada kedalaman 0 atau muka tanah setempat hingga kedalaman -2 m, dengan penurunan muka tanah pasca terjadinya likuifaksi pada lapisan pasir lepas sebesar, 5 – 10 cm (Sutarja & Ardana, 2020).

Melihat sejarah kejadian bencana beserta dampak yang ditimbulkan dan kerentanan wilayah yang tinggi, maka diperlukan langkah yang jelas, terarah, dan menyeluruh untuk pengurangan risiko jiwa terpapar, rupiah yang hilang, dan lingkungan yang rusak pada setiap bencana yang berpotensi di Pulau Serangan. Perhatian dan peningkatan upaya pengurangan risiko bencana terhadap wilayah tersebut perlu ditingkatkan dengan mengacu pada kajian yang jelas untuk setiap bencana-bencana yang berpotensi terjadi, salah satunya adalah dengan pengkajian potensi bahaya gempa bumi dan tsunami di Pulau Serangan, Kota Denpasar.

Pengkajian potensi bahaya gempa bumi dan tsunami menjadi sangat penting karena 1) sebagai dasar dalam menyusun rencana dan kebijakan penanggulangan bencana oleh pemerintah daerah, sebagai mekanisme untuk mengarusutamakan penanggulangan bencana dalam rencana pembangunan, 2) sebagai dasar untuk koordinasi dan sinkronisasi program dalam melakukan aksi pendampingan maupun intervensi teknis langsung oleh mitra pemerintah ke komunitas terpapar untuk mengurangi risiko bencana dan 3) sebagai salah satu dasar bagi masyarakat umum untuk menyusun aksi praktis dalam rangka kesiapsiagaan, seperti menyusun rencana dan jalur evakuasi, pengambilan keputusan daerah tempat tinggal, dan sebagainya (Sutarja et al., 2020).

2 MITIGASI BENCANA BERBASIS HIJAU

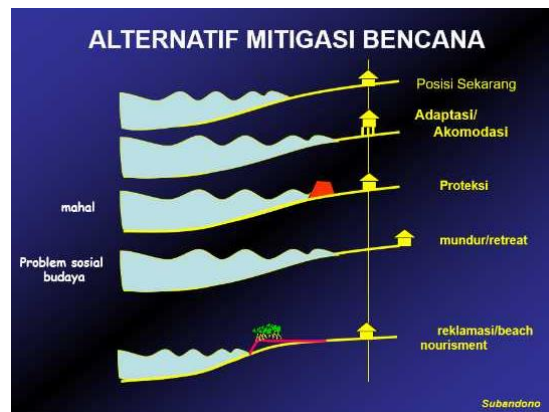
Bencana dapat berakibat pada kerusakan infrastruktur, permasalahan ekonomi, sosial, bahkan korban jiwa, sehingga dibutuhkan kajian untuk mengenali potensi bencana yang ada. Kajian potensi bencana dapat dijadikan dasar rencana mitigasi yang paling sesuai dan berkelanjutan. Mitigasi bencana berbasis hijau, misalnya tumbuhan pesisir, terutama hutan cemara laut dan hutan bakau, belakangan ini banyak dipilih dan sudah digunakan di banyak tempat (Cheong et al., 2013; Danielsen et al., 2005). Walaupun terdapat beberapa keterbatasan dalam efektivitasnya dalam mitigasi bencana tsunami, mitigasi berbasis hijau ini tetap layak untuk diaplikasikan dalam strategi mitigasi bencana bila direncanakan dengan baik dan sesuai dengan kondisi setempat (Benazir et al., 2024).

1. Hutan Bakau

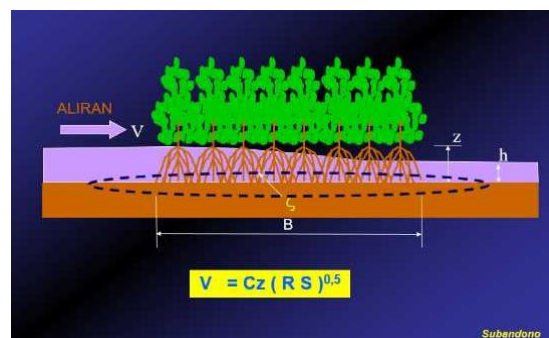
Faktor yang menentukan bakau dapat mereduksi tsunami meliputi: lebar hutan, kemiringan hutan, kerapatan pohon, diameter pohon, proporsi biomassa di atas permukaan tanah yang terdapat di akar, tinggi pohon, tekstur tanah, lokasi hutan, tipe vegetasi dataran rendah yang berdekatan dengan vegetasi mangrove, keberadaan habitat tepi pantai (padang rumput padang lamun, terumbu karang, bukit), ukuran dan kecepatan tsunami, jarak dari kejadian tektonik, dan sudut datang tsunami yang relatif terhadap garis pantai (Alongi 2005).

Hutan bakau sangat berperan dalam melindungi masyarakat dan bangunan saat terjadi tsunami karena meminimalisir area yang tergenang tsunami dengan cara memperlambat kecepatan air tsunami (Giri et al., 2007). Inti perlindungan tidak hanya untuk manusia tetapi juga untuk bangunan dan keanekaragaman hayati sebagai komunitas yang menghidupi semua aspek ini (Cheong et al., 2013). Oleh karena itu, penanaman hutan bakau direkomendasikan sebagai salah satu lapisan perlindungan dalam sistem mitigasi berlapis dan mendukung tanggul konvensional karena pada tsunami Samudera Hindia tahun 2004 terbukti dapat mengurangi genangan

tsunami di wilayah pesisir (Kathiresan & Rajendran, 2005). Penanaman tanaman bakau untuk lanskap pesisir berperan dalam pertahanan laut dan memperlambat energi dan kecepatan tsunami. Selain itu, penanaman tanaman bakau juga meningkatkan kualitas mata pencaharian nelayan lokal dengan meningkatkan kualitas perikanan di ekosistem (Danielsen et al., 2005) serta meningkatkan kemampuan ekosistem pantai secara umum untuk bertahan (Dahdouh-Guebas et al., 2005). Terlebih lagi, hutan bakau dapat mengurangi polutan udara, meningkatkan kualitas air, dan melindungi terumbu karang (Osti et al., 2009). Hutan bakau berperan dalam meningkatkan ketahanan kota karena dapat membantu segala pihak yang terlibat dalam menghadapi ketidakpastian, dimana kemampuan untuk beradaptasi dalam segala aspek sangat dibutuhkan (Benazir et al., 2024; Dahdouh-Guebas et al., 2021).



Gambar 1, Berbagai Alternatif Mitigasi Bencana Tsunami (Subandono, 2010)



Gambar 2, Mereduksi Kecepatan Aliran Air (Tsunami) Berbasis Hutan Bakau (Subandono, 2010)

Menyikapi Pasal 15 No 64 tahun 2010 dalam ayat 2 huruf f dalam Peraturan Pemerintah tentang Mitigasi Bencana di Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil, usaha mitigasi tsunami dapat dilakukan dengan menitik beratkan pada ekosistem mangrove dalam mereduksi tsunami. Tsunami dapat direduksi dengan ekosistem mangrove dengan cara menanam sabuk hijau (*green belt*) (Cochard et al. 2008). Mangrove tanaman yang banyak dijumpai di pantai-pantai daerah tropik dan dapat hidup pada kondisi air payau, salinitas tinggi, dan pasir lumpur. Mangrove yang tumbuh pada substrat yang memiliki bagian dasarnya lempung dapat mereduksi gelombang tsunami, disamping itu juga kepadatan vegetasi mangrove tersebut yang terdiri dari batang, cabang dan akar, misalnya pada mangrove spesies *Kandelia candel* (Quartel 2007).

3 METODE

3.1 Tempatkan Penelitian.

Penelitian dilaksanakan di Pulau Serangan, Kecamatan Denpasar Selatan, Kota Denpasar, Provinsi Bali. Pulau Serangan adalah sebuah kelurahan dan pulau yang berada di wilayah Kecamatan Denpasar Selatan, Kota Denpasar, Provinsi Bali, Indonesia (Gambar 3). Pulau yang terletak 500 meter di sebelah selatan pusat kota ini memiliki panjang maksimum 2,9 km dan lebar 1 km. Pulau ini banyak dikenal akan kura-kuranya dan terhubung ke Pulau Bali melalui jembatan. Di pulau ini terdapat Pura Sakenan, 1 dari 6 pura paling suci di Bali. Di samping itu, terdapat komunitas Muslim dari suku Bugis yang sudah lama menetap di pulau ini. Penduduk Serangan sebanyak 7.417 jiwa yang terdiri dari 3.680 laki-laki dan 3.737 perempuan.



Gambar 3. Tampak Pulau Serangan dari Atas

3.2 Sumber Data

Data penelitian ini ada dua sumber, yaitu data primer yang diperoleh dari hasil survey langsung ke lapangan dan data sekunder yang diperoleh dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Provinsi Bali maupun dari BPBD Kota Denpasar. Data sekunder juga diambil dari Balai Wilayah III BMKG Denpasar.

3.3 Analisis Data

Data magnitude gempa bumi yang digunakan sebagai skenario dalam penelitian ini mengambil referensi dari peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017 (PUSGEN, 2017), yang menunjukkan bahwa segmen *Megathrust* Sumba mempunyai sumber potensi gempa bumi dengan kekuatan 8.5 SR. Data lain yang digunakan adalah kedalaman sumber gempa 10 km yang dikategorikan dangkal dan berpotensi besar menimbulkan tsunami dan likuifaksi, sebagai skenario terburuk (Purbo-Hadiwidjojo et al., 1998). Kajian potensi likuifaksi berdasarkan atas data *Cone Penetration Test* (CPT), Angka Keamanan (SF), nilai *Cyclic Retention Ratio* (CRR) dan Nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) (Ardana & Putra, 2019; Seed & Idriss, 1971; Sengara, 2008; Youd and Idriss, 2001; Zhang et al., 2002). Hasil analisis dijadikan dasar untuk melakukan tindakan pengurangan risiko bencana tsunami dan likuifaksi di Pulau Serangan.

3.4 Mitigasi Tsunami Berbasis Hijau

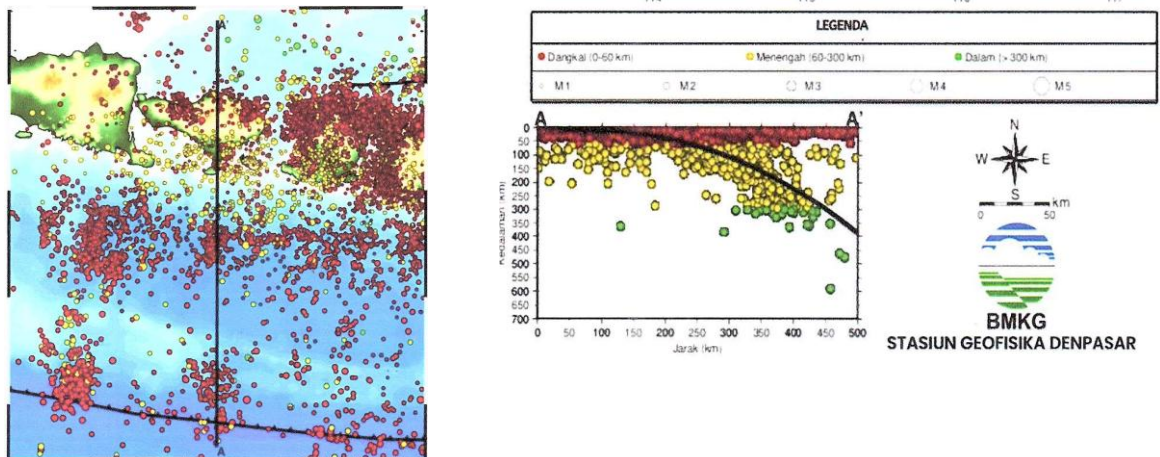
Pengurangan risiko bencana tsunami hijau di Pulau Serangan dapat dilakukan dengan dua pendekatan yaitu revitalisasi hutan bakau dan revitalisasi Tempat Pengolahan Akhir (TPA) Sampah Suwung menjadi ruang hijau terbuka. Hutan bakau sangat efektif untuk mereduksi/mengerem kecepatan tsunami dan TPA Suwung yang mempunyai ketinggian 15-25 m dan rencananya ditutup, dapat direvitalisasi menjadi ruang terbuka hijau sebagai alternatif Tempat Evakuasi Sementara (TES) tsunami ke arah vertikal.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

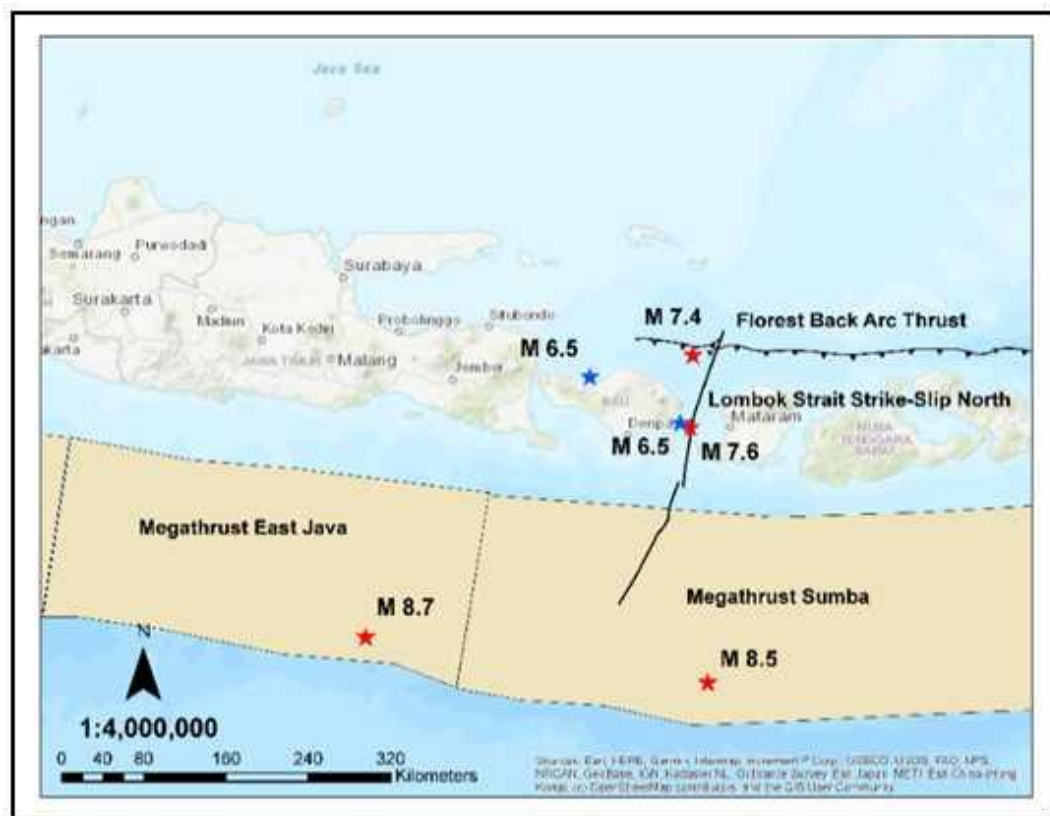
4.1 Potensi Gempa Bumi

Seismisitas kegempaan di Pulau Bali dan sekitarnya telah banyak dibahas para ahli karena termasuk lingkaran api (*ring of fire*) dunia, dimana setiap saat terjadi gempa bumi (Wald et al, 2006; Worden et al 2010; Worden et al., 2012). Titik-titik gempa bumi yang terjadi dalam periode tahun 2008 sampai dengan 2022 dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan kajian PUSGEN tahun 2017 dan Fatchurochman & Yagi (2012), setidaknya terdapat empat potensi sumber gempa bumi signifikan di sekitar wilayah Bali. Dua di antaranya bersumber dari aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia di selatan Bali dan Jawa Timur dengan potensi kekuatan maksimum sebesar M8.5 dan M8.7. Potensi gempa bumi signifikan ketiga berasal dari utara Pulau Bali akibat aktivitas *Flores Back Arc Thrust* dengan potensi kekuatan gempa maksimum sebesar M7.4. Potensi gempa bumi keempat yaitu bersumber dari *Lombok Strait Strike-Slip North* dengan potensi kekuatan gempa bumi maksimum sebesar M 7.6. Titik-titik sumber gempa bumi ini ditampilkan sebagai tanda bintang merah pada Gambar 5.

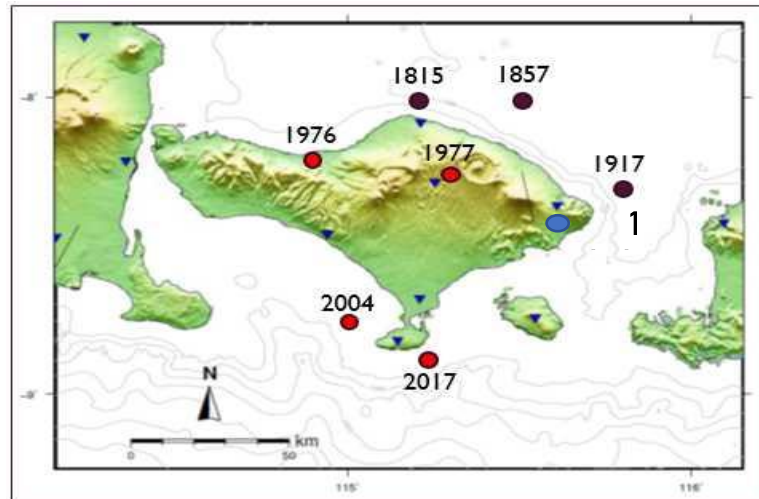


Gambar 4, Peta Seismisitas Pulau Bali dan Sekitarnya Tahun 2008-2022 (Stasiun Geofisika Denpasar, 2023)



Gambar 5. Peta *epicenter* skenario gempa bumi signifikan di wilayah Bali (PUSGEN, 2017)

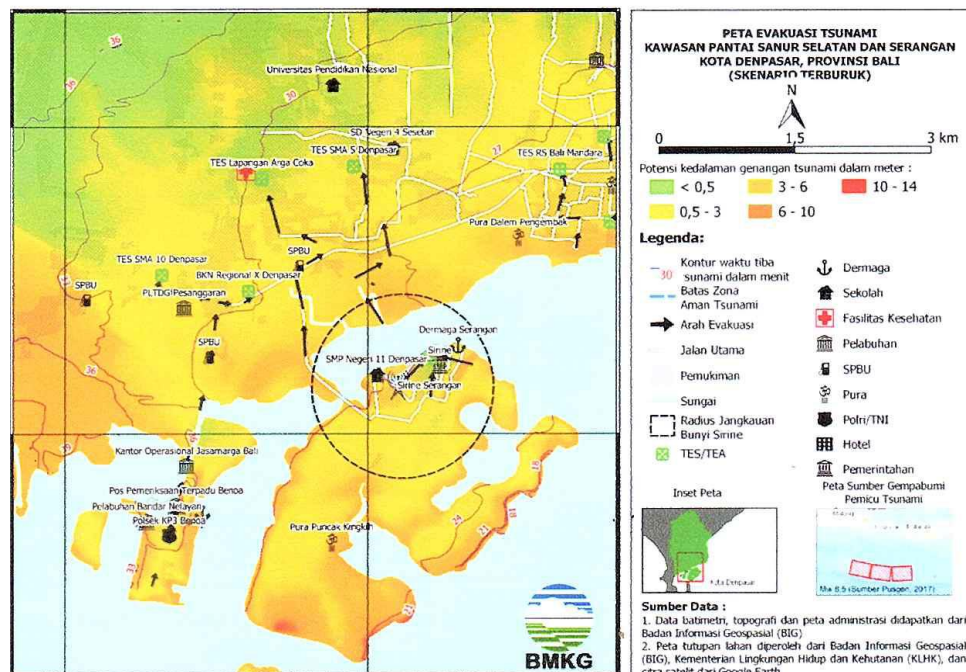
Sumber gempa bumi tersebut dapat mengakibatkan terjadinya gempa besar di Pulau Bali dan sekitarnya yang tercatat sejak tahun 1815 (Gambar 6). Dalam sejarah seismologi modern setidaknya terdapat dua gempa bumi signifikan di wilayah Bali dalam 50 tahun terakhir. Pada tahun 1976 wilayah Bali diguncang gempa signifikan yang dilaporkan menimbulkan cukup banyak kerusakan dan korban jiwa. Gempa tersebut merupakan gempa dangkal dengan kekuatan Mw 6.5 berlokasi di Seririt, Bali Utara. Berselang tiga tahun kemudian, tepatnya pada 17 Desember 1979 gempa bumi signifikan kembali terjadi dengan pusat gempa berlokasi di perairan selat Lombok dekat Karangasem. Gempa tersebut merupakan gempa dangkal dengan kekuatan Mw 6.5.



Gambar 6. Peta Gempa Merusak di Wilayah Bali Periode 1821-2018 (Sutarja et al., 2020)

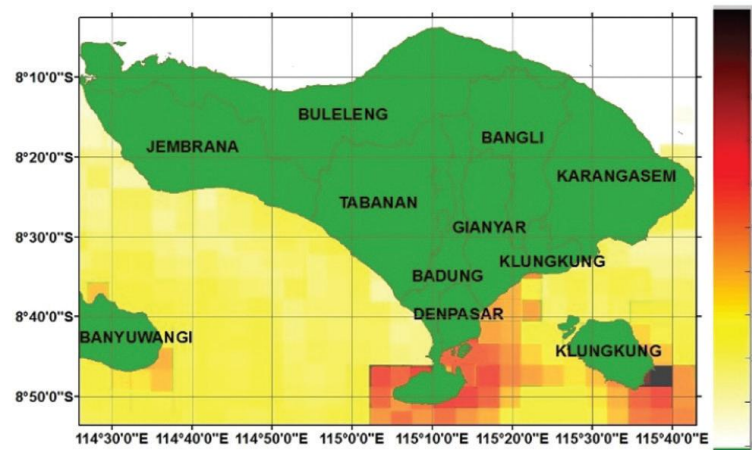
4.2 Potensi Tsunami

Pulau Bali bagian Selatan secara umum dan Pulau Serangan khususnya adalah lokasi yang sangat terdampak tsunami, dengan kedalaman rendaman akibat tsunami dapat mencapai 3 – 6 m (Stasiun Geofisika Denpasar BMKG, 2023a; Subandono, 2010; Sutarja et al., 2020a; Kurniawan & Laili, 20) (Gambar 7).



Gambar 7 Tinggi Genangan akibat Tsunami di Pulau Serangan dan Sekitarnya (Stasiun Geofisika Denpasar, BMKG, 2023a)

Data magnitude gempa bumi yang digunakan sebagai skenario dalam penelitian ini diambil dari peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017 yang menunjukkan bahwa segmen *Megathrust* Sumba mempunyai sumber potensi gempa bumi dengan kekuatan 8.5 SR. Data lain yang digunakan adalah kedalaman sumber gempa 10 km yang dikategorikan dangkal dan berpotensi besar menimbulkan tsunami (Kurniawan & Laili, 2019) yang ditampilkan pada Gambar 8 dan Tabel 1.

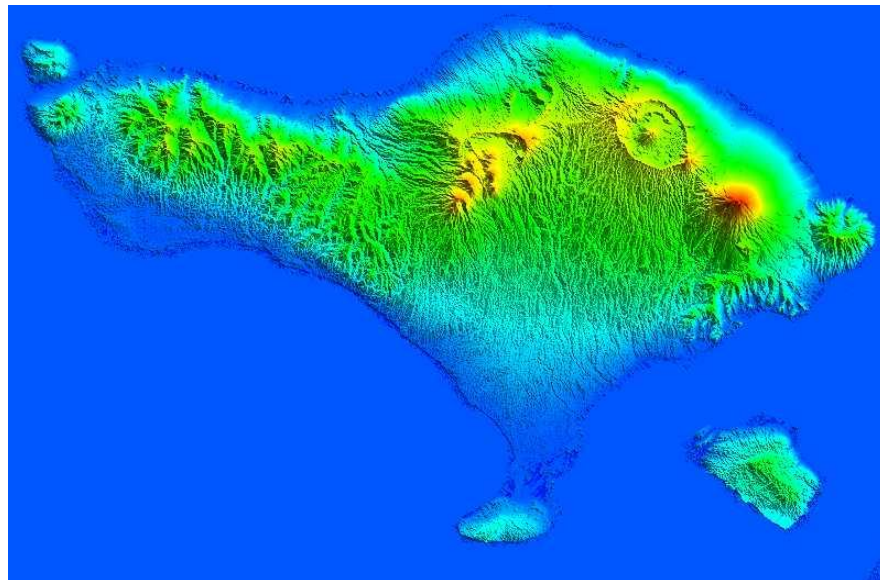


Gambar 8, Pulau Bali Bagian Selatan Yang Terdampak Tsunami (Kurniawan & Laili, 2019)

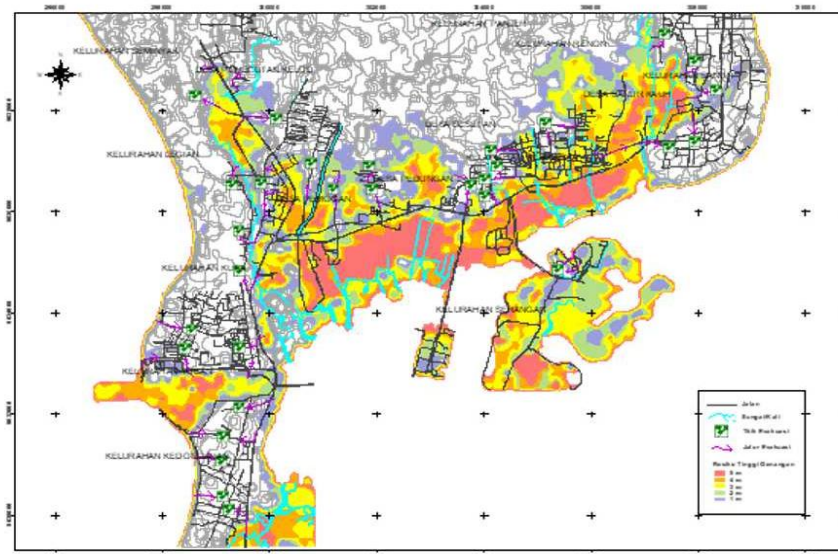
Tabel 1. Tinggi Genangan Tsunami (Kurniawan & Laili, 2019)

No.	Tinggi Genangan Tsunami (m)	Kabupaten/Kota	Kecamatan/Desa
1	7,389	Klungkung	Nusapenida/Tanglad
2	6,844	Klungkung	Nusapenida/Sekartaji
3	6,580	Klungkung	Nusapenida/Pejukutan
4	6,111	Badung	Kuta Selatan/Kedonganan
5	5,503	Badung	Kuta Selatan/Benoa
6	5,404	Badung	Kuta Selatan/Kutuh
7	4,539	Denpasar	Denpasar Selatan/Serangan
8	4,509	Denpasar	Denpasar Selatan/Sanur Kaja
9	4,467	Badung	Kuta/Jimbaran

Simulasi rendaman tsunami di daerah pantai sepanjang Pulau Bali yang terdampak ditampilkan sebagai bagian berwarna biru pada Gambar 9 dan bergradasi oranye sampai biru pada Gambar 10 (Subandono, 2010).



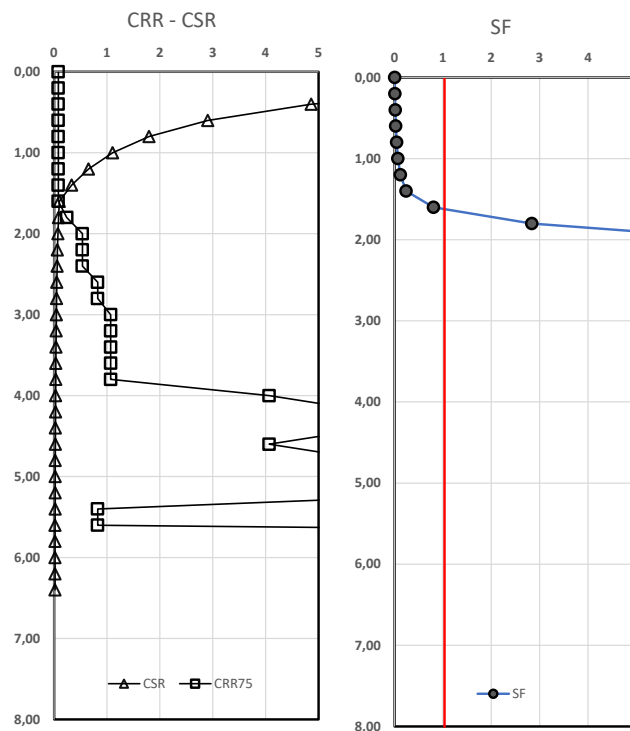
Gambar 9. Daerah Pantai yang Terendam Dampak dari Tsunami (Subandono, 2010)



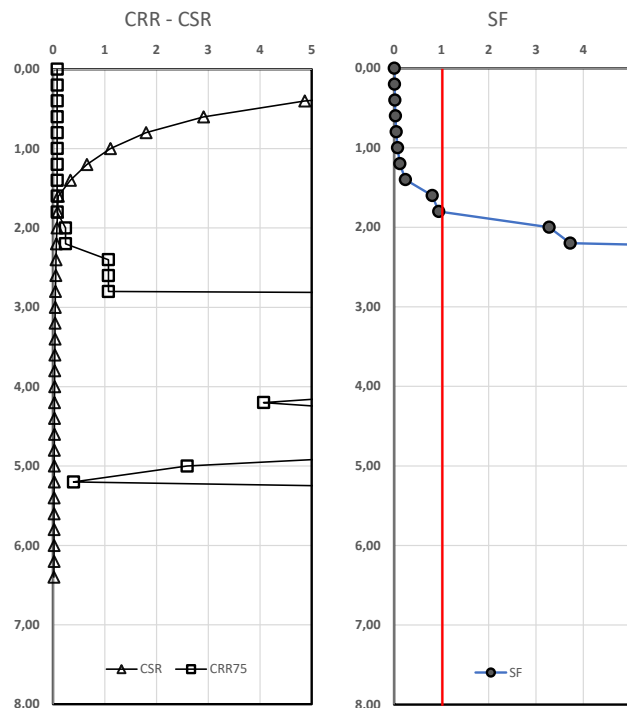
Gambar 10, Tinggi Rendaman 3-6 m akibat Tsunami di Pulau Serangan (Subandono, 2010)

4.3 Likuifaksi

Pengujian Sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT) dilakukan di beberapa titik di Pulau Serangan dan Pulau Serangan Reklamasi serta di TPA Suwung. Hasil pengujian CPT diberikan berturut-turut, Suwung Serangan 1-2 (Gambar 11) dan Suwung – Serangan 2-2 (Gambar 12).



Gambar 11, Nilai SF, CRR dan CSR Suwung Serangan 1-2



Gambar 12, Nilai SF, CRR dan CSR Suwung Serangan 2-2

Kajian potensi likuifaksi di daerah studi khususnya berdasarkan data CPT diberikan pada Angka Keamanan (SF), nilai CRR dan Nilai CSR juga dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12. Potensi likuifaksi secara menyeluruh ditandai dengan $SF < 1$ pada daerah studi, yaitu berada pada kedalaman 0 atau muka tanah setempat hingga kedalaman -2 m. Potensi penurunan muka tanah pasca terjadinya likuifaksi berada hingga kedalaman 2 meter, dengan penurunan sebesar 1 – 2 % yaitu sebesar 5 – 10 cm (Sutarja & Ardana, 3022).

4.4 Mitigasi Tsunami Berbasis Hijau

1. Revitalisasi hutan bakau

Hutan bakau secara alami terdapat di sepanjang pesisir selatan Kota Denpasar, yang belakangan luasnya berkurang akibat pembangunan. Mengingat bahwa hutan bakau dapat berperan penting dalam melindungi masyarakat dan bangunan saat terjadinya bencana tsunami (Cheong et al., 2013; Giri et al., 2007; Kathiresan & Rajendran, 2005), penelitian ini merekomendasikan agar dilakukan revitalisasi hutan bakau di tempat-tempat strategis, dikombinasikan dengan sistem mitigasi berlapis dengan strategi mitigasi bencana lainnya. Mengingat tinggi genangan akibat tsunami yang dapat mencapai 3-6 m, efektivitas hutan bakau ini perlu dianalisis lebih jauh berdasarkan kondisi setempat dan dikombinasikan dengan sistem peringatan dini, jalur evakuasi, edukasi masyarakat, tata ruang, dan fasilitas evakuasi vertikal lainnya.

2. Revitalisasi TPA Suwung

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Suwung yang direncanakan untuk tidak difungsikan lagi, terletak berdekatan dengan Pulau Serangan. Pasca berakhirnya kontrak kerja sama dengan PT NOEI, Pemerintah Provinsi Bali berjanji melakukan revitalisasi TPA Suwung. Pada tahun 2017, dilakukan *groundbreaking* atau peletakan batu pertama untuk mengubah TPA Suwung menjadi taman kota. Revitalisasi dilakukan dengan menggunakan metode *sanitary landfill* dan tumpukan sampah akan diurug tanah, dilengkapi dengan konstruksi pengamanan lereng untuk menjadi taman (Gambar 13-18).

Proyek revitalisasi diluncurkan oleh Luhut Binsar Pandjaitan, Menteri Koordinator Kemaritiman saat itu. Proyek ini dilakukan dalam menyambut sidang tahunan IMF dan World Bank di Bali pada tahun 2018. Revitalisasi direncanakan berjalan tiga tahun, dimulai akhir Desember 2017 hingga Oktober 2019 dengan anggaran Rp 250 miliar dari APBN. Rencananya, lahan seluas 22 hektar akan dijadikan taman, sedangkan 10 hektar akan dijadikan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) (Kementerian PUPR, 2021).

Penetapan revitalisasi TPA Suwung hingga tahun 2019 seharusnya membuat TPA Suwung tak lagi beroperasi pada tahun 2020. Namun, pada tahun 2018, Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat saat itu menyampaikan masa layanan TPA Suwung diperpanjang hingga tahun 2024. Jangkauan layanan TPA Suwung juga diperluas hingga Kabupaten Klungkung. Namun, hingga Agustus tahun 2020, revitalisasi TPA Suwung tak

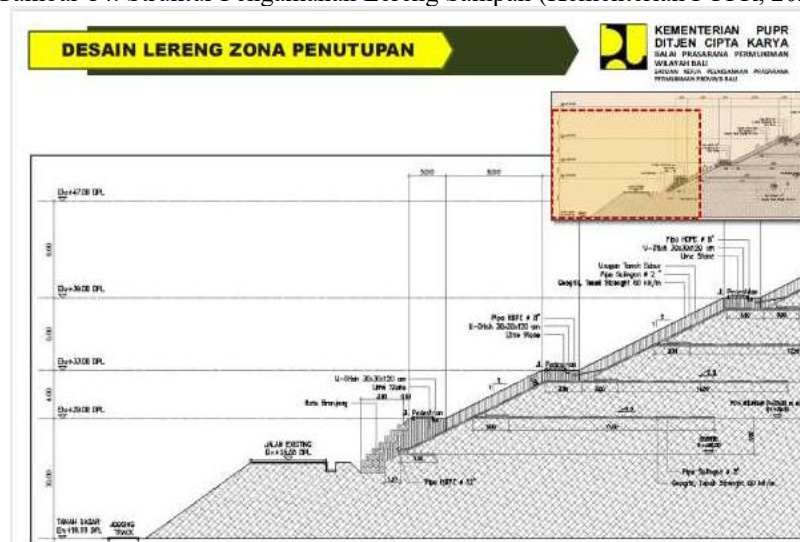
kunjung rampung. Proyek tersebut digarap oleh kontraktor PT Waskita Karya dan PT Arkonin. Masa pelaksanaannya mundur hingga Desember 2021 (Kementerian PUPR, 2021).



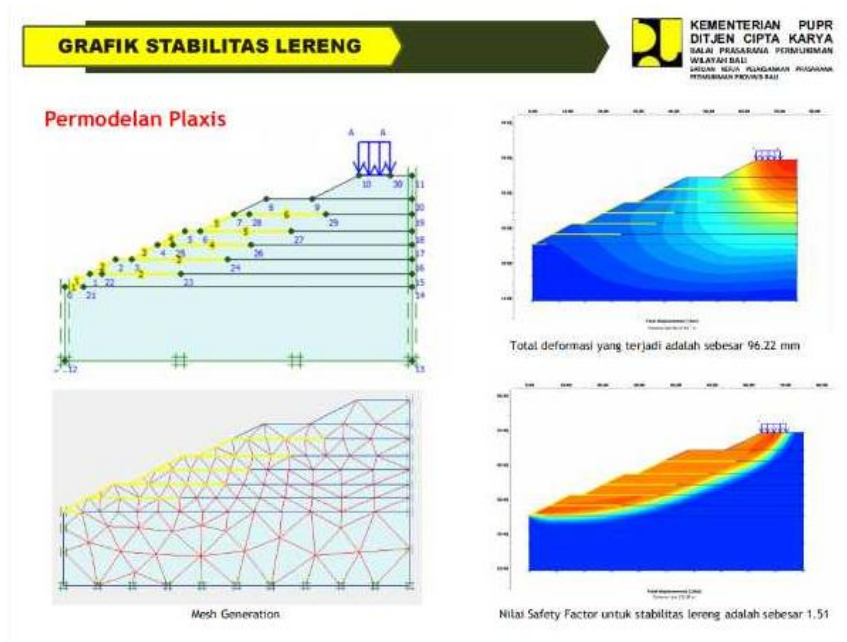
Gambar 13. Tumpukan Sampah di TPA Suwung Mencapai Ketinggian 15 – 25 m (Kementerian PUPR, 2021)



Gambar 14. Struktur Pengamanan Lereng Sampah (Kementerian PUPR, 2021)



Gambar 15. Struktur Pengamanan Lereng Sampah (Kementerian PUPR, 2021)



Gambar 16. Kajian Struktur Pengamanan Lereng Sampah (Kementerian PUPR, 2021)



Gambar 17. Ruang Terbuka Hasil Revitalisasi TPA Suwung (Kementerian PUPR, 2021)



Gambar 18. Lay Out Ruang Terbuka Revitalisasi TPA Suwung (Kementerian PUPR, 2021)

4.5 Rekomendasi

Penelitian ini merekomendasikan langkah-langkah mitigasi akibat tsunami di Pulau Serangan sebagai berikut:

1. Dalam merancang sistem struktur tahan gempa di Pulau Serangan dapat digunakan standar baku, seperti SNI, misalnya SNI 1726 – 2019 tentang Beban Gempa dan mempertimbangkan adanya potensi tsunami dan likuifaksi
2. Pengurangan risiko bencana tsunami dan likuifaksi dapat dilakukan dengan pengurangan tanah dan dipadatkan dengan ketinggian 3 – 6 m dan merevitalisasi hutan mangrove dan TPA Suwung menjadi ruang hijau terbuka.
3. Pengurangan risiko bencana tsunami berbasis hijau di Pulau Serangan dapat dilakukan dengan dua pendekatan yaitu revitalisasi hutan bakau dan revitalisasi Tempat Pengolahan Akhir (TPA) Sampah Suwung menjadi ruang terbuka hijau.

5 KESIMPULAN

1. Pulau Bali dan Serangan mempunyai dua sumber gempa bumi, sumber yang pertama adalah *Bali Back Arc Thrust*, yaitu sesar naik belakang busur Bali yang merupakan perpanjangan dari *Flores Back Arc Thrust* yang terletak di utara Pulau Bali dan sumber yang kedua adalah zona subduksi di selatan Pulau Serangan yang terjadi karena pergerakan lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia dengan kecepatan 7-10 (tujuh) cm per tahun yang merupakan penyebab utama aktifnya sesar di Bali dan sekitarnya
2. Pulau Serangan berpotensi terjadi tsunami dengan kedalaman rendaman mencapai 3 – 6 m
3. Potensi likuifaksi ditandai dengan $SF < 1$, berada pada kedalaman 0 atau muka tanah setempat hingga kedalaman -2 m, dengan penurunan muka tanah pasca terjadinya likuifaksi pada lapisan pasir lepas sebesar, 5 – 10 cm.
4. Pengurangan risiko bencana tsunami berbasis hijau di Pulau Serangan dapat dilakukan dengan dua pendekatan yaitu revitalisasi hutan bakau dan revitalisasi Tempat Pengolahan Akhir (TPA) Sampah Suwung menjadi ruang terbuka hijau. Hutan bakau sangat efektif untuk mereduksi kecepatan tsunami dan TPA Suwung yang mempunyai ketinggian 15-25 m dapat direvitalisasi menjadi ruang terbuka hijau sebagai alternatif Tempat Evakuasi Sementara (TES) tsunami ke arah vertikal.

DAFTAR PUSTAKA

- Alongi, Daniel M. 2008. "Mangrove Forests: Resilience, Protection from Tsunamis, and Responses to Global Climate Change." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76(1): 1–13. doi:10.1016/j.ecss.2007.08.024
- Ardana, M. D. W., & Putra, T. G. S. (2019). Potensi Likuifaksi Kota Denpasar dan Kabupaten Badung Selatan serta Kerentanan Bahaya Penurunannya. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil Ke-13 (KoNTekS-13) Volume II: Geoteknik, Transportasi, Infrastruktur, Hidroteknik, Lingkungan, Mitigasi Bencana*. Banda Aceh, 19-21 September 2019. pp. 10-18.
- Benazir, Radianta Triatmadja, Syamsidik, Nizam, and Warniyati. 2024. "Vegetation-Based Approached for Tsunami Risk Reduction: Insights and Challenges." *Progress in Disaster Science* 23: 100352. doi:10.1016/j.pdisas.2024.100352.
- Cochard, Roland, Senaratne L. Ranamukhaarachchi, Ganesh P. Shivakoti, Oleg V. Shipin, Peter J. Edwards, and Klaus T. Seeland. 2008. "The 2004 Tsunami in Aceh and Southern Thailand: A Review on Coastal Ecosystems, Wave Hazards and Vulnerability." *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 10(1): 3–40. doi:10.1016/j.ppees.2007.11.001.
- Cheong, So-Min, Brian Silliman, Poh Poh Wong, Bregje van Wesenbeeck, Choong-Ki Kim, and Greg Guannel. 2013. "Coastal Adaptation with Ecological Engineering." *Nature Climate Change* 3(9): 787–91. doi:10.1038/nclimate1854.
- Dahdouh-Guebas, Farid, Jean Hugé, Guilherme M. O. Abuchahla, Stefano Cannicci, Loku P. Jayatissa, James G. Kairo, Sunanda Kodikara Arachchilage, et al. 2021. "Reconciling Nature, People and Policy in the Mangrove Social-Ecological System through the Adaptive Cycle Heuristic." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 248: 106942. doi:10.1016/j.ecss.2020.106942.
- Danielsen, Finn, Mikael K. Sørensen, Mette F. Olwig, Vaithilingam Selvam, Faizal Parish, Neil D. Burgess, Tetsuya Hiraishi, et al. 2005. "The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation." *Science* 310(5748): 643–643. doi:10.1126/science.1118387.
- Daryono (ed.). 2019. *Risiko Hidup di Batas Lempeng Tektonik, Kumpulan Essay Tiga Bencana Alam Tahun 2018 di Lombok, Palu, dan Selat Sunda*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

- Fatchurochman, I., & Yagi, Y. (2012). Source rupture process of the Mentawai, Indonesia earthquake of October 25th, 2010, determined by joint inversion of teleseismic body wave and near-source strong motion data. *Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, 46, 7-12.
- Giri, C., Z. Zhu, L. L. Tieszen, A. Singh, S. Gillette, and J. A. Kelmelis. 2008. "Mangrove Forest Distributions and Dynamics (1975–2005) of the Tsunami-Affected Region of Asia." *Journal of Biogeography* 35(3): 519–28. doi:10.1111/j.1365-2699.2007.01806.x.
- Kathiresan, Kandasamy, and Narayanasamy Rajendran. 2005. "Coastal Mangrove Forests Mitigated Tsunami." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65(3): 601–6. doi:10.1016/j.ecss.2005.06.022.
- Kementerian PUPR, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Balai Prasarana Permukiman Wilayah Bali, (2021), Revitalisasi TPA Regional Sarbagita Suwung.
- Osti, Rabindra, Shigenobu Tanaka, and Toshikazu Tokioka. 2009. "The Importance of Mangrove Forest in Tsunami Disaster Mitigation." *Disasters* 33(2): 203–13. doi:10.1111/j.1467-7717.2008.01070.x.
- Purbo-Hadiwidjojo, M.M., Samodra, H., dan Amin, T.C. 1998. *Peta Geologi Lembar Bali Nusa Tenggara*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
- PUSGEN. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta: Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman. ISBN 978-602-5489-01-3
- Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG. 2019. *Katalog Gempa Bumi Signifikan dan Merusak 1821 – 2018 Per-Tahun*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Quartel, S., A. Kroon, P. G. E. F. Augustinus, P. Van Santen, and N. H. Tri. 2007. "Wave Attenuation in Coastal Mangroves in the Red River Delta, Vietnam." *Journal of Asian Earth Sciences* 29(4): 576–84. doi:10.1016/j.jseaes.2006.05.008.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1971. "Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential", *Journal of soil mechanics and foundation, Division, ASCE*, vol.97. No.9, pp. 1249 – 1273
- Sengara, I. W., 2008. Seismic hazard and microareation for a district in Banda Aceh City Post 2004 Great Sumatra Earthquake, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China
- Subandono, D., (2010), Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami, Direktorat Pesisir dan Lautan, Ditjen Kelautan, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, Departemen Kelautan dan Perikanan
- Stasiun Geofisika Denpasar, BMKG., (2023), Peta Seismisitas Pulau Bali Dan Sekitarnya Tahun 2008 – 2022).
- Stasiun Geofisika Denpasar, BMKG., (2023.a), Peta Evakuasi Tsunami Kawasan Pantai sanur Selatan dan Serangan Kota Denpasar, Provinsi Bali
- Sutarja, I.N., Dodiek A.W., (2022), Kajian Potensi Bahaya Likuifaksi di Pulau Serangan dan Sekitarnya, Laporan Penelitian Hibah Universitas Udayana.
- Sutarja, I.N., Dodiek A.W., Rahman A., Iman F., (2020), Kajian Potensi Bahaya Pada Area Rencana Pembangunan Pusat Kebudayaan Bali Di Kabupaten Klungkung, Laporan Penelitian Kerjasama antara Universitas Udayana dengan Badan Riset dan Inovasi Provinsi Bali.
- Sutarja, I. N., Pringgana, G., & Wikrama, I. M. A. S. (2020a). The effects of earthquake and tsunami loadings on structural behavior of reinforced concrete building. *Journal of Applied Engineering Science*, in review, 1-10.
- Kurniawan, T., Laili, A.F., (2019), Penentuan Area Terdampak "Ketinggian Maksimum Tsunami" Di Pulau Bali Berdasarkan Potensi Gempa Bumi Pembangkit Tsunami Pada Segmen *Megathrust* Sumba, *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana Vol. 10, No. 1 Tahun 2019 Hal. 93-104*
- Wald, D.J., Worden, B.C., Quitoriano, V., and Pankow, K.L. 2006. *ShakeMap Manual: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide*. Reston: USGS. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>.
- Worden, Charles & Wald, D. & Allen, T. & Lin, Kuo-Wan & García, Daniel & Cua, Georgia. 2010. *A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap*. *Bulletin of The Seismological Society of America - BULL SEISMOL SOC AMER.* 100. 3083-3096. DOI: [10.1785/0120100101](https://doi.org/10.1785/0120100101).
- Worden, Charles & Gerstenberger, M. & Rhoades, D. & Wald, D.. 2012. *Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California*. *The Bulletin of the Seismological Society of America.* 102. 204-221. DOI: [10.1785/0120110156](https://doi.org/10.1785/0120110156).
- Youd, T.L., Idriss, I.M., 2001, Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(4): 297-313
- Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1168-1180.