



BMKG

Sejarah **GEMPABUMI MERUSAK & TSUNAMI DI INDONESIA**

**PUSAT GEMPABUMI DAN TSUNAMI
KEDEPUTIAN BIDANG GEOFISIKA
BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
Jl. Angkasa 1 No. 2 Jakarta 10720**

KATA PENGANTAR

Kepulauan Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Lempeng Eurasia, Indo Australia dan Lempeng Pasifik. Selain itu terdapat pula Lempeng mikro Filipina, yang bergerak ke arah selatan di sebelah utara Sulawesi. Oleh karena itu tidak mengherankan bila wilayah kepulauan Indonesia menjadi wilayah yang rawan gempa bumi tektonik. Gempa bumi yang terjadi terkadang mengakibatkan kerusakan dan terkadang juga diikuti tsunami. Kejadian-kejadian gempa bumi terutama yang signifikan, dan/atau yang merusak serta yang diikuti dengan tsunami perlu untuk dicatat dan dibukukan sebagai bahan untuk memetakan sejarah kegempaan di suatu wilayah. Dengan demikian perlu dibuat dalam bentuk buku sejarah gempa bumi merusak dan tsunami di Indonesia.

Catatan gempa bumi dan tsunami pada buku ini bersumber dari monitoring BMKG, serta institusi lain seperti USGS, NOAA serta sumber-sumber lainnya. Tiada gading yang tak retak, Tim Penyusun terbuka terhadap kritik dan saran demi perbaikan buku ini di masa yang akan datang. Diharapkan dengan adanya buku ini dapat bermanfaat bagi pengguna yang membutuhkannya.

Jakarta, Februari 2023

Deputi Bidang Geofisika,

Dr. Suko Prayitno Adi, S.Si, M.Si

NIP. 196303151985031001

TIM PENYUSUN

Penanggung Jawab:

Dr. Suko Prayitno Adi, S.Si., M.Si.

Pengarah:

Dr. Daryono, S.Si., M.Si.

Editor:

Suci Dewi Anugrah, S.Si., M.Si.

Hidayanti, S.Si., M.T.

Septa Anggraini, S.ST., M.Si.

Redaksi Pelaksana:

Debi Safari Yogaswara, S.Si, M.Si

Abraham Arimuko, S.Tr. Geof.

Tribowo Kriswinarso, S.Sn.

Afra Kansa Maimuna, S.Tr. Geof.

Admiral Musa Julius, S. Tr, M.Han.

Gloria Simangunsong, S.Si.

Tatok Yatimantoro, S.Si, MDM.

Weniza, S.Kom, M.Sc.

Sidiq Hargo Pandadaran, S.Tr, MDM.

Resty Herdiani Rahayu, SST, M.Han.

Mila Apriani, S.Tr, M.Si.

Muhammad Hafizh Ghifari, S.Tr.

Purnomo Hawati, S.Si, M.Si.

Oktavia Dameria Panjaitan, S.Si.

Muhammad Harvan, ST.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR | i |
| TIM PENYUSUN..... | ii |
| DAFTAR ISI..... | iii |
| DAFTAR GAMBAR | iv |
| PENDAHULUAN..... | 1 |
| TEKTONIK INDONESIA..... | 3 |
| I. Wilayah Sumatera..... | 8 |
| A. Gempabumi dan Tsunami Aceh, 26 Desember 2004 (M9,1) | 8 |
| B. Gempabumi dan Tsunami Nias, 28 Maret 2005 (M8,6) | 17 |
| C. Gempabumi Padang, 30 September 2009 (M7,6) | 22 |
| D. Gempabumi dan Tsunami Mentawai, 25 Oktober 2010 (M7,2) | 31 |
| II. Wilayah Jawa dan Bali | 35 |
| A. Gempabumi dan Tsunami Banyuwangi, 3 Juni 1994 (M7,8)..... | 35 |
| B. Gempabumi Yogyakarta, 27 Mei 2006 (M6,3) | 43 |
| C. Gempabumi dan Tsunami Pangandaran, 17 Juli 2006 (M7,7)..... | 48 |
| D. Gempabumi Bali, 14 Juli 1976 (M6,5)..... | 54 |
| E. Gempabumi Lombok, 5 Agustus 2018 (M7,0) | 56 |
| III. Wilayah Sulawesi | 64 |
| A. Gempabumi dan Tsunami Banggai, 4 Mei 2000 (M7,4)..... | 64 |
| B. Gempabumi dan Tsunami Palu, 28 September 2018 (M7,7) | 67 |
| C. Gempabumi Mamuju, 15 Januari 2021 (M5,9) | 75 |
| IV. Wilayah Maluku Utara | 81 |
| A. Gempabumi dan Tsunami Taliabu-Sula, 29 November 1998 (M6,5) | 81 |
| V. Wilayah Papua | 83 |
| A. Gempabumi Biak, 17 Februari 1996 (M 8,2)..... | 83 |
| B. Gempabumi dan Tsunami Aitape, 17 Juli 1998 (M 7,0)..... | 86 |
| DAFTAR ISTILAH..... | 88 |
| DAFTAR PUSTAKA | 90 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1. Peta tektonik wilayah Indonesia dari data geodetik hingga tahun 2016 (Irsyam dkk., 2017) | 3 |
| Gambar 2. Segmentasi dan magnitudo maksimum subduksi Indonesia (Irsyam dkk., 2017)..... | 4 |
| Gambar 3. Peta seismisitas Indonesia periode 2009-2022 | 4 |
| Gambar 4. Grafik gempabumi di Indonesia periode 2008-2022 | 5 |
| Gambar 5. Grafik gempabumi merusak di Indonesia periode 2008-2022 | 6 |
| Gambar 6. Grafik gempabumi merusak per dekade di Indonesia periode 1820-2022 | 7 |
| Gambar 7. Grafik kejadian tsunami per abad di Indonesia periode 1600-2022..... | 7 |
| Gambar 8. Peta tingkat guncangan gempa Aceh, 26 Desember 2004 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/slav/) | 9 |
| Gambar 9. Peta Tsunami Travel Time (TTT) untuk Tsunami Samudra Hindia 2004 (https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/img/pmelwavetraveltime.gif) | 10 |
| Gambar 10. Tsunami yang melanda Ao Nang, Thailand (Rydevik, 2005) | 10 |
| Gambar 11. Foto masjid yang menjadi satu-satunya bangunan utuh di wilayah Meulaboh (AP/Eugene Hoshiko, 2005) | 11 |
| Gambar 12. Foto perubahan Aceh ketika diterjang tsunami dan saat ini (Detik, 2014) | 12 |
| Gambar 13. Terumbu karang mengalami kerusakan setelah diterjang tsunami Aceh (Foster dkk, 2005)..... | 13 |
| Gambar 14. Pengangkatan tanah (uplift) akibat gempabumi Aceh di Pulau Karang membunuh beberapa ratus meter persegi terumbu karang (Foster dkk, 2005)..... | 13 |
| Gambar 15. Upaya mitigasi struktural pasca Gempa Aceh 2004 (ibnurusydy.com, 2008)..... | 15 |
| Gambar 16. Bangunan Museum Tsunami Aceh (Kompas, 2018) | 16 |
| Gambar 17. Peta tingkat gempa dan tsunami Nias, 28 Maret 2005 (M8,6)..... | 18 |
| Gambar 18. Perubahan lingkungan fisik Pulau Sanau. Kiri atas: Pulau Sanau sebelum gempa memperlihatkan lagoon dengan ke dua kanalnya serta rawa. Kanan atas: Pulau Sanau setelah gempa, bekas lagoon berubah menjadi danau air asin. Kiri bawah: rataan karang yang merupakan cikal bakal Pulau Uma sebelum gempa, kanan bawah: Pulau Uma, yakni pulau yang terbentuk setelah gempa (Suyarso dkk, 2018). | 19 |
| Gambar 19. Perbandingan ekosistem karang dan mangrove di Kabupaten Nias Utara, kiri: ekosistem karang dan mangrove tahun 2003 (sebelum gempa), kanan: ekosistem karang dan mangrove tahun 2015 (setelah gempa) (Suyarso dkk, 2018). | 20 |
| Gambar 20. Salah satu sudut Kota Gunungsitoli beberapa saat setelah gempa, 28 Maret 2005 (Tempo, 2019). | 20 |
| Gambar 21. Tugu Peringatan Gempa Nias, 28 Maret 2005 (infonias, 2022)..... | 21 |
| Gambar 22. Prasasti mengenang para Korban Gempa Nias, 28 Maret 2005 di lokasi pekuburan Santiong Baru, Desa Fodo, Kecamatan Gunungsitoli Selatan, Kota Gunungsitoli, Sumatera Utara (Kompas, 2016) | 21 |

| | |
|---|----|
| Gambar 23. Peta guncangan akibat gempa bumi Padang 30 September 2009 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2009mebz/)..... | 23 |
| Gambar 24. Hotel Ambacang (Dinas Perpustakaan dan Kearsipan Kota Padang, 2021) | 24 |
| Gambar 25. Monumen Gempa Padang, 30 September 2009 (Republika, 2020) | 26 |
| Gambar 26. Shelter Tsunami TES (Tempat Evakuasi Sementara) di Ulak Karang, Kota Padang, Sumatera Barat (Tempo, 2019)..... | 27 |
| Gambar 27. Papan edukasi publik di salah satu sekolah di Kota Padang | 28 |
| Gambar 28. Poster tentang siaga gempa bumi dan tsunami di salah satu sekolah di Kota Padang..... | 29 |
| Gambar 29. Papan jalur evakuasi di jalanan Kota Padang | 29 |
| Gambar 30. Pengukuhan Tsunami Ready Community di Kota Padang | 30 |
| Gambar 31. Peta guncangan gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/a00043nx/) | 33 |
| Gambar 32. Rumah dan bangunan yang hancur akibat Tsunami (BBC, 2010) | 33 |
| Gambar 33. Peta guncangan gempa bumi Banyuwangi M 7,8 pada 2 Juni 1994 menunjukkan guncangan terkuat setara V MMI (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0006djk/shakemap/intensit) | 36 |
| Gambar 34. Rumah yang mengalami kerusakan akibat diterjang gelombang tsunami dan teramati tiga gelombang berbeda ketinggian. Gelombang ketiga menyebabkan atap rumah runtuh..... | 38 |
| Gambar 35. Bangunan bambu rata dengan tanah seluruhnya di Rajekwesi. Kerusakan berat juga dialami bangunan batu bata..... | 39 |
| Gambar 36. Di Desa Pancer terdapat jejak landaan tsunami yang terekam di dinding rumah warga..... | 40 |
| Gambar 37. Di Desa Pulo Merah terdapat balok beton saluran sanitasi warga desa yang terseret arus balik gelombang tsunami. | 41 |
| Gambar 38. Rumah batu bata terletak 250 m dari garis pantai yang mengalami kerusakan akibat diterjang gelombang tsunami..... | 42 |
| Gambar 39. Peta guncangan gempa bumi Yogyakarta M 6,3 pada 27 Mei 2006 (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ej1c/shakemap/intensit). | 44 |
| Gambar 40. Kerusakan pada Bangunan Balai Pengobatan Penyakit Paru-Paru (BP4) di Bantul (Elnashai, dkk., 2006)..... | 46 |
| Gambar 41. Bangunan yang dibangun setelah masa kemerdekaan di daerah Bantul, Jetis, dan Klaten yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi Yogyakarta 2006 (Elnashai, dkk., 2006). | 46 |
| Gambar 42. Bangunan dengan struktur beton juga mengalami kerusakan karena belum sesuai dengan building code tahan gempa bumi (Elnashai, dkk., 2006)..... | 47 |
| Gambar 43. Lokasi gempa bumi utama (bintang putih) dan gempa bumi susulan (lingkaran hitam) dari USGS untuk gempa bumi selatan Jawa Barat 17 Juli 2006. Angka Romawi di bawah nama kota menunjukkan intensitas yang guncangan gempa bumi dirasakan (Mori, dkk., 2007). | 48 |

| | |
|---|----|
| Gambar 44. Peta guncangan yang akibat gempa bumi M 7,7 pada 17 Juli 2006 yang menimbulkan tsunami di Cilacap (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ensm/shakemap/intensity). | 49 |
| Gambar 45. (A) Lokasi studi lapangan di Jawa dengan indikasi terdampak tsunami akibat gempa bumi 17 Juli 2004. (B) Distribusi ketinggian dan waktu tiba tsunami pada titik pengamatan yang dipilih di sepanjang pesisir selatan Jawa. (C) Perbesaran kecamatan Pangandaran (Lavigne, dkk., 2007).... | 50 |
| Gambar 46. Kerusakan tsunami pada bangunan batu bata yang tidak diperkuat strukturnya dengan kolom yang sesuai di Pangandaran (Mori, dkk., 2007). | 52 |
| Gambar 47. Kerusakan bangunan di sekitar Pangandaran. Perhatikan atap yang rusak pada bangunan di sebelah kiri yang menandakan tingginya tsunami (Mori, dkk., 2007). | 52 |
| Gambar 48. Merencanakan jaringan broadband real-time internasional untuk Indonesia. Sembilan segitiga putih mewakili seismograf broadband yang dioperasikan oleh Indonesia. Segitiga lainnya adalah stasiun yang dipasang antara tahun 2005 dan 2007 (Mori, dkk., 2007) | 53 |
| Gambar 49. Korban Gempa “Gejer Bali” di Desa Patemon, Kabupaten Buleleng (Kompas.id, 2019) | 54 |
| Gambar 50. Peta guncangan akibat gempa bumi Bali M 6,5 pada 14 Juli 1976 (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000hbg/shakemap/intensity). | 55 |
| Gambar 51. Peta tingkat guncangan gempa Lombok, 5 Agustus 2018 | 57 |
| Gambar 52. Pemodelan Tsunami BMKG | 58 |
| Gambar 53. Observasi Tsunami di 3 Stasiun Tide Gauge di Carik (Kabupaten Lombok Utara), Lembar (Kabupaten Lombok Barat) dan Benoa (Kabupaten Badung)..... | 58 |
| Gambar 54. Kegiatan sosialisasi dan pengukuran periode dominan (Tdom) di Desa Sanggok, Lombok Tengah | 60 |
| Gambar 55. Tim BMKG melakukan koordinasi dengan BPBD Lombok Tengah mengenai daerah yang mengalami kerusakan | 60 |
| Gambar 56. Dampak gempa pada rumah warga dan bangunan perkantoran..... | 61 |
| Gambar 57. Liquefaksi pada medium pasir dengan amblesan mencapai 2,5 meter dan lebar 3 m di Kecamatan Gangga, Lombok Utara | 62 |
| Gambar 58. Hasil observasi lapangan Tim Pusgen, LIPI, ITB dan BPPT yang menemukan adanya koral mikroatoll yang terangkat di daerah pesisir Lombok Utara dan penurunan (subsidence) disertai liquefaksi di daerah Pemenang, Lombok Utara (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)..... | 63 |
| Gambar 59. Koral mikroatoll yang terangkat setinggi 37 cm akibat gempa (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018) | 63 |
| Gambar 60. Peta guncangan ini diakibatkan gempa bumi M 7,6 pada 3 Mei 2000 (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009sbh/shakemap/intensity). | 65 |
| Gambar 61. Gempa menimbulkan kerusakan pada bangunan rumah, gedung kantor dan tempat ibadah (Hiraishi dan Harada, 2000)..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Gambar 62. Dampak tsunami yang menimbulkan kerusakan pada permukiman di pesisir pantai (Hiraishi dan Harada, 2000) (http://komunitashistoriasul-teng.simplesit.com/)..... | 66 |
| Gambar 63. Peta episenter dan mekanisme sumber gempa bumi Palu-Donggala..... | 67 |
| Gambar 64. Peta guncangan (shakemap) gempa bumi Palu-Donggala. | 68 |
| Gambar 65. Pemodelan tsunami BMKG..... | 69 |
| Gambar 66. Foto udara reruntuhan masjid di antara rumah-rumah warga di Perumnas Balaroa (Republika, 2018)..... | 70 |
| Gambar 67. Hasil pengukuran tsunami di lapangan yang dilakukan oleh tim survey BMKG..... | 72 |
| Gambar 68. Wawancara tim survei BMKG dengan para saksi mata..... | 73 |
| Gambar 69. Kerusakan bangunan akibat gempa Palu-Donggala hasil survei makroseismik tim BMKG..... | 73 |
| Gambar 70. Peta lokasi episenter gempa pembuka dan gempa utama tanggal 14 dan 15 Januari 2021..... | 75 |
| Gambar 71. Peta tingkat guncangan gempa utama M6,2 (15 Januari 2021)..... | 76 |
| Gambar 72. Kegiatan sosialisasi kepada masyarakat oleh tim BMKG pasca gempa Mamuju..... | 78 |
| Gambar 73. Kerusakan bangunan akibat gempa bumi M 6,2 di Mamuju dokumentasi tim survei BMKG..... | 79 |
| Gambar 74. Skenario guncangan akibat gempa bumi Taliabu-Sula 29 November 1998 yang dimodelkan oleh USGS..... | 81 |
| Gambar 75. Peta guncangan akibat gempa bumi Biak M 8,2 pada 17 Februari 1996. | 84 |
| Gambar 76. Bangunan sekolah rusak akibat diterjang tsunami di Korim. Dinding yang menghadap ke arah pantai mengalami kerusakan berat akibat diterjang gelombang kuat (Matsutomi dkk., 2001, Imamura dkk., 1997). | 85 |
| Gambar 77. Peta pantai dari Teluk Demta, Indonesia, hingga Aitape, Papua Nugini. Tanda X menunjukkan pusat gempa yang berkembang dari kiri ke kanan, (Hurukawa dkk., 2003)..... | 87 |

PENDAHULUAN

Buku Sejarah Gempabumi Merusak dan Tsunami Indonesia adalah catatan kejadian gempabumi yang menimbulkan kerusakan, korban jiwa maupun gempabumi yang diikuti gelombang tsunami yang terjadi di wilayah Indonesia. Buku ini memuat informasi parameter gempa (magnitudo, lintang, bujur, kedalaman, waktu kejadian gempa, dan lokasi) serta dampak yang ditimbulkan (intensitas, korban jiwa dan kerusakan bangunan). Sumber informasi parameter gempa didapatkan dari rilis Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan United State Geological Survey (USGS). Sedangkan informasi dampak yang ditimbulkan diperoleh dari Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak, Katalog Tsunami Indonesia, Laporan Tim Survei Lapangan, Jurnal Ilmiah, Ulasan Media, Laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD), serta dari berbagai sumber lainnya. Untuk melengkapi laporan dampak gempa, rangkaian foto-foto kerusakan akibat gempa disertakan juga pada buku ini.

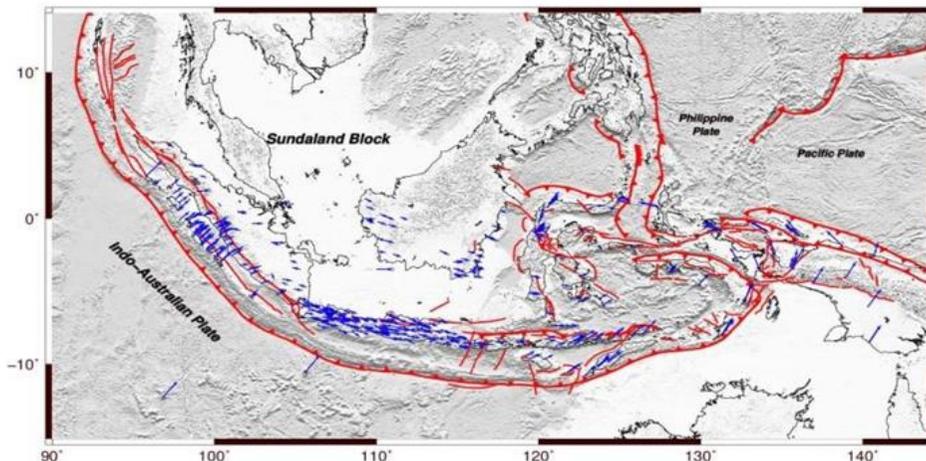
Buku ini diawali dengan penjelasan tentang tataan tektonik Indonesia dan peta aktivitas kegempaan (seismisitas) periode Tahun 2009-2022 serta dilengkapi dengan grafik kegempaan dan tsunami yang terjadi di Indonesia selama periode tertentu. Sejarah gempabumi dan tsunami dalam buku ini dikelompokkan ke dalam beberapa wilayah yaitu:

1. Wilayah Sumatera.
2. Wilayah Jawa, Bali dan Nusa Tenggara.
3. Wilayah Sulawesi.
4. Wilayah Maluku Utara.
5. Wilayah Papua.

Kejadian gempa bumi dan tsunami yang dibahas pada buku ini lebih banyak mengulas kejadian gempa bumi dan tsunami yang terjadi setelah tahun 1990, dikarenakan keterbatasan penulis dalam mencari referensi dan bukti dokumentasi.

TEKTONIK INDONESIA

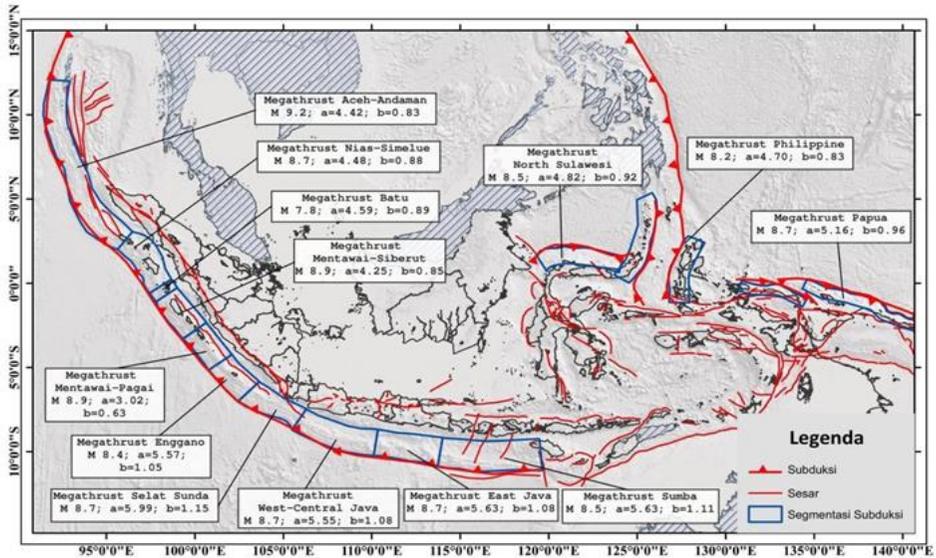
Indonesia, negara kepulauan terbesar di dunia yang terletak di antara Samudera Hindia dan Samudera Pasifik merupakan wilayah yang rawan terhadap potensi bencana alam, termasuk gempa bumi, tsunami, dan letusan gunung berapi. Kepulauan Indonesia juga terletak di zona pertemuan 4 lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, lempeng Pasifik dan lempeng mikro Filipina. Hal tersebut mengakibatkan wilayah Indonesia memiliki tatanan tektonik yang sangat kompleks, dimana gempa bumi terjadi hampir setiap hari di Indonesia.



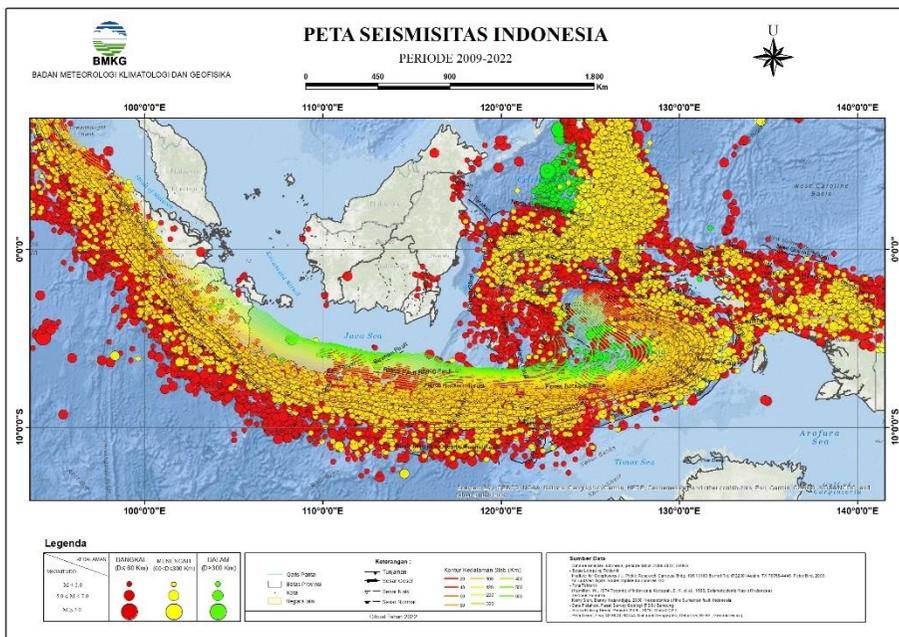
Gambar 1. Peta tektonik wilayah Indonesia dari data geodetik hingga tahun 2016 (Irsyam dkk., 2017)

Berdasarkan Buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, yang disusun oleh Tim Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen) konsekuensi dari lokasi Indonesia yang berada pada

batas 4 lempeng tektonik adalah keberadaan 13 zona megathrust dan 295 sesar aktif di wilayah Indonesia.



Gambar 2. Segmentasi dan magnitudo maksimum subduksi Indonesia (Irsyam dkk., 2017)



Gambar 3. Peta seismisitas Indonesia periode 2009-2022

Berdasarkan hasil monitoring BMKG, sejak tahun 2013 tercatat adanya tren peningkatan aktivitas gempabumi di Indonesia, dari sekitar 4.000-5.000 gempabumi per tahun menjadi lebih dari 10.000 gempabumi per tahun. Angka signifikan jumlah gempabumi pada tahun 2018 dan tahun 2019 terkait dengan beberapa kejadian gempabumi kuat dan merusak, diantaranya gempa Lombok pada 5 Agustus 2018 berkekuatan M7,0 yang tercatat memiliki 2.763 gempa susulan dan gempa Palu pada 28 September 2018 berkekuatan M7,7 yang tercatat memiliki 1.438 gempa susulan.

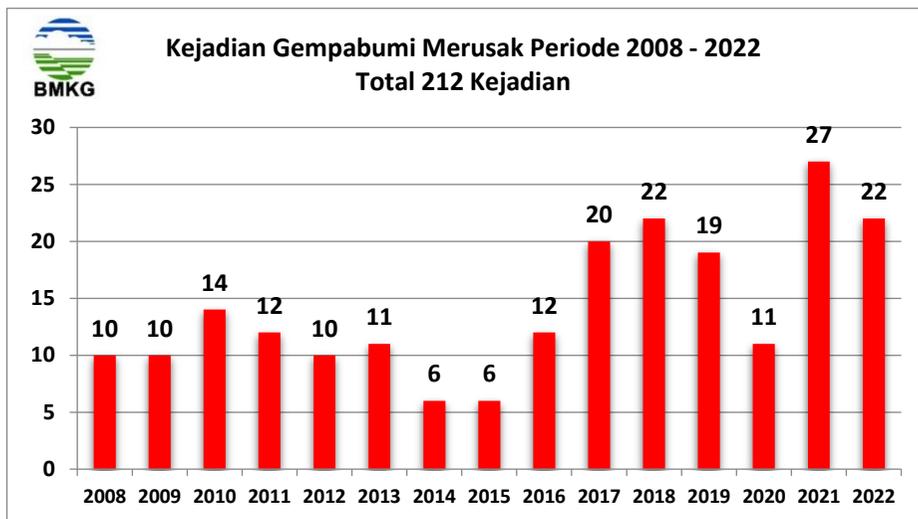


Gambar 4. Grafik gempabumi di Indonesia periode 2008-2022

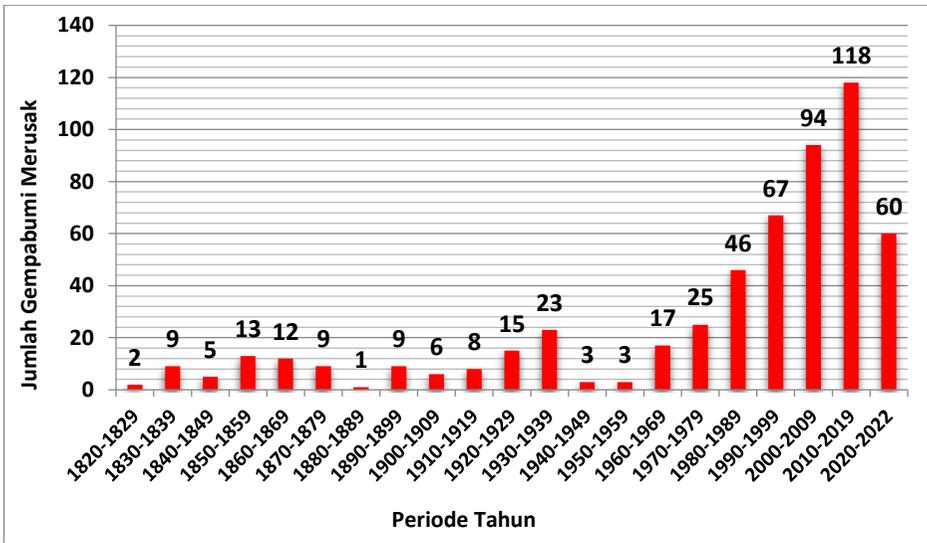
Data Katalog Gempabumi BMKG juga menunjukkan bahwa sejak tahun 1900 sudah banyak gempabumi besar serta gempabumi yang memiliki magnitudo tinggi di Indonesia, diantaranya:

- 1 gempa dengan magnitudo diatas 9, ($M \geq 9$)
- 15 gempa dengan magnitudo antara 8 dan 9, ($8 \leq M < 9$)
- 320 gempa dengan magnitudo antara 7 dan 8, ($7 \leq M < 8$)
- 2118 gempa antara magnitudo antara 6 dan 7, ($6 \leq M < 7$)

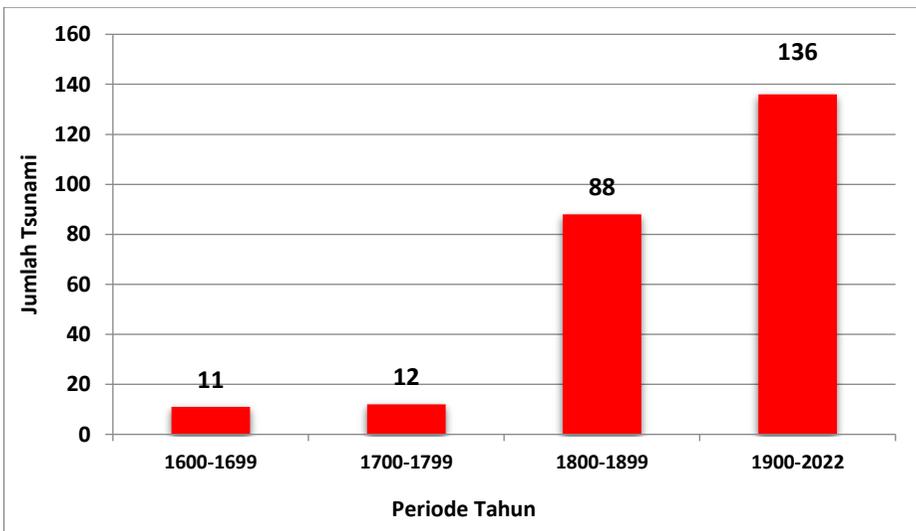
Data kejadian gempabumi merusak dan data kejadian tsunami juga terlihat mengalami tren peningkatan dari tahun ke tahun yang tentunya harus diikuti dengan peningkatan kesiapsiagaan dan kewaspadaan bagi masyarakat.



Gambar 5. Grafik gempabumi merusak di Indonesia periode 2008-2022



Gambar 6. Grafik gempabumi merusak per dekade di Indonesia periode 1820-2022



Gambar 7. Grafik kejadian tsunami per abad di Indonesia periode 1600-2022

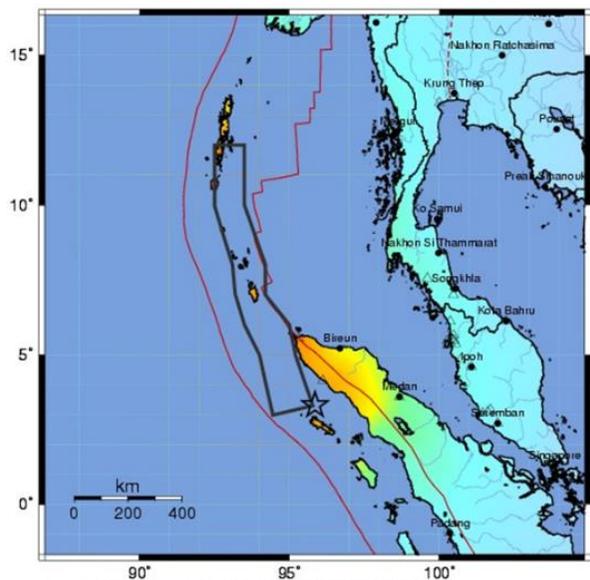
I. Wilayah Sumatera

A. Gempabumi dan Tsunami Aceh, 26 Desember 2004 (M9,1)

Gempabumi Aceh 2004 terjadi pada hari Minggu, 26 Desember 2004, pukul 07:58:53 WIB. Pusat gempa berada pada koordinat 3,295 LU; 95,982 BT (berlokasi di laut 160 km sebelah utara pulau Simeulue) pada kedalaman 30 km. Gempa tersebut berkekuatan M9,1 dan merupakan gempa terbesar ketiga di dunia sepanjang sejarah (Weeks, 2011). Gempa Aceh 2004 terjadi akibat tumbukan lempeng tektonik pada zona subduksi. Lempeng Indo-Australia yang bergerak dengan kecepatan 50 mm/tahun menumbuk bagian dari lempeng Eurasia (Natawidjaja, 2007). Gempa tektonik yang memicu Tsunami Aceh 2004 ini diketahui tidak terjadi dengan tiba-tiba, melainkan melalui proses terjadinya gempa pembuka (*foreshocks*) yang sudah muncul sejak tahun 2002, saat terjadi gempa Simeulue dengan magnitudo M7,0 pada 2 November 2002. Sejak itu terjadilah serangkaian gempa kecil yang merupakan gempa pendahuluan hingga akhirnya terjadi gempabumi utama pada 26 Desember 2004 yang berkekuatan M9,1.

Guncangan gempabumi dilaporkan memiliki durasi yang cukup lama dan dirasakan sangat luas bahkan sampai ke wilayah India dan Bangladesh. Beberapa wilayah di Sumatera yang tercatat mengalami dampak guncangan paling kuat, diantaranya di Banda Aceh dengan skala intensitas VII-VIII MMI, Sinabang (P. Simeulue) VII-VIII MMI, Gunungsitoli VI MMI, Medan IV MMI, dan Parapat II-III MMI.

USGS ShakeMap : 154 miles SSE of Banda Aceh, Sumatera, Indonesia
 Sun Dec 26, 2004 12:58:53 AM GMT M 9.0 N3.32 E95.85 Depth: 30.0km ID:slav

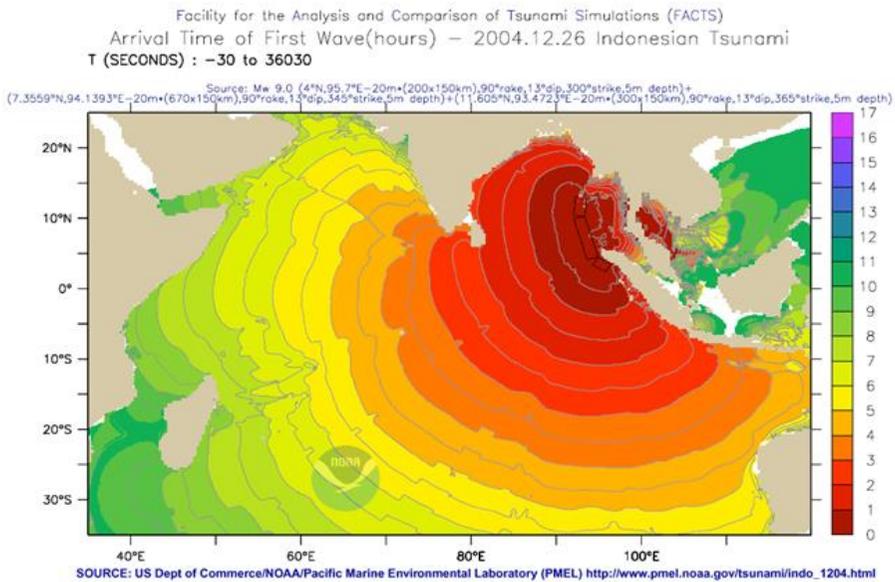


Processed: Mon Apr 4, 2005 12:04:01 PM PDT. -- NOT REVIEWED BY HUMAN

| PERCEIVED SHAKING | Not felt | Weak | Light | Moderate | Strong | Very strong | Severe | Violent | Extreme |
|------------------------|----------|---------|---------|------------|--------|-------------|----------------|---------|----------------|
| POTENTIAL DAMAGE | none | none | none | Very light | Light | Moderate | Moderate/Heavy | Heavy | Very Heavy |
| PEAK ACC (%g) | <.17 | .17-1.4 | 1.4-3.9 | 3.9-9.2 | 9.2-18 | 18-34 | 34-65 | 65-124 | >124 |
| PEAK VEL (cm/s) | <0.1 | 0.1-1.1 | 1.1-3.4 | 3.4-8.1 | 8.1-16 | 16-31 | 31-60 | 60-116 | >116 |
| INSTRUMENTAL INTENSITY | I | II-III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X _s |

Gambar 8. Peta tingkat guncangan gempa Aceh, 26 Desember 2004
 (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/slav/>)

Gempabumi ini juga mengakibatkan terjadi gelombang tsunami yang menyapu sebagian besar wilayah pantai di Aceh dan beberapa wilayah pantai di Thailand, India sampai Afrika. Gelombang dengan tinggi maksimum 50,9 meter terjadi di 18 garis pantai di 18 negara diantaranya Bangladesh, India, Malaysia, Myanmar, Thailand, Singapura, dan Maladewa bahkan sampai ke Madagaskar dan Afrika Selatan, dengan Banda Aceh sebagai daerah dengan kerusakan terparah (Telford, 2006).



Gambar 9. Peta Tsunami Travel Time (TTT) untuk Tsunami Samudra Hindia 2004 (<https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/img/pmelwavetraveltime.gif>)



Gambar 10. Tsunami yang melanda Ao Nang, Thailand (Rydevik, 2005)

Gempabumi dan tsunami Aceh menyebabkan korban tewas hingga 227.899 orang yang tercatat, dengan korban jiwa di

Indonesia sebanyak 167.540 orang, Sri Lanka sebanyak 35.322 orang, India sebanyak 16.269 orang, dan Thailand sebanyak 8.212 orang, selain itu sebanyak 14.100 orang dilaporkan hilang serta 1.7 juta orang dilaporkan mengungsi (USGS, 2012). Gelombang tsunami tidak hanya merenggut nyawa penduduk namun juga menyebabkan kerusakan serius baik pada ekosistem laut serta pada lingkungan yang membentang di sepanjang garis pantai (Foster dkk, 2005). Dilaporkan juga sebanyak 139.000 rumah warga, 2.224 unit fasilitas pendidikan, 693 unit fasilitas kesehatan, 3.000 km jalan, 17 unit pelabuhan laut dan berbagai infrastruktur lainnya mengalami kerusakan (Meisl dkk, 2006).



Gambar 11. Foto masjid yang menjadi satu-satunya bangunan utuh di wilayah Meulaboh (AP/Eugene Hoshiko, 2005)



Gambar 12. Foto perubahan Aceh ketika diterjang tsunami dan saat ini (Detik, 2014)



Gambar 13. Terumbu karang mengalami kerusakan setelah diterjang tsunami Aceh (Foster dkk, 2005)



Gambar 14. Pengangkatan tanah (*uplift*) akibat gempa bumi Aceh di Pulau Karang membunuh beberapa ratus meter persegi terumbu karang (Foster dkk, 2005)

Beberapa ilmuwan memperkirakan bahwa Gempabumi Aceh juga telah meningkatkan aktivitas beberapa gunung berapi yang berada di sekitar Aceh dan Medan. Gunung Leuser di Aceh, aktivitas kawah gunung api purba di Danau Toba, Sumatera Utara serta gunung lumpur dekat Baratang, Kepulauan Andaman menjadi aktif pada 28 Desember 2004. Para ahli geologi juga memperkirakan bahwa letusan Gunung Talang pada bulan April 2005 ada hubungannya dengan Gempabumi Aceh 2004.

Setelah Tsunami Aceh, bantuan dari berbagai negara dan organisasi non pemerintah di seluruh dunia datang ke Aceh untuk membantu Aceh bangkit kembali. Pemerintah Indonesia membentuk Badan Rehabilitasi dan Rekonstruksi Aceh–Nias (BRR NAD-Nias) pada tanggal 28 April 2005, 4 bulan setelah tsunami terjadi. Badan ini berkoordinasi dengan UN (*United Nation*) dan Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) lainnya untuk pemulihan dan membangun kembali Aceh dan Nias pasca tsunami.

Menurut laporan, setahun setelah gempa dan tsunami terjadi, ada sekitar 50.000 korban tsunami yang masih tinggal di barak dan 67.000 orang masih berada di tenda-tenda. Setelah empat tahun BRR dan LSM lainnya bekerja di Aceh dan Nias, mereka sukses membangun lebih dari 100.000 rumah untuk korban tsunami dan kantor publik lainnya. Di negara-negara yang terkena dampak lainnya, LSM juga memberikan bantuan lokal dan internasional dalam pemulihan dan membangun kembali rumah-rumah dan bangunan publik.

Dalam upaya mitigasi bencana tsunami, pemerintah bersama LSM melakukan sosialisasi penanaman hutan mangrove. Di Aceh, hutan mangrove memiliki potensi sekitar 150.000 hektar hutan di sepanjang pantai. Pemerintah juga membuat tembok pemecah ombak di sepanjang pantai. Dekat ke daerah pantai, BRR dan pemerintah daerah membuat gedung evakuasi. Di jalan sekitar gedung tempat evakuasi, ada papan informasi zona bahaya tsunami dan papan arah jalur evakuasi menuju ke bangunan dan tempat yang tinggi. Selanjutnya untuk mengenang korban Tsunami Aceh, pada bulan Februari 2008 diresmikan monumen dan museum tsunami di Aceh. Museum tersebut dirancang sebagai pengingat simbolis bencana Gempa dan Tsunami Samudra Hindia 2004, serta sebagai pusat pendidikan dan tempat penampungan bencana darurat jika daerah tersebut terkena oleh tsunami lagi.



Gambar 15. Upaya mitigasi struktural pasca Gempa Aceh 2004 (ibnurusydy.com, 2008)



Gambar 16. Bangunan Museum Tsunami Aceh (Kompas, 2018)

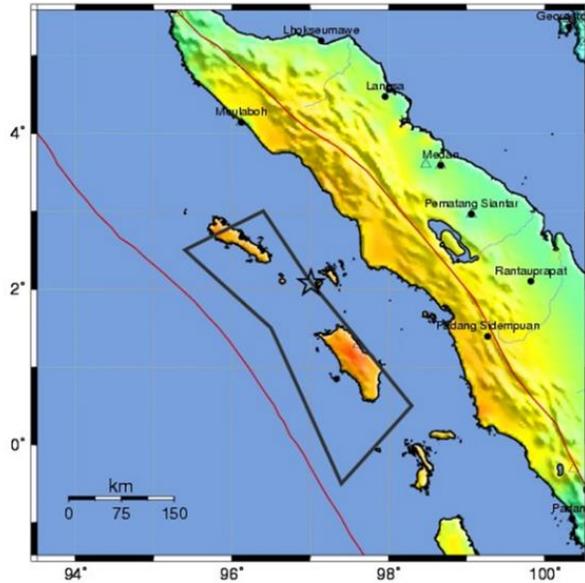
B. Gempabumi dan Tsunami Nias, 28 Maret 2005 (M8,6)

Gempa kuat terjadi di perairan antara Pulau Nias, Sumatera Utara dan Pulau Simeulue, Nanggroe Aceh Darussalam, pada 28 Maret 2005, pukul 23:09:36 WIB saat sebagian besar masyarakat sudah beristirahat. Gempa tersebut menyebabkan kepanikan luar biasa pada warga di sebagian besar wilayah Medan dan Banda Aceh.

Berdasarkan rilis resmi BMKG, gempa tersebut memiliki kekuatan M8,6 dan berpusat di laut pada koordinat 2,085 LU; 97,108 BT dengan kedalaman 30 km. Guncangan gempa dirasakan sangat luas bahkan sampai ke Kepulauan Andaman dan Nicobar serta India dan Sri Lanka yang berjarak lebih dari 1000 km dari pusat gempa. Kecamatan Gunungsitoli merupakan wilayah yang merasakan guncangan paling kuat yaitu sekitar VIII MMI, selanjutnya di Teluk Dalam, Nias sekitar VII MMI, Banda Aceh VI MMI, Medan, Padang dan Palembang V MMI, Jambi IV MMI, dan Bengkulu III MMI. Gempa juga dilaporkan dirasakan di beberapa negara tetangga seperti di Malaysia, Thailand (Bangkok dan Phuket), serta Singapura dan Maladewa sekitar III-IV MMI (USGS, 2009). Pasca gempa ini saluran listrik dan telekomunikasi di sejumlah wilayah terutama Medan dan Banda Aceh dilaporkan terputus.

Gempa Nias 2005 terjadi akibat tumbukan lempeng tektonik pada zona subduksi. Lempeng Indo-Australia yang bergerak dengan kecepatan 50 mm/tahun menumbuk bagian dari lempeng Eurasia dengan mekanisme pergerakan naik (*thrust fault*).

USGS ShakeMap : 126 miles WNW of Sibolga, Sumatera, Indonesia
 Mon Mar 28, 2005 04:09:36 PM GMT M 8.7 N2.08 E97.01 Depth: 30.0km ID:weax



Processed: Wed Mar 30, 2005 10:32:20 AM PST, -- NOT REVIEWED BY HUMAN

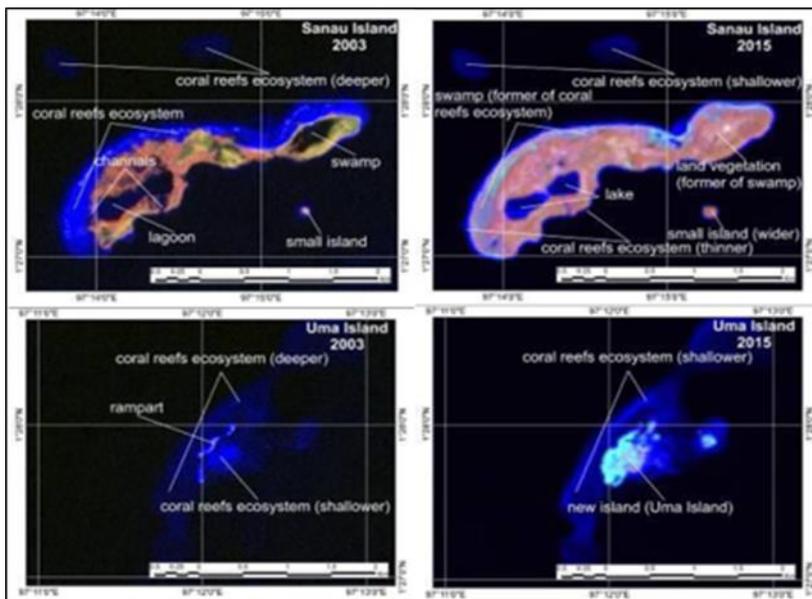
| PERCEIVED SHAKING | Not felt | Weak | Light | Moderate | Strong | Very strong | Severe | Violent | Extreme |
|------------------------|----------|---------|---------|------------|--------|-------------|----------------|---------|------------|
| POTENTIAL DAMAGE | none | none | none | Very light | Light | Moderate | Moderate/Heavy | Heavy | Very Heavy |
| PEAK ACC (%g) | <.17 | .17-1.4 | 1.4-3.9 | 3.9-9.2 | 9.2-18 | 18-34 | 34-65 | 65-124 | >124 |
| PEAK VEL (cm/s) | <0.1 | 0.1-1.1 | 1.1-3.4 | 3.4-8.1 | 8.1-16 | 16-31 | 31-60 | 60-116 | >116 |
| INSTRUMENTAL INTENSITY | I | II-III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |

Gambar 17. Peta tingkat gempa dan tsunami Nias, 28 Maret 2005 (M8,6)
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/weax/>

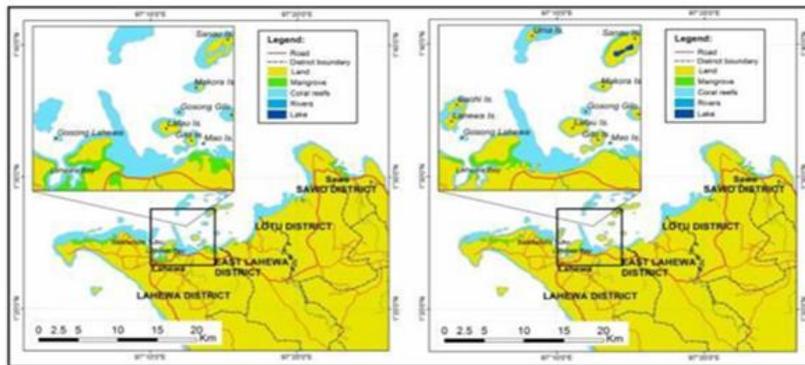
Beberapa wilayah pesisir di sekitar pusat gempa dilaporkan sempat diterjang gelombang tsunami beberapa saat setelah gempa terjadi. Tsunami setinggi 3 meter merusak Pelabuhan dan Bandara di Simeulue, di pantai barat Nias gelombang tsunami teramati setinggi 2 meter dan di Singkil serta Meulaboh tsunami dilaporkan menerjang dengan ketinggian sekitar 1 meter. Gelombang tsunami tercatat pula di beberapa stasiun pasang surut di beberapa wilayah diantaranya sekitar 40 cm di Panjang, Indonesia; sekitar 25 cm di Kolombo, Sri Lanka; 40 cm di Hanimadu, 18 cm di Male dan 10 cm di Gan, Maldives. Dampak

gempa tersebut menyebabkan adanya wilayah yang mengalami penurunan dan pengangkatan tanah (di Kepulauan Banyak dan Simeulue) (USGS, 2009).

Gempa juga dilaporkan menyebabkan ratusan hektar ekosistem terumbu karang terangkat menjadi daratan, banyak karang mati karena kekeringan dan runtuh karena getaran gempa. Demikian pula mangrove berpindah menjauhi garis pantai karena proses pengangkatan daratan, sebagian besar perlahan mati kekeringan sedangkan sebagian dapat bertahan dan berkembang menuju ke arah garis pantai (Suyarso dkk, 2018).



Gambar 18. Perubahan lingkungan fisik Pulau Sanau. Kiri atas: Pulau Sanau sebelum gempa memperlihatkan lagoon dengan ke dua kanalanya serta rawa. Kanan atas: Pulau Sanau setelah gempa, bekas lagoon berubah menjadi danau air asin. Kiri bawah: rataan karang yang merupakan cikal bakal Pulau Uma sebelum gempa, kanan bawah: Pulau Uma, yakni pulau yang terbentuk setelah gempa (Suyarso dkk, 2018).



Gambar 19. Perbandingan ekosistem karang dan mangrove di Kabupaten Nias Utara, kiri: ekosistem karang dan mangrove tahun 2003 (sebelum gempa), kanan: ekosistem karang dan mangrove tahun 2015 (setelah gempa) (Suyarso dkk, 2018).

Pada awalnya pemerintah memperkirakan korban mencapai 2.000 orang. Namun data resmi dari BPBD Kab. Nias dan Nias Selatan melaporkan bahwa, ada 1.150 orang meninggal, 6.278 orang terluka (luka ringan hingga luka berat), dan 45.517 orang mengungsi. Selain itu sebanyak 701 unit fasilitas pendidikan, 106 unit fasilitas kesehatan, 1.852 unit fasilitas ibadah 679 unit gedung perkantoran serta 188 jembatan dilaporkan mengalami kerusakan.



Gambar 20. Salah satu sudut Kota Gunungsitoli beberapa saat setelah gempa, 28 Maret 2005 (Tempo, 2019).



Gambar 21. Tugu Peringatan Gempa Nias, 28 Maret 2005 (infonias, 2022)



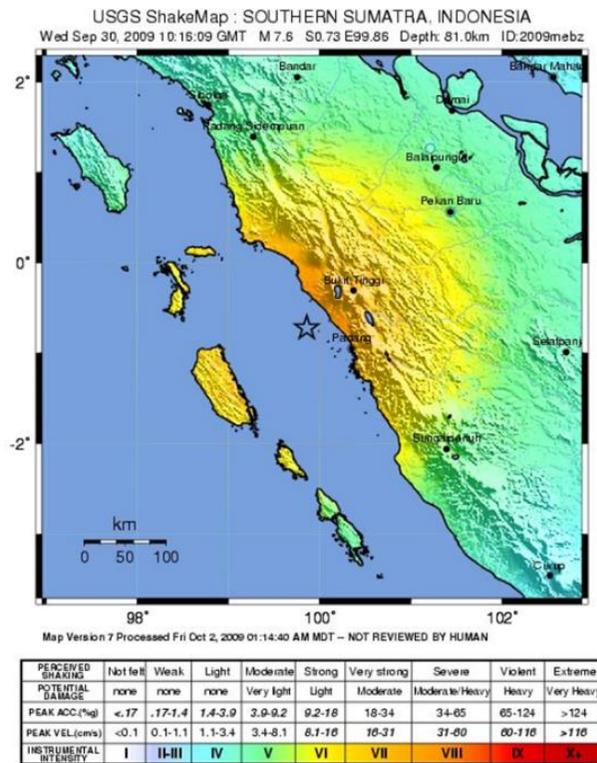
Gambar 22. Prasasti mengenang para Korban Gempa Nias, 28 Maret 2005 di lokasi pekuburan Santiong Baru, Desa Fodo, Kecamatan Gunungsitoli Selatan, Kota Gunungsitoli, Sumatera Utara (Kompas, 2016)

C. Gempabumi Padang, 30 September 2009 (M7,6)

Gempabumi Padang terjadi pada tanggal 30 September 2009 pada pukul 17:16:10 WIB dengan kekuatan M7,6. Pusat gempa berada di lepas pantai Sumatera Barat, sekitar 50 km barat laut Kota Padang. Energi seismik yang dikeluarkannya sungguh kuat, guncangannya terasa sampai ke Singapura, Malaysia, Thailand dan juga di Jakarta. Kota Padang merupakan wilayah yang paling kuat merasakan guncangan gempa yaitu sekitar VI-VII MMI, di Sibolga dan Gunungsitoli dirasakan sekitar VI MMI, Bukittinggi, Tapanuli Selatan, Mukomuko dan Liwa sekitar III-IV MMI serta Jakarta II MMI. Selain itu guncangan gempa juga dilaporkan terasa hingga ke Singapura dan Malaysia sekitar II-III MMI. Berdasarkan catatan tide gauge, tsunami lokal dengan ketinggian gelombang 27 cm dilaporkan teramati di Padang dan 7 cm di Tuapejat (USGS, 2010).

Besarnya kekuatan gempa mengakibatkan banyak bangunan runtuh di Kota Padang, termasuk gedung-gedung pemerintahan. Selain itu, dilaporkan bahwa sebanyak 65 bangunan tua yang termasuk bangunan cagar budaya di Kota Padang juga rusak dan runtuh. Dilaporkan banyak orang yang tidak sempat menyelamatkan diri dan meninggal akibat tertimpa reruntuhan bangunan atau tertimbun longsor tanah (Tempo, 2009). Di beberapa wilayah di Sumatera Barat seperti Kabupaten Padang Pariaman, Kabupaten Pesisir Selatan, Kota Pariaman, Kota Bukittinggi, Kota Padangpanjang, Kabupaten Agam, Kota Solok, dan Kabupaten Pasaman Barat dilaporkan banyak penduduk

yang menjadi korban gempa dan meninggal dunia (Kompas, 2009).



Gambar 23. Peta guncangan akibat gempa bumi Padang 30 September 2009 (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2009mebz/>)

Selain menghadapi ketakutan akan gempa bumi susulan, warga juga harus menghadapi ketakutan lain akibat hujan deras yang mengguyur di beberapa wilayah dan gelapnya malam karena listrik padam di seluruh kawasan terdampak gempa. Bandar Udara Internasional Minangkabau dilaporkan sempat ditutup selama beberapa hari akibat kerusakan pada beberapa bagian bandara serta akibat terputusnya jaringan listrik.



Gambar 24. Hotel Ambacang (Dinas Perpustakaan dan Kearsipan Kota Padang, 2021)

Terputusnya jalur telepon akibat gempa juga mempersulit komunikasi ke daerah bencana. Hal tersebut membuat informasi tentang seberapa besar kerusakan akibat gempa menjadi terhambat. Dalam sisi evakuasi korban, minimnya alat berat untuk membongkar reruntuhan membuat tim evakuasi sulit melakukan penyisiran korban.

Berdasarkan Katalog Gempabumi BMKG, Gempabumi Padang 2009 bukanlah bencana baru di Sumatera Barat. Beberapa tahun sebelum Gempa 30 September 2009, Sumatera Barat telah beberapa kali diguncang gempabumi signifikan. Sejak tahun 2005 hingga tahun 2009, BMKG mencatat bahwa wilayah Sumatera Barat telah 14 kali diguncang gempabumi besar. Diantaranya, gempa Bukittinggi pada 6 Maret 2007 (M6,4) yang menyebabkan

67 orang meninggal dan 43.719 rumah rusak, Gempa Mentawai 12 September 2007 (M7,7) serta Gempa Painan 25 Februari 2008 (M7,0) yang menyebabkan beberapa rumah dilaporkan rusak di Sikakap. Menurut catatan ahli gempa, wilayah Sumatera Barat memiliki siklus 200 tahunan gempa besar yang pada awal abad ke-21 telah memasuki masa berulangnya siklus (McCloskey, dkk. 2010).

Menurut data Satkorlak PB Sumatera Barat, sebanyak 1.195 orang tewas akibat gempa yang tersebar di beberapa Kabupaten/Kota di Sumatera Barat, korban luka berat mencapai 1.214 orang, luka ringan 1.688 orang, korban hilang 1 orang. Padang Pariaman menjadi Kota dengan korban jiwa terbanyak yaitu 666 orang, diikuti Kota Padang sebanyak 393 orang, Kabupaten Agam 81 orang, Kota Pariaman 48 Orang, dan Kabupaten Pesisir Selatan 11 orang. Dilaporkan juga sebanyak 119.005 rumah rusak berat, 73.733 rumah rusak sedang, dan 78.802 rumah rusak ringan.

Peristiwa gempa dahsyat tersebut tentu tak cukup diwariskan dengan tradisi lisan tapi juga dikenang dengan dibangunnya sebuah tugu monumen. Monumen Gempa 30 September 2009 telah diresmikan oleh Pemerintah Kota Padang pada 30 September 2010 bersamaan dengan peresmian Museum Gempa 30 September 2009. Selain itu di depan tugu itu terdapat tugu lainnya yang berisikan nama-nama korban gempa asal Kota Padang sebanyak 393 nama.



Gambar 25. Monumen Gempa Padang, 30 September 2009 (Republika, 2020)

Sejumlah upaya mitigasi dan antisipasi ke depan terus dilakukan oleh pemerintah Kota Padang. Hal itu mengingat berdasarkan hasil penelitian masih ada ancaman gempa *Megathrust* Mentawai yang hingga saat ini belum mengeluarkan energi.

Saat ini terdapat tiga bangunan tinggi sebagai tempat evakuasi sementara yang berlokasi di Ulak Karang, Parupuk Tabing dan Tabing yang dengan daya tampung sekitar 5.000 jiwa per lokasi. Tak hanya itu hampir semua bangunan sekolah yang hancur akibat gempa tahun 2009 dibangun ulang dengan bantuan dari Pemerintah Jepang dan memiliki fungsi ganda, selain sebagai tempat belajar mengajar juga dapat difungsikan sebagai tempat evakuasi sementara. Saat ini terdapat sekitar 70 bangunan yang bisa digunakan sebagai tempat evakuasi sementara bagi warga. Kemudian sebagai petunjuk bagi warga jika gempabumi dan tsunami terjadi, telah dipasang papan jalur evakuasi di 700 lokasi

di Kota Padang. Papan jalur evakuasi tersebut menunjukkan arah ke tempat evakuasi terdekat.



Gambar 26. Shelter Tsunami TES (Tempat Evakuasi Sementara) di Ulak Karang, Kota Padang, Sumatera Barat (Tempo, 2019)

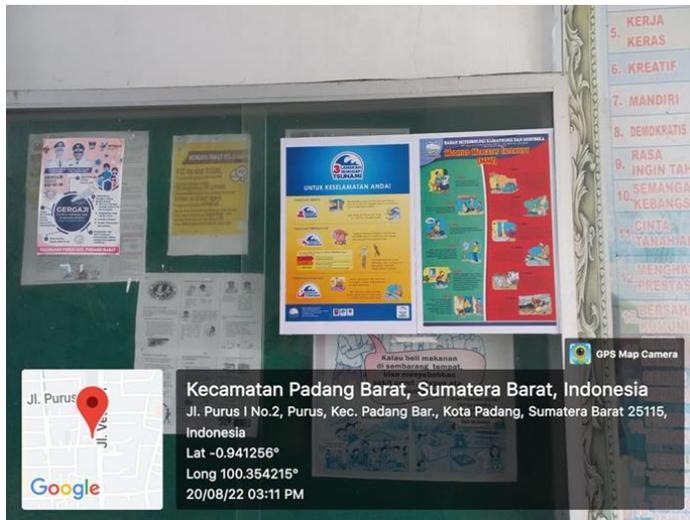
Di samping itu dalam lima tahun terakhir BPBD Kota Padang telah memperbanyak penyebarluasan informasi kepada masyarakat tentang apa yang harus dilakukan jika gempa bumi dan tsunami terjadi. Ada 30 baliho kecil yang disiapkan di berbagai tempat mulai dari lokasi wisata, sekolah dan persimpangan berisi informasi apa yang harus dilakukan saat gempa.



Gambar 27. Papan edukasi publik di salah satu sekolah di Kota Padang

BPBD Kota Padang juga membuat poster tentang siaga bencana yang dibagikan kepada masyarakat hingga penyuluhan kepada 150 sekolah dari 400 sekolah yang berada di zona rawan. Untuk penanda wilayah aman dari tsunami juga telah dibuat tulisan *tsunami safe zone* dengan latar biru di 22 jalan yang ada di Kota Padang.

Dengan adanya penanda ini masyarakat bisa memperkirakan apakah sudah berada di daerah yang aman atau masih perlu melakukan evakuasi ke tempat yang lebih tinggi. BPBD juga menggandeng kelompok siaga bencana untuk mensosialisasikan upaya mitigasi bencana kepada masyarakat.



Gambar 28. Poster tentang siaga gempa bumi dan tsunami di salah satu sekolah di Kota Padang



Gambar 29. Papan jalur evakuasi di jalanan Kota Padang

Sebagai wujud kesungguhan masyarakat Kota Padang dalam upaya mitigasi dan kesiapsiagaan menghadapi ancaman gempa bumi dan tsunami, pada pertengahan tahun 2022 sebanyak 2 (dua) Kelurahan di Kota Padang yaitu Kelurahan Purus dan Kelurahan Lolong Belanti mengajukan diri sebagai masyarakat siaga tsunami tingkat Internasional dan pada tanggal 26 Desember 2022 berbarengan dengan Apel Kesiapsiagaan Bencana Kota Padang, kedua Kelurahan tersebut secara resmi mendapat pengakuan Internasional sebagai *Tsunami Ready Community* dari Unesco.



Gambar 30. Pengukuhan Tsunami Ready Community di Kota Padang

D. Tsunami Mentawai, 25 Oktober 2010 (M7,2)

Gempa tektonik berkekuatan M7,2 (USGS M7,7) melanda Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat pada 25 Oktober 2010, gempabumi yang memicu gelombang tsunami ini terjadi pada Kamis malam pukul 21:42:20 WIB. Pusat gempa berada di 78 kilometer sebelah barat Kecamatan Pagai Selatan, Kepulauan Mentawai dengan kedalaman 10 kilometer. Guncangan gempa dirasakan di Pagai Selatan sekitar VI-VII MMI, Kota Padang dan Pariaman III-IV MMI, Sungai Penuh dan Bengkulu III MMI, serta di Kepahiang II MMI.

Gempabumi Mentawai terjadi akibat pensesaran naik tumbukan lempeng tektonik Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia dengan mekanisme pergerakan naik (*thrust fault*).

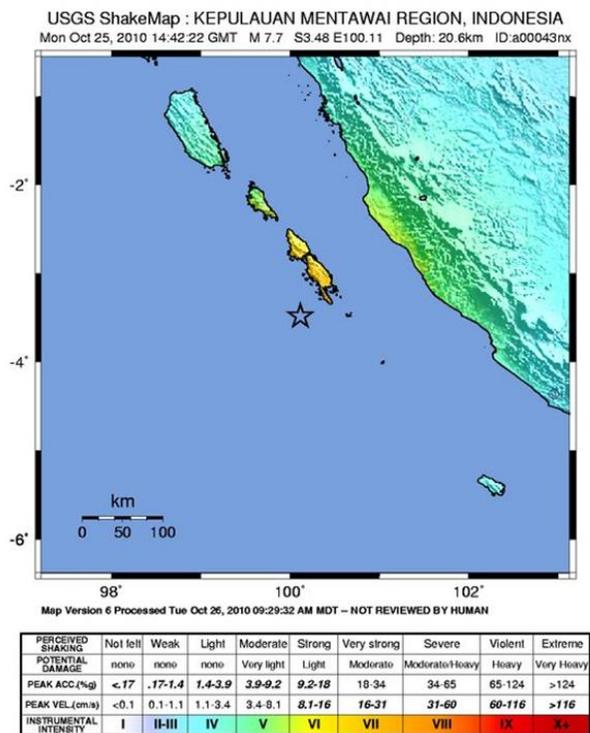
Berdasarkan Katalog Tsunami BMKG, beberapa Desa di Kecamatan Pagai Utara, Pagai Selatan dan Pulau Sipora dilanda tsunami dengan tinggi *run-up* berkisar antara 5-9 meter, di Dusun Purourougat 7,39 m, Muntei Kecil 6,38 m, Muntei Baru-baru 5,73 m, Asahan 9,3 m, Maonai 6,9 m, Sabeu Gunggung 7,0 m, Muntei 8,8 m, Macaroni 5,4 m, dan Tumalei 6,1 m. Landaan inondasi yang terukur di Dusun Purourougat dilaporkan sekitar 420 meter, Muntei Kecil 290 meter dan Muntei Baru-baru 406 meter. Di Sikakap dilaporkan air laut sempat menggenangi jalan desa setinggi mata kaki.

Gempabumi dan Tsunami Mentawai memiliki karakteristik guncangan yang tidak terlalu kuat, namun mengayun dan dirasakan dalam waktu yang cukup lama. Saat kejadian,

mayoritas warga tengah beristirahat dan tidur setelah seharian beraktivitas. Dua hal tersebut kemungkinan menjadi penyebab banyaknya korban jiwa pada kejadian gempa yang diikuti gelombang tsunami tersebut. Ratusan orang tewas tersapu gelombang tsunami karena tidak sempat menyelamatkan diri.

Menurut saksi mata (Pak Freddy) setelah merasakan guncangan yang lemah mengayun malam itu, dia segera keluar rumah. Namun di luar sepi tidak ada kerusakan dan tidak ada seorang pun yang keluar rumah. Beberapa saat setelah masuk lagi ke dalam rumah, dia melihat adanya *stop press* peringatan dini tsunami BMKG terhadap gempabumi yang baru saja dia rasakan dari salah satu stasiun televisi. Lalu ia segera bergegas keluar rumah dan memberitahu tetangga lainnya. Tetapi tidak lama kemudian gelombang tsunami datang dan menyapu apa saja yang dilewatinya. Dari uraian saksi mata ini dapat disimpulkan bahwa Tsunami Mentawai memiliki waktu tiba dari 10 menit.

Berdasarkan laporan dari BNPB dan Pusdalops PB Sumatera Barat, Gempabumi dan Tsunami Mentawai menyebabkan sekitar 509 orang meninggal dunia, 17 orang luka-luka, 412 orang dilaporkan hilang, serta sekitar 11.425 warga harus tinggal di pengungsian. Jumlah rumah rusak dilaporkan sebanyak 1.269 unit (879 unit rusak berat, 116 unit rusak sedang, 274 unit rusak ringan). Selain itu sejumlah sarana umum seperti jalan, jembatan, fasilitas kesehatan, tempat ibadah, gedung perkantoran juga dilaporkan mengalami kerusakan.



Gambar 31. Peta guncangan gempa bumi Mentawai 25 Oktober 2010 (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/a00043nx/>)



Gambar 32. Rumah dan bangunan yang hancur akibat Tsunami (BBC, 2010)

Kerusakan dan kerugian yang ditimbulkan akibat tsunami di Kabupaten Kepulauan Mentawai, ditaksir mencapai Rp 348,92 miliar. Kerusakan dan kerugian terbesar terjadi pada sektor ekonomi yang mencapai total Rp 117,82 miliar, disusul sektor perumahan dengan total Rp 115,82 miliar dan lintas sektor dengan total Rp 79,44 miliar (Republika, 2011).

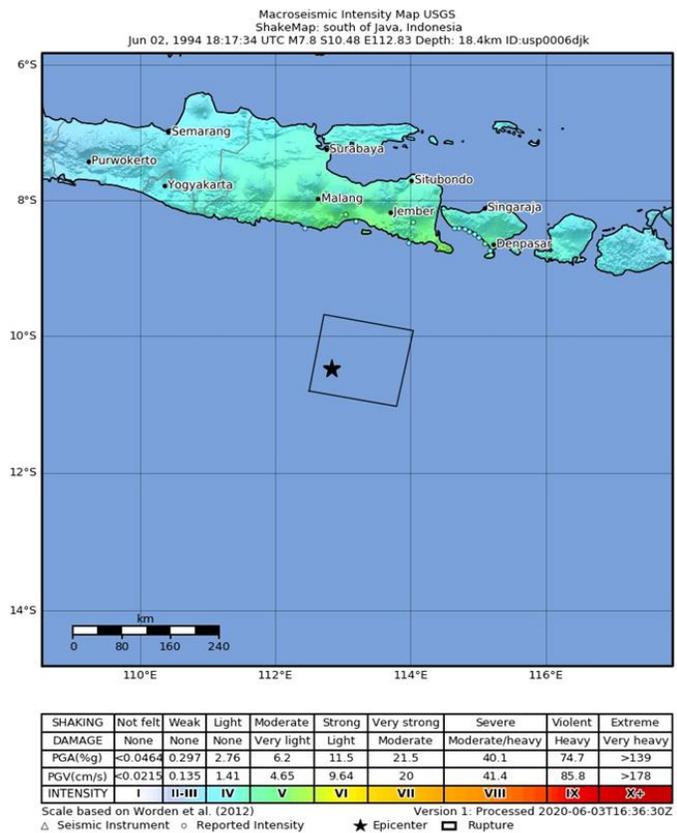
Tidak adanya pemahaman masyarakat tentang tsunami seperti apa yang dimiliki oleh masyarakat Simeulue, Aceh melalui kearifan lokalnya yaitu smong, juga mendukung mengapa kemudian masyarakat tak mampu menyelamatkan diri mereka sesaat setelah terjadinya gempa.

Fenomena smong yang telah menyelamatkan puluhan ribu masyarakat Simeulue seakan menjadi antitesis dari teknologi sistem peringatan dini yang telah dikembangkan. Smong merupakan kata sandi yang dipahami bersama oleh seluruh penduduk di Pulau Simeulue untuk menggambarkan terjadinya gelombang pasang setelah terjadinya gempa besar. Mereka bukan hanya memahami kata tersebut saja, tetapi juga mereka memahami tindakan apa yang harus dilakukan apabila peristiwa tersebut terjadi.

II. Wilayah Jawa dan Bali

A. Gempabumi dan Tsunami Banyuwangi, 3 Juni 1994 (M7,8)

Terjadi gempabumi kuat dengan kekuatan Mw 7.8 (Dziewonski dkk., 1995) yang terjadi di selatan Pulau Jawa pada 3 Juni 1994 pukul 01:17:54 WIB dengan karakteristik yang tidak biasa. Pertama, gempabumi ini adalah gempabumi dengan mekanisme naik pada kedalaman dangkal di zona subduksi yang didominasi gempabumi dengan mekanisme turun berdasarkan katalog tensor momen Harvard tahun 1976 hingga 2000 (Dziewonski dkk., 1981; Dziewonski and Woodhouse, 1983; Dziewonski et al., 1995). Kedua, meski gempabumi utama dangkal dengan mekanisme naik, seluruh gempabumi susulan memiliki mekanisme turun (Abercrombie dkk., 2001). Ketiga, gempabumi ini diidentifikasi sebagai *tsunami earthquake* (Newman dan Okal, 1998; Polet dan Kanamori, 2000) karena gelombang tsunami yang ditimbulkan lebih tinggi jika dibandingkan dengan magnitudo gempabumi tersebut. Kejadian gempabumi ini tidak menimbulkan guncangan kuat yang dirasakan oleh masyarakat dan tidak banyak laporan kerusakan akibat guncangan gempabumi (Gambar 32). Hal ini disebabkan laju pelepasan momen seismik tumbuh secara monoton sampai setidaknya 270 detik (Synolakis, dkk., 1995). Akibatnya, masyarakat tidak mengetahui jika bahaya tsunami mengancam beberapa saat kemudian.



Gambar 33. Peta guncangan gempa bumi Banyuwangi M 7,8 pada 2 Juni 1994 menunjukkan guncangan terkuat setara V MMI (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0006djk/shakemap/intensiti>)

Tsunami ini menewaskan lebih dari 250 orang dengan *run-up* mencapai 14 m (Tsuji dkk., 1995), tercatat sebanyak 400 orang luka-luka, dan merusak lebih dari 1000 rumah dengan ketinggian tsunami 1 - 14 m di selatan Jawa dan 0 - 5 m di Bali (Synolakis dkk., 1995). Badan Meteorologi dan Geofisika (sekarang Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika) melakukan survei pertama kerusakan pada 9 Juni 1994 dan melaporkan ketinggian maksimum 12 m di selatan Jawa Timur. Setelah kejadian gempa bumi Banyuwangi pada 2 Juni 1994 diketahui, banyak

yang mencoba memodelkan kejadian tsunami dengan parameter gempabumi yang dikeluarkan katalog tensor momen Harvard dan mengubah posisi bidang patahannya. Namun, tidak terdapat satu pun model saat itu yang dapat mendapat ketinggian tsunami mencapai 14 m, bahkan hasil yang dikeluarkan pada 19 Juni 1995 menggunakan slip 10 m hanya mendapatkan ketinggian tsunami 8.3 - 9.3 m (Synolakis dkk., 1995). Terdapat dua rekaman marigram yang terdapat di Banyuwangi dan Cilacap dengan estimasi waktu tiba pada pukul 2:00 dan 2:30 di yang terdeteksi anomali rekaman hingga 4 Juni 1994.

Hasil survei lapangan pasca kejadian tsunami yang dilakukan Maramai dan Tinti (1997) menunjukkan bahwa wilayah tenggara Pulau Jawa paling terdampak dari kejadian Tsunami Banyuwangi 1994. Pesisir pantai selatan Banyuwangi menjadi wilayah paling terdampak, diikuti daerah di sekitar Banyuwangi seperti pesisir pantai selatan Jember dan Lumajang. Dampak tsunami ini juga sampai hingga pesisir barat Pulau Bali. Korban terbanyak berasal dari Desa Pancer, Rajekwesi, dan Lampon di Banyuwangi. Bergerak dari barat laut dari desa nelayan Cape Pelindu, ketinggian tsunami tercatat mencapai 3,2 m dan merusak 3 rumah semi permanen. Di Desa Puger tidak terdapat catatan jejak kejadian tsunami di pelabuhan, namun pada beberapa kilometer sebelah barat terdapat tempat yang bernama Tambak Getem, meninggalkan jejak tsunami di pantainya. Nelayan melaporkan hanya merasakan guncangan lemah dan selang 15 menit kemudian tiga gelombang besar menghantam pesisir dengan jarak landaan 300 m dari garis pantai. Ketinggian maksimum yang

tercatat sebesar 5.85 m. Enam nelayan yang bekerja di laut lepas dilaporkan hilang pada saat tsunami menerjang.

Di Desa Watu Ulo terdapat 16 rumah rusak, tiga nelayan meninggal, dan lebih dari 30 perahu mengalami kerusakan. Akibat dari tsunami tersebut menyebabkan erosi hingga sekitar 1.5 m. Gelombang ketiga merupakan gelombang terbesar hingga menyebabkan atap rumah runtuh dengan ketinggian hingga mencapai 7.6 m (Gambar 33).



Gambar 34. Rumah yang mengalami kerusakan akibat diterjang gelombang tsunami dan teramati tiga gelombang berbeda ketinggian. Gelombang ketiga menyebabkan atap rumah runtuh.

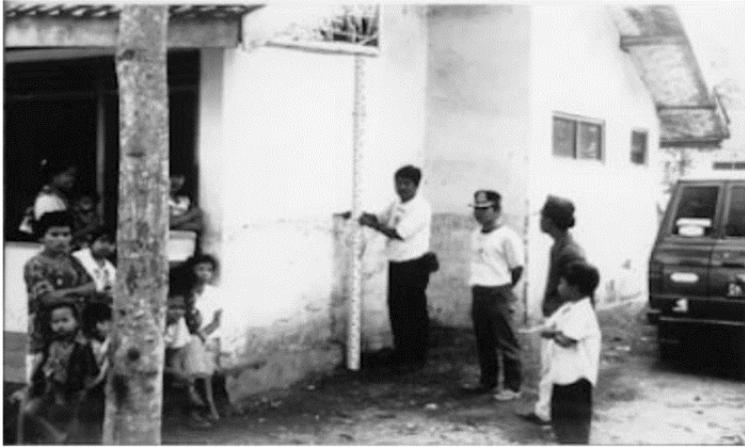
Desa Rajekwesi merupakan salah satu desa yang mengalami dampak terparah. Tercatat terdapat 33 korban jiwa, 14 orang hilang, dan lebih dari 60 rumah rata dengan tanah (Gambar 34). Tiga gelombang diamati memicu beberapa perubahan morfologis garis pantai. Landaan hingga mencapai 250 m dari garis pantai dengan ketinggian maksimum tsunami mencapai 9,5 m. Terdapat sungai yang dekat dengan pemukiman yang memperkuat efek

tsunami dan ketinggian gawir erosi lebih dari 2 m di sepanjang sungai.



Gambar 35. Bangunan bambu rata dengan tanah seluruhnya di Rajekwesi. Kerusakan berat juga dialami bangunan batu bata.

Pancer merupakan desa yang mengalami kerusakan paling parah dengan jumlah korban jiwa sebanyak 112 orang, 15 orang hilang, 450 rumah tersapu gelombang tsunami, dan lebih dari 250 mengalami kerusakan berat (Gambar 35). Tiga gelombang besar tercatat, gelombang kedua menjadi gelombang paling maksimum mencapai 4,7 m dengan landaan maksimum sekitar kurang lebih 300 m dan merusak rumah-rumah penduduk baik rumah yang semi permanen maupun rumah yang terbuat dari batu bata. Terdapat rumah sejauh 200 m dari tepi pantai diterjang tsunami dan meninggalkan jejak setinggi 1,25 m.



Gambar 36. Di Desa Pancer terdapat jejak landaan tsunami yang terekam di dinding rumah warga.

Desa Pulo Merah terletak di teluk kecil dekat dengan Pancer. Di daerah ini mengalami dampak lebih parah dari Pancer, dengan gelombang pertama tsunami menjadi yang paling tinggi dari 3 gelombang tertinggi dan kesemuanya datang dengan arah tegak lurus garis pantai dengan suara tiba gelombang seperti suara angin kencang. Gelombang tsunami ini datang selang 15 menit setelah gempa bumi terjadi yang menyebabkan 8 orang meninggal dunia, merusak 20 rumah, dan membawa ikan besar, kerang, dan batu dengan jumlah besar hingga 250 m dari garis pantai (Gambar 36). Ketinggian maksimum tsunami yang tercatat mencapai 6 m dan air laut menerjang hingga 400 m dari garis pantai.



Gambar 37. Di Desa Pulo Merah terdapat balok beton saluran sanitasi warga desa yang terseret arus balik gelombang tsunami.

Bagian terakhir yang disurvei di pesisir selatan Pulau Jawa adalah Lampon yang merupakan salah satu daerah yang mengalami dampak yang parah. Tercatat di desa ini terdapat 6 korban jiwa dan lebih dari 40 rumah bambu rata dengan tanah hingga jarak 500 m dari garis pantai. Beberapa rumah batu bata yang berjarak 250 m dari garis pantai juga ada yang mengalami rusak berat (Gambar 37). Air laut menembus mengikuti sungai lebih dari 1 kilometer di darat. Ketinggian tsunami yang tercatat mencapai 8,9 m, namun pada teluk kecil tercatat ketinggian tsunami hingga mencapai 11 m.



Gambar 38. Rumah batu bata terletak 250 m dari garis pantai yang mengalami kerusakan akibat diterjang gelombang tsunami

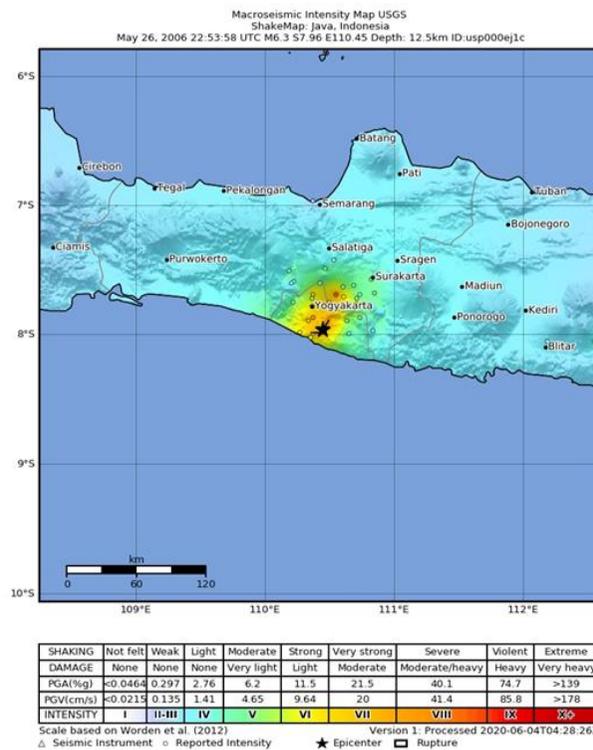
Survei dilanjutkan ke pesisir barat Pulau Bali dan hanya mendapatkan jejak rendaman tsunami di Desa Soka. Berdasarkan keterangan saksi mata, gelombang datang sekitar 1 jam setelah guncangan gempa bumi yang dirasakan beberapa orang. Ketinggian maksimum tsunami yang tercatat setinggi 4,95 m, namun tidak terdapat laporan korban jiwa di seluruh pesisir barat Bali.

B. Gempabumi Yogyakarta, 27 Mei 2006 (M6,3)

Pada 27 Mei 2006 pukul 05:53:57 WIB, Gempabumi Yogyakarta terjadi dengan mekanisme geser. Badan Meteorologi dan Geofisika (sekarang BMKG) dan US Geological Survey memperkirakan besaran gempa sebesar Mw 6,3. Selanjutnya, sekitar 750 gempa susulan telah dilaporkan, dengan yang terbesar terukur pada Mw 5,2. Dilaporkan sekitar 6000 orang tewas, 50.000 luka-luka, dan sebanyak 600.000 orang mengungsi di wilayah Bantul-Yogyakarta. Lebih dari 127.000 rumah hancur, dan 452.000 tambahan rusak di daerah tersebut, dengan total kerugian diperkirakan sekitar 3,1 miliar dollar AS (Consultative Group di Indonesia, 2006). Semua faktor ini menunjukkan bahwa sistem patahan dekat permukaan dalam pengaturan tektonik ini harus dicirikan untuk mengurangi bencana gempa di masa depan.

Daerah yang rusak merupakan daerah padat penduduk sepanjang patahan yang telah dipetakan sebelumnya yang membentang ke arah timur laut dari daerah Parangtritis hingga daerah Bantul dan berlanjut ke arah utara menuju daerah Klaten (Abidin et al., 2009). Keberadaan sesar Sungai Opak yang berarah barat daya-timur laut diduga membatasi area penurunan tektonik graben Yogyakarta (Rahardjo et al., 1977). Akibatnya, gempa Yogyakarta 2006 diyakini terjadi di sesar Sungai Opak. Namun, USGS memperkirakan hiposenter di terletak di sebelah timur sesar Sungai Opak (Laporan Awal USGS, 2006). Solusi mekanisme sumber dari *Harvard Centroid Moment Tensor* (CMT) (Harvard-CMT, 2006) menunjukkan pecahnya *strike-slip* yang signifikan di sebelah timur area bencana, dan solusi NEIC *Fast*

Momen Tensor (FMT) menunjukkan bahwa pusat gempa berada di bagian selatan sesar Sungai Opak ~25 km sebelah selatan Yogyakarta (NEIC-FMT, 2006). Nakano dkk. (2006) memperkirakan bahwa sumber tersebut terletak sekitar 10 km selatan-tenggara Kota Yogyakarta pada kedalaman 10 km. Gempa susulan yang ditentukan oleh jaringan sementara stasiun seismic menguraikan area sepanjang 20 km dengan dipping N50°E di timur patahan Sungai Opak (Walter et al., 2008). Oleh karena itu, letak patahan dan geometrinya belum ditentukan dengan jelas.



Gambar 39. Peta guncangan gempabumi Yogyakarta M 6,3 pada 27 Mei 2006 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ej1c/shakemap/intensit>).

Berdasarkan Repository Gempabumi dirasakan BMKG, guncangan Gempa Yogyakarta tersebut dirasakan sampai cukup luas hingga ke wilayah Jawa Timur, Yogyakarta dan Klaten merupakan wilayah yang paling kuat merasakan guncangan gempa, yaitu sekitar VI-VII MMI, berikutnya Kota Solo sekitar IV-V MMI, Semarang II-III MMI serta Karangates III-IV MMI.

Berdasarkan data kerusakan struktur bangunan dari Elnashai dkk. (2006), kejadian gempabumi ini mengakibatkan bangunan di Provinsi Yogyakarta terutama sebelah tenggara dan Jawa Tengah bagian timur banyak mengalami kerusakan. Bangunan di Yogyakarta dan Jawa Tengah pada umumnya dibagi menjadi bangunan batu bata tanpa kolom dan balok beton bertulang sebagai pembatas dengan ketebalan dinding setebal 1,5 batu bata (Gambar 39). Setelah Indonesia merdeka, masyarakat mulai membangun rumah dengan ketebalan dinding setengah batu bata yang sebagian besar sudah terdapat kolom penguat (Gambar 40).



Gambar 40. Kerusakan pada Bangunan Balai Pengobatan Penyakit Paru-Paru (BP4) di Bantul (Elnashai, dkk., 2006).



Gambar 41. Bangunan yang dibangun setelah masa kemerdekaan di daerah Bantul, Jetis, dan Klaten yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi Yogyakarta 2006 (Elnashai, dkk., 2006).

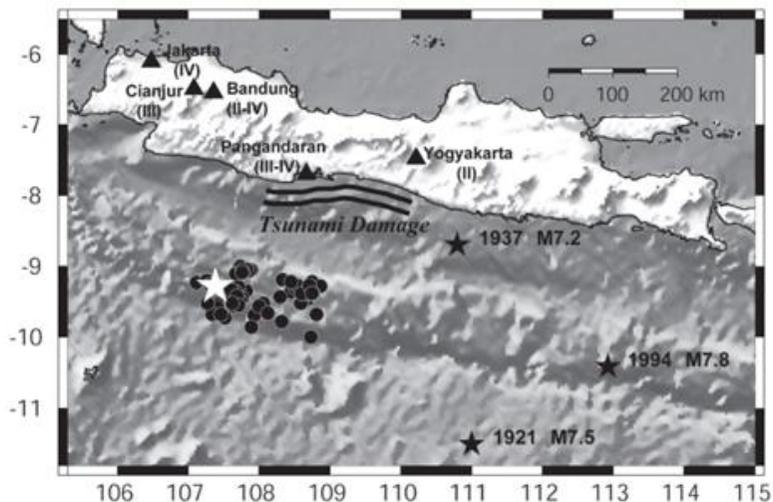
Bangunan rekayasa di Provinsi Yogyakarta sebagian besar terdiri dari struktur beton bertulang. Beberapa bangunan rekayasa di Kota Yogyakarta dan sekitarnya rusak bahkan ada yang roboh. Bangunan yang rusak tersebut antara lain Gedung BPKP (Badan Pengawasan Keuangan dan Pembangunan), Gedung Annex serta Gedung Institut Seni Indonesia (Gambar 41). Pada kebanyakan kolom yang diperiksa, jarak antar tulangan melintang (kolom pengikat) tidak memadai. Sambungan lewatan dan panjang penanaman yang tidak memadai untuk tulangan longitudinal yang teramati pada kolom yang rusak. Kualitas beton yang buruk terlihat pada banyaknya kolom yang rusak dan pada beberapa bangunan digunakan tulangan longitudinal pada kolom.



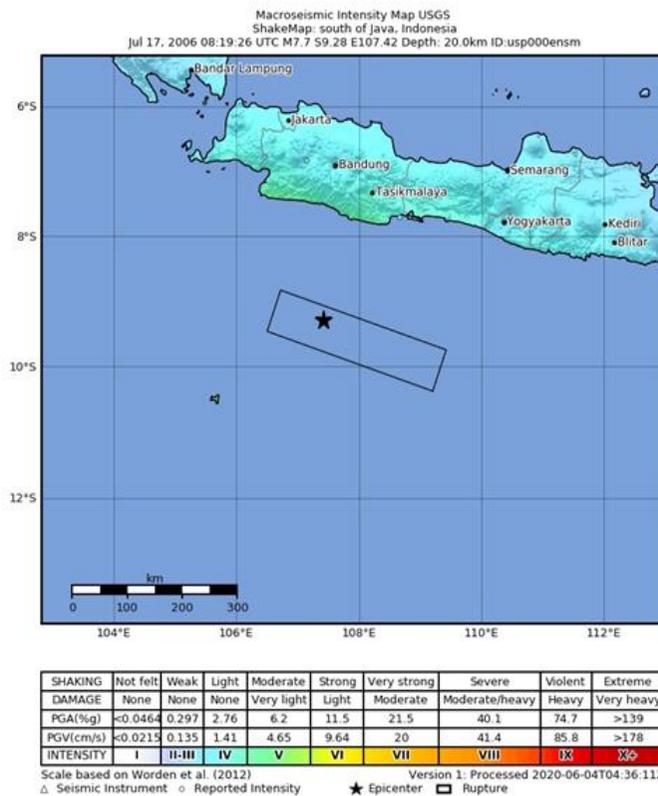
Gambar 42. Bangunan dengan struktur beton juga mengalami kerusakan karena belum sesuai dengan building code tahan gempabumi (Elnashai, dkk., 2006).

C. Gempabumi dan Tsunami Pangandaran, 17 Juli 2006 (M7,7)

Setelah kejadian Tsunami Aceh 26 Desember 2004 dan Tsunami 28 Maret 2005 di Nias, terjadi Tsunami Pangandaran pada 17 Juli 2006 yang diakibatkan oleh gempabumi M7,7 berlokasi di 225 km sebelah selatan Pantai Pangandaran (9,222° LS, 107,320° BT) pada pukul 15:19:22 WIB. Episenter gempabumi utama dan gempa susulan menunjukkan retakan *unilateral primer* sekitar 150 km ke arah timur (Gambar 42). Gempabumi ini dirasakan IV MMI di Jakarta (pada bangunan tinggi), III-IV MMI di Pangandaran dan Bandung, Cianjur III MMI, dan Yogyakarta II MMI. Berdasarkan catatan gempabumi besar, terdapat kegempaan di zona subduksi selatan Jawa dengan kedalaman dangkal pada tahun 1921 (M7,5), 1937 (M7,2), dan 1994 (Mw7,8), meskipun tidak ada catatan gempabumi besar yang dekat dengan area pecahnya Gempabumi Pangandaran M7,7.



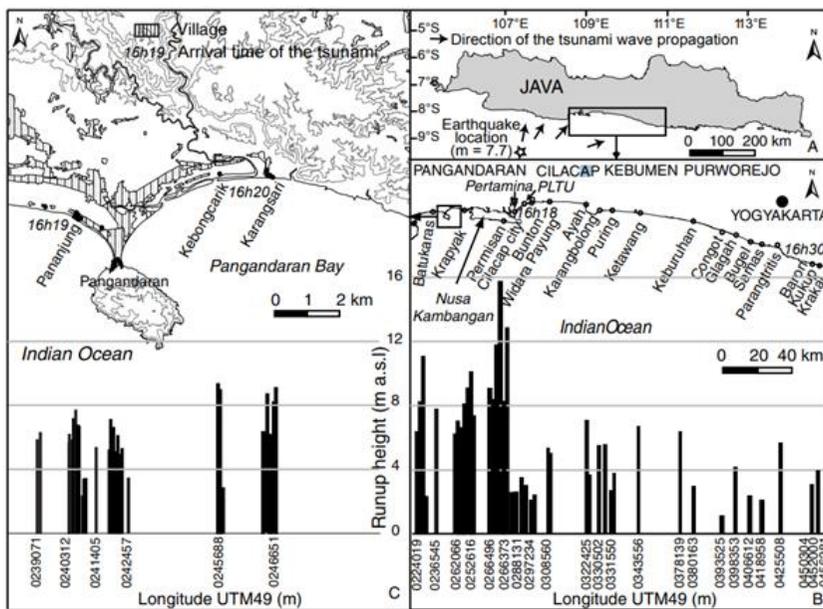
Gambar 43. Lokasi gempabumi utama (bintang putih) dan gempabumi susulan (lingkaran hitam) dari USGS untuk gempabumi selatan Jawa Barat 17 Juli 2006. Angka Romawi di bawah nama kota menunjukkan intensitas yang guncangan gempabumi dirasakan (Mori, dkk., 2007).



Gambar 44. Peta guncangan yang akibat gempa bumi M 7,7 pada 17 Juli 2006 yang menimbulkan tsunami di Cilacap (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ensm/shakemap/intensity>).

Gempabumi dan Tsunami Pangandaran ini dikenal dengan istilah “*tsunami earthquake*”, dikarenakan guncangan gempa tersebut memiliki tingkat radiasi seismik frekuensi tinggi yang relatif rendah untuk ukuran gempa dengan kekuatan M7,7 (Mori, dkk., 2007). Gempabumi hanya terasa lemah di daerah-daerah di mana gelombang tsunami besar terjadi, dan ini kemungkinan besar menjadi penyebab banyaknya korban jiwa dengan sumber di lepas pantai selatan pesisir Jawa (Gambar 44 (A)). Selain itu, kurangnya kesadaran masyarakat terkait bencana tsunami menyebabkan lebih dari 600 orang meninggal dunia, 65 orang

hilang, 9.299 orang dalam perawatan, dan lebih dari 75.000 orang mengungsi (Lavigne, dkk., 2007; Mori, dkk, 2007). Berdasarkan Lavigne dkk. (2007), tsunami di Pangandaran memiliki ketinggian lebih dari 8 meter yang teramati di Kebon Carik dan Karang Sari (Gambar 33 (B dan C)). Tsunami tersebut juga tercatat di Batukaras hingga Krakai di Provinsi Yogyakarta di sisi sebelah timur.



Gambar 45. (A) Lokasi studi lapangan di Jawa dengan indikasi terdampak tsunami akibat gempa bumi 17 Juli 2004. (B) Distribusi ketinggian dan waktu tiba tsunami pada titik pengamatan yang dipilih di sepanjang pesisir selatan Jawa. (C) Perbesaran kecamatan Pangandaran (Lavigne, dkk., 2007).

Korban jiwa terbesar terjadi di kawasan Pangandaran, dimana lebih dari 200 orang tewas. Banyak kafe dan toko bangunan kayu dalam jarak 20 m dari tepi pantai tersapu oleh gelombang tsunami. Jika tsunami terjadi satu atau dua hari lebih awal di akhir pekan, mungkin akan ada lebih banyak korban jiwa di pantai yang padat saat itu. Tercatat adanya kerusakan parah pada hampir

semua struktur dalam jarak beberapa ratus meter dari tepi laut, di mana konstruksinya sebagian besar adalah bangunan satu dan dua lantai dari batu bata yang tidak diperkuat dengan struktur kolom. Beberapa hotel yang lebih besar memiliki konstruksi yang lebih baik dan kerusakan struktural yang lebih sedikit. Kerusakan terdiri dari dinding yang roboh, dinding berlubang besar (terutama di bagian pintu dan jendela), dan tumpukan besar puing-puing yang terdiri dari bahan bangunan dan perahu kecil (Gambar 45 dan 46). Kerusakan meluas beberapa ratus meter dari pantai.

Kerusakan terparah terjadi di Desa Marsawah, Bulak Benda, yang terletak sekitar 22 km barat daya Pangandaran. Dalam jarak sekitar 150 m dari pantai, semua bangunan hanyut seluruhnya, tidak ada tembok yang berdiri dan hanya tersisa lantai dan pondasinya saja (Gambar 45). Bangunan-bangunan itu adalah tempat tinggal berlantai satu dan dua dari konstruksi batu bata tanah liat. Lebih jauh ke pedalaman, pada jarak 300 hingga 500 m, banyak bangunan juga hancur total. Keterangan saksi mata melaporkan bahwa tsunami memiliki ketinggian 6 sampai 8 meter. Dilaporkan bahwa gelombang pecah sekitar 200 sampai 300 m ke daratan dari pantai dan turun secara vertikal ke atas rumah-rumah warga di wilayah ini.



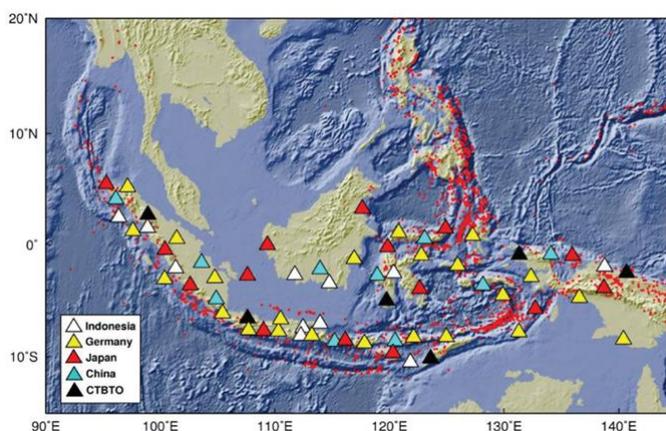
Gambar 46. Kerusakan tsunami pada bangunan batu bata yang tidak diperkuat strukturnya dengan kolom yang sesuai di Pangandaran (Mori, dkk., 2007).



Gambar 47. Kerusakan bangunan di sekitar Pangandaran. Perhatikan atap yang rusak pada bangunan di sebelah kiri yang menandakan tingginya tsunami (Mori, dkk., 2007).

Menurut Mori dkk. (2007), sejak Tsunami 26 Desember 2004, banyak lembaga Internasional yang bekerja untuk memperkuat pemantauan seismik di Indonesia. Sementara rencana terus berkembang, Jerman, Jepang, dan Cina berniat untuk memasang masing-masing 20, 15, dan 10 *seismometer broadband* pada tahun 2007. BMG berharap memiliki total 106 *seismometer broadband* pada akhir tahun 2007, dengan 14 seismometer baru

dipasang oleh akhir tahun 2006 (Gambar 47). Ada juga rencana yang didukung oleh pemerintah Jerman dan Badan Pembangunan Internasional AS dan NOAA untuk memasang *buoy* di lepas pantai Indonesia untuk mengidentifikasi tsunami saat masih di laut. Di seluruh kawasan, Sistem Peringatan Tsunami Samudera Hindia menyediakan dukungan teknis di bidang deteksi bahaya, perumusan peringatan, dan penyebaran informasi. Dalam upaya terkait, *United Nations Education, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) mengumumkan pada bulan Juni 2006, bahwa sistem peringatan sementara telah beroperasi dan peringatan dapat diteruskan ke negara-negara Samudera Hindia dari pusat pemantauan tsunami yang ada di Hawaii dan Jepang. Selain itu, *US Geological Survey* (USGS), bersama dengan Pusat Informasi Tsunami Internasional telah memberikan pelatihan seismologi dasar kepada karyawan BMG.



Gambar 48. Merencanakan jaringan broadband real-time internasional untuk Indonesia. Sembilan segitiga putih mewakili seismograf broadband yang dioperasikan oleh Indonesia. Segitiga lainnya adalah stasiun yang dipasang antara tahun 2005 dan 2007 (Mori, dkk., 2007)

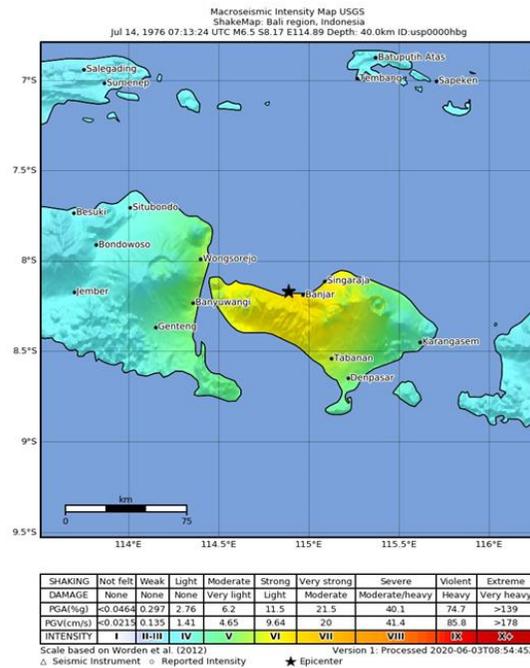
D. Gempabumi Bali, 14 Juli 1976 (M6,5)

Gempabumi Bali 1976 terjadi pada tanggal 14 Juli pukul 15:13:22 WITA dengan kekuatan M6,5. Pusat gempa berada di 5 kilometer sebelah selatan pesisir Laut Bali di Kabupaten Buleleng atau sekitar 65 kilometer barat laut dari Kota Denpasar (Gambar 48). Gempa Bali 1976 yang dikenal dengan istilah “Gejer Bali” tersebut menyebabkan kerusakan parah hingga sembilan puluh persen rumah-rumah di Kabupaten Buleleng dan menyebabkan kehancuran total di Kecamatan Seririt, dimana sebuah bangunan sekolah runtuh dan setidaknya 200 siswa terjebak (United Press International-UPI, 2015) (Australian Associated Press-AAP, 2015). Sekitar 573 orang diyakini telah meninggal sebagai akibat dari gempabumi tersebut, setidaknya 544 di Kabupaten Buleleng, 24 di Jembrana dan 5 di Tabanan (Leimena, 1979). Empat ribu lainnya menderita luka-luka dan sekitar 450.000 warga kehilangan tempat tinggalnya (US Foreign Disaster Aid Assistance, 2023).



Gambar 49. Korban Gempa “Gejer Bali” di Desa Patemon, Kabupaten Buleleng (Kompas.id, 2019)

Aktifitas kegempaan di Bali disebabkan adanya beberapa sumber gempa di sekitar Pulau Bali, di bagian utara Pulau Bali terdapat sesar yang terbentuk sebagai akibat hujaman balik proses subduksi. Aktivitas ini dikenal dengan *Flores Back Arc Thrust*. Sesar naik Flores merupakan robekan yang membentang di utara Pulau Bali, Lombok (Nusa Tenggara Barat), Sumbawa, dan Flores (Nusa Tenggara Timur). Di selatan Pulau Bali terdapat zona megathrust dan terdapat pula sistem sesar geser di sebelah timur Pulau Bali. Selain itu, juga terdapat patahan aktif di darat yang mengakibatkan Pulau Bali sangat rentan terhadap bahaya gempabumi dan tsunami.



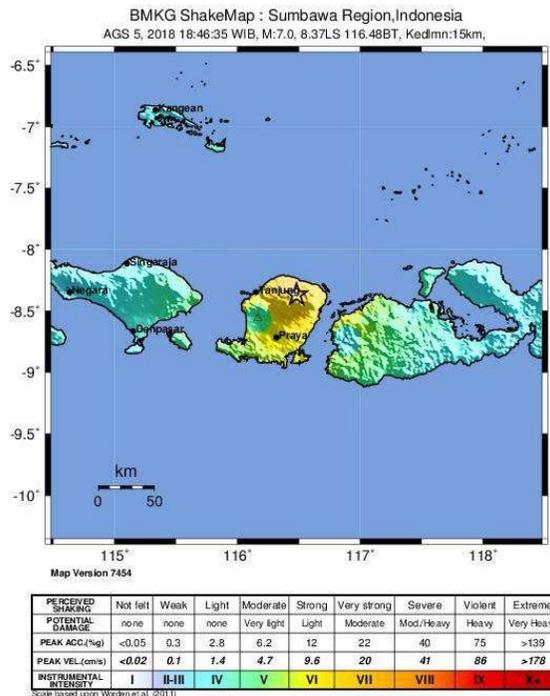
Gambar 50. Peta guncangan akibat gempabumi Bali M 6,5 pada 14 Juli 1976 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000hbg/shakemap/intensity>).

E. Gempabumi Lombok, 5 Agustus 2018 (M7,0)

Pada bulan Juli hingga bulan Agustus tahun 2018, Wilayah Lombok diguncang rangkaian gempa signifikan dan merusak, dimulai dengan gempa pada tanggal 29 Juli 2018 (M6,4) sebagai gempa pendahuluan (*foreshock*), lalu gempa tanggal 5 Agustus 2018 (M7,0) sebagai gempa utama (*mainshock*) pertama, kemudian disusul dengan gempa tanggal 9 Agustus 2018 (M6,2) sebagai gempa susulan (*aftershock*) signifikan dan gempa pada tanggal 19 Agustus 2018 (M6,8) yang didahului *foreshock* M6,3 dan *mainshock* kedua M6,9 sepuluh jam setelahnya.

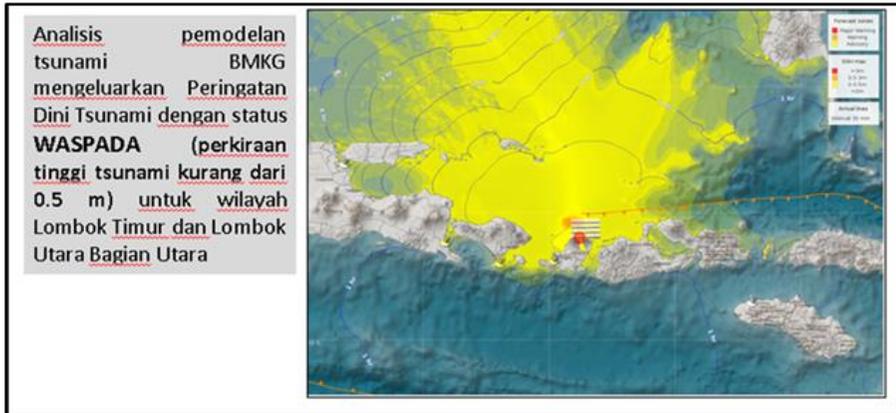
Wilayah Lombok, Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) terletak pada kawasan tektonik aktif, beberapa sumber gempa yang mengelilingi Pulau Lombok diantaranya, sesar naik belakang busur (*zona back arc thrust*) di utara, zona megathrust di selatan, serta sistem sesar geser di barat dan timur.

Gempa utama (*mainshock*) pertama, terjadi pada hari Minggu, 05 Agustus 2018, pukul 18:46:35 WIB. Pusat gempa berada di darat, pada koordinat $8,37^{\circ}$ LS dan $116,48^{\circ}$ BT atau tepatnya berlokasi di darat pada jarak 18 km barat laut Kabupaten Lombok Timur dengan magnitudo M7,0 pada kedalaman 15 km. Gempabumi tersebut berpotensi tsunami untuk daerah Lombok Utara, Lombok Timur dan Mataram dengan ancaman status waspada (perkiraan tinggi tsunami maksimal 0.5 m). Gempabumi ini sebagai gempa utama setelah terjadi gempa pendahuluan pada 29 Juli 2018 dengan magnitudo M6,4.

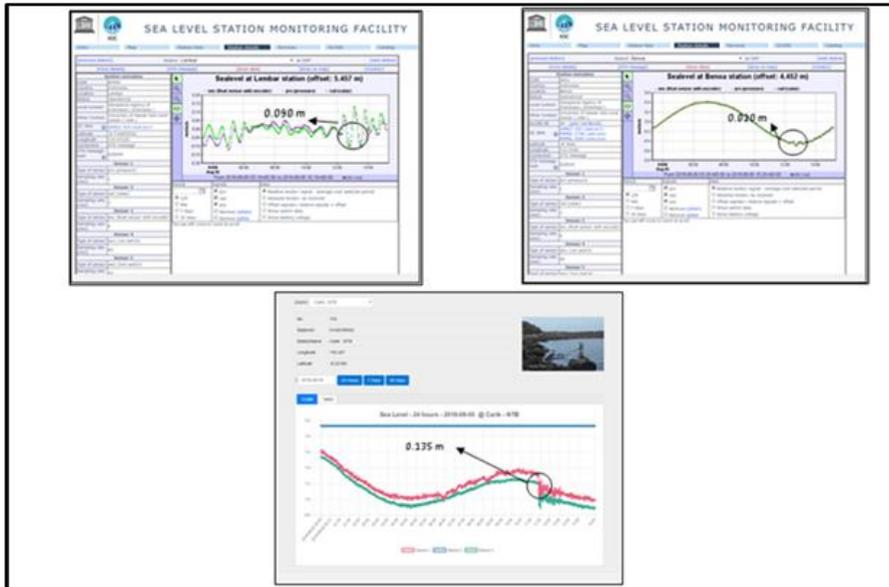


Gambar 51. Peta tingkat guncangan gempa Lombok, 5 Agustus 2018

Tingkat guncangan tanah yang dipicu gempabumi tersebut dapat terpetakan dalam bentuk Peta Guncangan (*shakemap*), sehingga dapat diprediksi daerah-daerah yang paling terdampak kuat. Lombok Utara dan Lombok Barat dan Mataram sekitar VII MMI, Bima, Denpasar dan Karang Asem mengalami intensitas V-VI MMI, Kuta sekitar IV MMI, serta Waingapu, Genteng, Situbondo dan Malang sekitar II-III MMI.



Gambar 52. Pemodelan Tsunami BMKG



Gambar 53. Observasi Tsunami di 3 Stasiun Tide Gauge di Carik (Kabupaten Lombok Utara), Lembar (Kabupaten Lombok Barat) dan Benoa (Kabupaten Badung)

Hasil analisis tsunami BMKG didasarkan pada hasil modelling yang selanjutnya divalidasi dari hasil observasi tide gauge di beberapa lokasi sekitar pusat gempa. Hasil observasi tide gauge di Carik (Kabupaten Lombok Utara), Lembar (Kabupaten Lombok

Barat) dan Benoa (Kabupaten Badung) mengkonfirmasi terjadinya tsunami dengan ketinggian kurang dari 0.2 m. Hal ini sesuai dengan estimasi ketinggian dari peringatan tsunami. Berdasarkan data observasi tersebut dimana ketinggian tsunami tidak signifikan maka pada pukul 20.25 WIB, BMKG mengirimkan penghantaran peringatan dini tsunami kepada masyarakat. Oleh karena hasil analisis menunjukkan bahwa gempa bumi yang terjadi merupakan gempa bumi yang berpotensi tsunami.

Selanjutnya, berdasarkan laporan dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Nusa Tenggara Barat, Gempa Lombok dengan magnitudo M7,0 yang disertai dengan tsunami kecil telah merusak lebih dari seribu bangunan rumah, sekolah dan kantor pemerintahan, 105 orang meninggal dunia, 236 orang luka-luka serta ribuan warga mengungsi. Wilayah kerusakan akibat gempa paling parah terjadi di Lombok Utara dan Lombok Barat.

Banyaknya kerusakan bangunan terjadi terutama dikontrol oleh kondisi kualitas konstruksinya yang tidak memenuhi persyaratan bangunan aman gempa bumi, selain juga karena letak bangunan tersebut pada tanah yang lepas-lepas pasir yang berada di dekat lembah atau pada lereng, serta juga dipengaruhi oleh kekuatan gempa, kedalaman dan jarak bangunan dari episenter.

BMKG selanjutnya menerjunkan tim gabungan (BMKG Pusat, Bawil III Denpasar, STMKG, dan Stasiun Geofisika Mataram) untuk melakukan rangkaian kegiatan survei dan sosialisasi kepada masyarakat dua hari pasca gempa utama tersebut.

Kegiatan survei tim BMKG meliputi beberapa kegiatan, diantaranya:

- Survei Makroseismik
- Survei Periode Dominan (Tdom)
- Survei Spektrum Accelerometer
- Survei Monitoring Gempa Susulan
- Validasi Shakemap

Rangkaian kegiatan survey tersebut bertujuan untuk memberikan sosialisasi dan informasi gempa susulan untuk menenangkan masyarakat, memetakan dampak kerusakan gempabumi dan untuk mengetahui efek lokal terhadap kerusakan bangunan.



Gambar 54. Kegiatan sosialisasi dan pengukuran periode dominan (Tdom) di Desa Sanggok, Lombok Tengah



Gambar 55. Tim BMKG melakukan koordinasi dengan BPBD Lombok Tengah mengenai daerah yang mengalami kerusakan

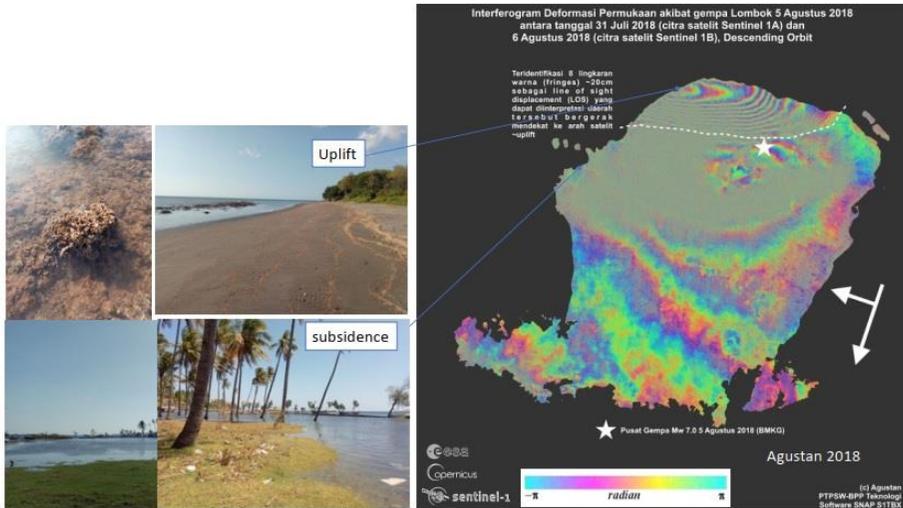


Gambar 56. Dampak gempa pada rumah warga dan bangunan perkantoran

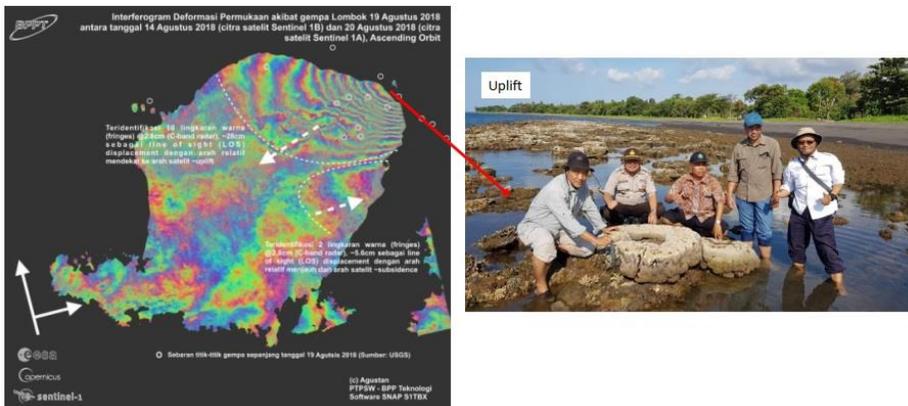


Gambar 57. Liquefaksi pada medium pasir dengan amblesan mencapai 2,5 meter dan lebar 3 m di Kecamatan Gangga, Lombok Utara

Selanjutnya berdasarkan laporan hasil observasi lapangan yang dilakukan oleh Tim Pusgen, LIPI, ITB dan BPPT pada tanggal 10-12 Agustus 2018, ditemukan koral mikroatoll yang terangkat di wilayah pesisir Lombok Utara daerah Kayangan-Bayan serta penurunan (subsidence) dan liquefaksi di daerah Pemenang, Lombok Utara. Observasi kedua dilakukan pada tanggal 5 September 2018, menemukan koral mikroatoll yang terangkat di pesisir utara Lombok sisi paling timur.



Gambar 58. Hasil observasi lapangan Tim Pusgen, LIPI, ITB dan BPPT yang menemukan adanya koral mikroatoll yang terangkat di daerah pesisir Lombok Utara dan penuruna (subsidence) disertai liquifaksi di daerah Pemenang, Lombok Utara (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)



Gambar 59. Koral mikroatoll yang terangkat setinggi 37 cm akibat gempa (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)

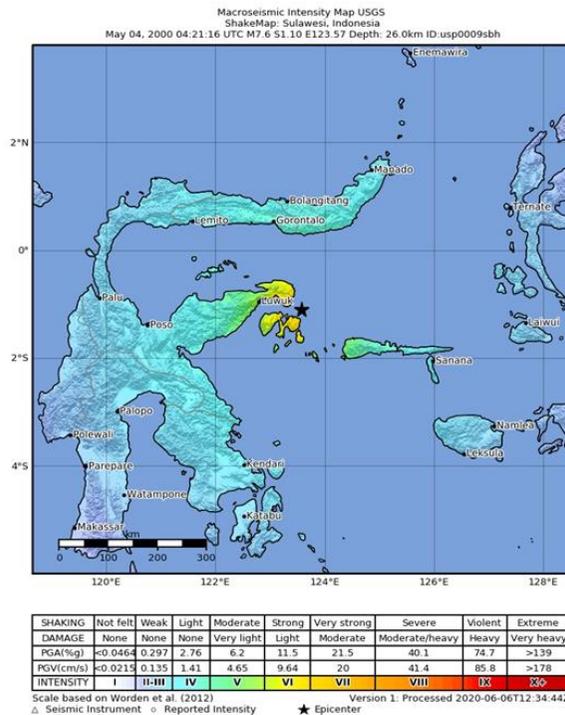
III. Wilayah Sulawesi

A. Tsunami Banggai 2000, 4 Mei 2000 (M7,4)

Pada Kamis tanggal 4 Mei 2000 pukul 11:21:20 WIB, Kepulauan Banggai diguncang gempa bumi kuat bermagnitudo M7,4 yang diikuti oleh gelombang tsunami. Pusat gempa berada pada koordinat 1,105° LS dan 123,573° BT tepatnya dilaut pada jarak 88 km arah tenggara Kota Luwuk dengan kedalaman episenter 26 km. Tsunami yang melanda Kepulauan Banggai tersebut membunuh sedikitnya 54 orang, melukai sebanyak 264 orang dan merusak sekitar 19.378 rumah warga, 580 gedung pemerintahan, 475 gedung sekolah dan 349 tempat ibadah di 7 kecamatan di Kepulauan Banggai. Tsunami dilaporkan setinggi 6 meter yang merendam dua desa di Pulau Peleng, yaitu Kayutanyo dan Uwedikan (Neal, 2000).

Di Luwuk, sebuah dermaga rusak parah, 10 rumah rusak, dan satu unit pasar terbakar. Kejadian gempa bumi ini mengakibatkan puluhan rumah dan bangunan kantor pemerintah serta rumah ibadah mengalami kerusakan yang cukup parah. Bahkan, jalan aspal sepanjang 200 meter menuju ke arah bandar udara Bubung retak selebar 30-45 cm (Naryanto, 2017).

Gempa tersebut dirasakan pada area yang cukup luas, di Kota Salakan, Kabupaten Banggai Kepulauan dan Balatak, Kabupaten Banggai guncangan gempa dirasakan pada skala VII MMI, lalu VI MMI di Luwuk dan IV-V MMI di Ampana serta Gorontalo, IV MMI di Manado, Toli-Toli dan Balikpapan serta III MMI di Ternate.



Gambar 60. Peta guncangan ini diakibatkan gempa bumi M 7,6 pada 3 Mei 2000 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009sbh/shakemap/intensity>).

Gempabumi Banggai juga mengakibatkan tsunami dengan ketinggian air hingga 3 meter di wilayah Kecamatan Totikum. Sedangkan di wilayah Salakan sejumlah rumah penduduk dan kantor pemerintahan rusak berat. Berdasarkan katalog USGS, gempa ini yang terbesar sejak gempa magnitudo 7.8 tanggal 29 November 1998 yang membunuh 41 orang dengan guncangan terkuat VII MMI. Gempa dan Tsunami Banggai ini menyebabkan sekitar 150.000 warga kehilangan tempat tinggal (International Federal Red Cross, 2000).



Gambar 61. Gempa menimbulkan kerusakan pada bangunan rumah, gedung kantor dan tempat ibadah (Hiraishi dan Harada, 2000)

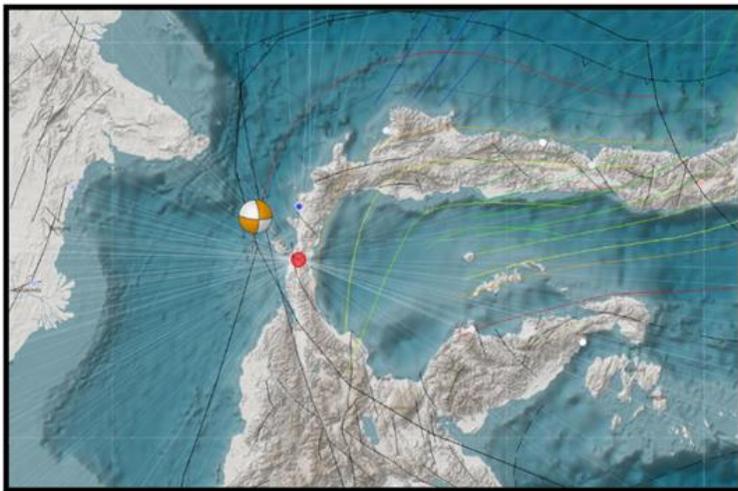


Gambar 62. Dampak tsunami yang menimbulkan kerusakan pada permukiman di pesisir pantai (Hiraishi dan Harada, 2000) (<http://komunitashistoriasul-teng.simplesit.com/>)

B. Gempabumi dan Tsunami Palu, 28 September 2018 (M7,7)

Pada hari Jum'at tanggal 28 September 2018 pukul 17:02:44 WIB gempabumi berkekuatan M7,7 (*update* M7,4) mengguncang Kota Palu dan Kabupaten Donggala. Pusat gempa berada di darat 26 km utara Donggala dan 80 km barat laut kota Palu pada kedalaman 10 km.

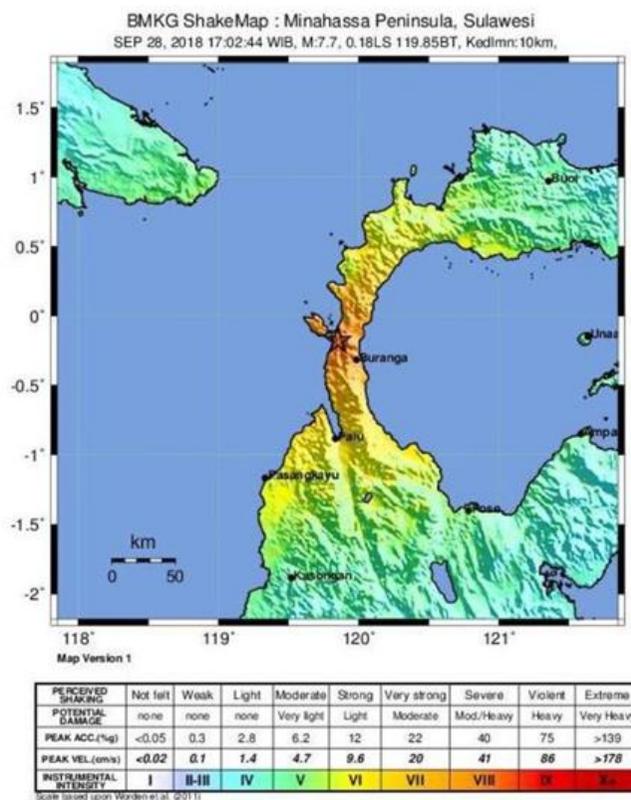
Gempabumi yang terjadi merupakan jenis gempabumi dangkal akibat aktifitas sesar Palu Koro. Hasil analisis mekanisme sumber menunjukkan bahwa gempa ini, dibangkitkan oleh deformasi dengan mekanisme pergerakan dari struktur sesar mendatar (*Slip-Slip*).



Gambar 63. Peta episenter dan mekanisme sumber gempabumi Palu-Donggala

Berdasarkan hasil analisis peta tingkat guncangan (*shakemap*) BMKG, guncangan gempabumi dirasakan di Kabupaten Donggala VII-VIII MMI, Kota Palu VI-VII MMI, Mapaga VI-VII MMI,

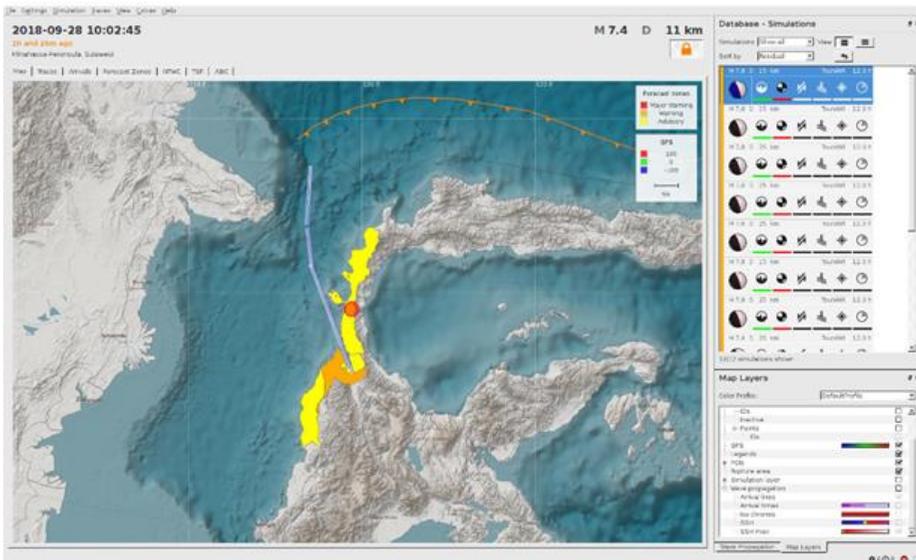
Gorontalo III-IV MMI, Kabupaten Parigi Moutong III-IV MMI, Kabupaten Sigi III-IV MMI, Kabupaten Poso III-IV MMI, Majene III MMI, Soroako III MMI, Kendari II-III MMI, Kolaka II-III MMI, Konawe Utara II-III MMI, Bone II-III MMI, Kalimantan Timur II-III MMI, Kalimantan Utara II-III MMI, Sengkang II-III MMI, Makassar II MMI, Gowa II MMI dan Toraja II MMI. Durasi guncangan dilaporkan berlangsung cukup lama sekitar 46 detik.



Gambar 64. Peta guncangan (shakemap) gempa bumi Palu-Donggala.

BMKG mengeluarkan peringatan dini tsunami dengan status SIAGA (ketinggian tsunami 0,5 sampai 3 meter) di Palu, status WASPADA (ketinggian tsunami kurang dari 0,5 meter) di

Donggala bagian utara dan Mamuju bagian utara. Gelombang tsunami pertama dilaporkan menerjang wilayah pesisir kota Palu sekitar 3 menit 35 detik setelah gempa terjadi dengan ketinggian sekitar 5-6 meter di Kota Palu.



Gambar 65. Pemodelan tsunami BMKG.

Selain diikuti gelombang tsunami, beberapa saat setelah gempa muncul fenomena likuifaksi di beberapa wilayah yang memakan banyak korban jiwa dan material. Dua wilayah yang mengalami fenomena likuifaksi terparah adalah Kelurahan Petobo dan Perumnas Balaroa (Nugraha, 2018). Menurut data, likuifaksi yang terjadi di Perumnas Balaroa menenggelamkan sekitar 1.747 unit rumah, sementara di Kelurahan Petobo sekitar 744 unit rumah tenggelam (Republika, 2018).



Gambar 66. Foto udara reruntuhan masjid di antara rumah-rumah warga di Perumnas Balaroa (Republika, 2018)

Adrin Tohari, peneliti LIPI, menyatakan bahwa di bagian tengah zona Sesar Palu-Koro, tersusun endapan sedimen yang berumur muda dan sudah terkonsolidasi/mengalami pemadatan. Sehingga daerah tersebut rentan mengalami likuifaksi jika terjadi gempa besar (Kompas, 2018).

Dua hari setelah kejadian gempa, BMKG menurunkan tim survei lapangan untuk mengumpulkan data kerusakan di lapangan, pemantauan gempa susulan serta mengumpulkan data tinggi tsunami jarak genangan tsunami di wilayah terdampak.

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan diperoleh informasi tinggi gelombang tsunami dan jarak genangan tsunami (inundasi) seperti berikut ini:

| Lokasi | Kelurahan | Lon | Lat | Tsu(m) | Inun(m) |
|--------------|-----------|------------|-----------|--------|---------|
| Panggung | Tabonga | 119,774556 | -0,718956 | 4,18 | 106,7 |
| Lolilondo | Banawa | 119,780534 | -0,747154 | 3,15 | 97,7 |
| Lolipesua | Banawa | 119,788484 | -0,769695 | 6,76 | 75,6 |
| Lolisaluran | Banawa | 119,818903 | -0,843634 | 9,05 | 101,0 |
| Primkopal | Watusampu | 119,810797 | -0,817553 | 7,31 | 74,0 |
| Silae | Silae | 119,834851 | -0,874983 | 3,39 | 101,8 |
| Ruko | Lere | 119,840053 | -0,881112 | 5,57 | |
| Grandmall | Lere | 119,842891 | -0,882230 | 6,08 | 320 |
| Mercure | Lere | 119,849500 | -0,883610 | 10,03 | 468,8 |
| TVRI | Talise | 119,862850 | -0,885830 | 7,67 | 428,9 |
| Nelayan | Talise | 119,878140 | -0,863900 | 7,61 | 75,0 |
| Tondo | Tondo | 119,881030 | -0,836580 | 10,67 | 165,0 |
| Citraland | Tondo | 119,879800 | -0,831800 | 6,73 | 197,0 |
| Pergudangan | Mambaro | 119,882350 | -0,823540 | 9,17 | 378,9 |
| Kampung | Mambaro | 119,876590 | -0,801600 | 6,95 | 247,1 |
| Poltekes | Mambaro | 119,864500 | -0,790020 | 6,2 | 42,0 |
| Resort | Taipa | 119,858940 | -0,781830 | 5,06 | 145,3 |
| PLTU | Tawaeli | 119,855050 | -0,732040 | 9,29 | 168,8 |
| Pantoloan | Pantoloan | 119,851840 | -0,708460 | 10,2 | 216,0 |
| Ngada Wani | Pantoloan | 119,840330 | -0,695010 | 7,23 | 158,4 |
| Labuan | Tawaeli | 119,816600 | -0,662510 | 3,88 | 29,3 |
| TPI Lero | Sindue | 119,811520 | -0,629120 | 5,15 | 132,7 |
| Pasir Marana | Sindue | 119,789340 | -0,595290 | 2,95 | 41,2 |
| Tondo Lendi | Sirenja | 119,796204 | -0,249244 | 1,9 | 133,8 |
| Mapaga | Sirenja | 119,802160 | -0,231051 | 2,45 | 136,7 |
| Tipo | Tipo | 119,828593 | -0,860717 | 6,81 | 105,0 |



Gambar 67. Hasil pengukuran tsunami di lapangan yang dilakukan oleh tim survey BMKG

Selain itu tim survei juga melakukan wawancara dengan para saksi mata kejadian gempa bumi dan tsunami dan mendapatkan beberapa informasi tambahan, diantaranya:

- Tsunami Palu-Donggala sedikitnya terdiri dari 3 gelombang tsunami
- Waktu tiba gelombang tsunami pertama secara umum berkisar 1-2 menit dari kejadian gempa. Sedangkan tsunami ke-2 dan ke-3 berselang 5 dan 10 menit setelah gempa.
- Akhir waktu rendaman tsunami diperkirakan sekitar jam 20 WITA



Gambar 68. Wawancara tim survei BMKG dengan para saksi mata



Gambar 69. Kerusakan bangunan akibat gempa Palu-Donggala hasil survei makroseismik tim BMKG

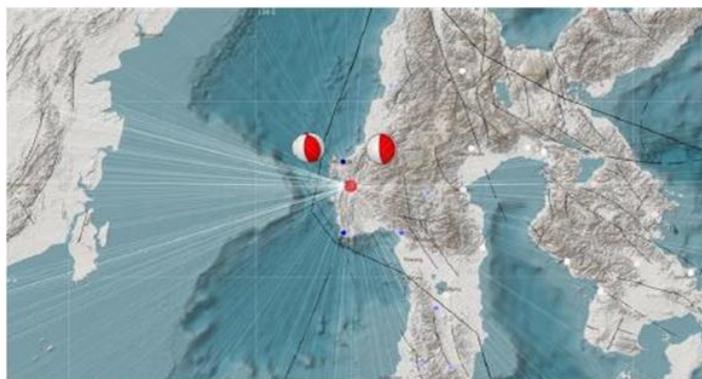
Berdasarkan laporan resmi BNPB, tercatat 2.256 orang meninggal dunia. Sebarannya di Kota Palu 1.703 orang meninggal dunia, Donggala 171 orang, Sigi 366 orang, Parigi Moutong 15 orang dan Pasangkayu 1 orang. Selain itu dilaporkan pula sebanyak 1.309 orang hilang, 4.612 orang luka-luka dan 223.751 orang mengungsi di 122 lokasi pengungsian.

Banyak bangunan dan infrastruktur yang hancur akibat bencana. Kerusakan meliputi 68.451 unit rumah, 327 unit rumah ibadah, 265 unit sekolah, perkantoran 78 unit, toko 362 unit, jalan 168 titik retak, jembatan 7 unit dan sebagainya.

C. Gempabumi Mamuju, 15 Januari 2021 (M5,9)

Pada hari Kamis tanggal 14 Januari 2021 telah terjadi gempabumi dengan magnitudo M5,9 yang dirasakan cukup kuat di Kabupaten Majene dan Mamuju. Gempabumi terjadi pada pukul 13:35:49 WIB, pusat gempabumi di darat pada koordinat geografis 2.99° LS dan 118.89° BT dengan kedalaman sumber gempa 10 km. Lokasi episenter gempabumi berada pada 4 km arah barat laut Majene, Sulawesi Barat.

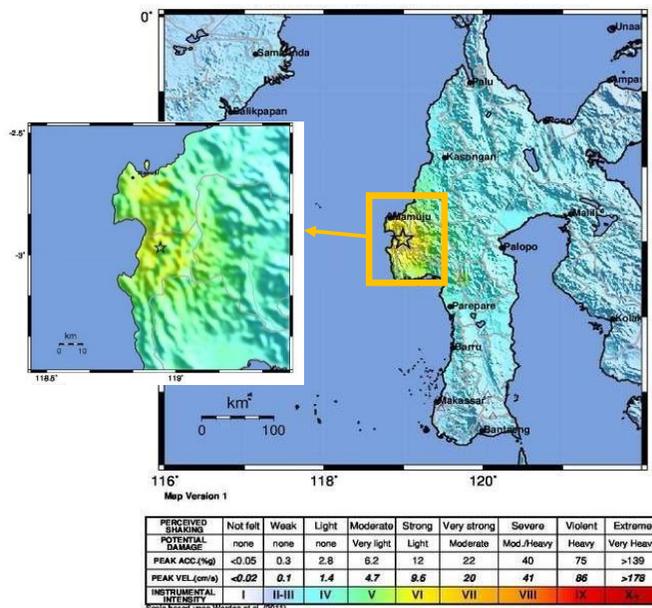
Setelah gempa M5,9 pada pukul 13:35:49 WIB yang menimbulkan kerusakan tersebut, selanjutnya diikuti oleh 8 kali rentetan gempa pembuka lainnya. Esok harinya pada Jum'at, 15 Januari 2021 pukul 01:28:17 WIB terjadi gempa utama dengan magnitudo M6,2 dengan dampak guncangan yang lebih kuat dan lebih merusak. Pusat gempa utama tersebut berada di darat pada koordinat geografis 2.98° LS dan 118.94° BT dengan kedalaman sumber gempa 10 km. Lokasi episenter gempabumi berada pada 6 km arah timur laut Majene, Sulawesi Barat.



Gambar 70. Peta lokasi episenter gempa pembuka dan gempa utama tanggal 14 dan 15 Januari 2021

Berdasarkan hasil analisis tingkat guncangan (*shakemap*), dampak gempa pembuka, guncangannya dirasakan di Majene dan Mamuju dengan skala intensitas IV-V MMI (memicu kerusakan) dan di Mamuju Utara serta Mamuju Tengah III-IV MMI (benda-benda terpelanting). Menurut laporan dari masyarakat guncangan gempa pembuka tersebut juga dirasakan di beberapa Kabupaten di Sulawesi Selatan (Toraja III MMI, Pinrang II-III MMI, Pare-Pare II-III MMI, Wajo II-III MMI) serta di Balikpapan II MMI.

Selanjutnya dampak gempa utama, guncangannya dirasakan di Majene dan Mamuju dengan skala intensitas V-VI MMI (memicu kerusakan) serta di Palu, Mamuju Utara, Mamuju Tengah dan Mamasa III-IV MMI (benda-benda terpelanting). Gempa utama ini menimbulkan kerusakan yang lebih parah dan dampak yang lebih luas dibandingkan dengan gempa pembuka.



Gambar 71. Peta tingkat guncangan gempa utama M6,2 (15 Januari 2021)

Beberapa hari setelah kejadian gempa bumi, BMKG menurunkan tim survei untuk mengumpulkan data kerusakan di lapangan, pemantauan gempa susulan serta sosialisasi kepada masyarakat.

Kegiatan sosialisasi dilakukan untuk memberikan pemahaman kepada masyarakat tentang upaya kesiapsiagaan menghadapi gempa bumi dan tsunami serta untuk memberikan rasa tenang kepada masyarakat terutama karena banyaknya info yang simpang siur paska gempa besar di wilayah Mamuju dan Majene.





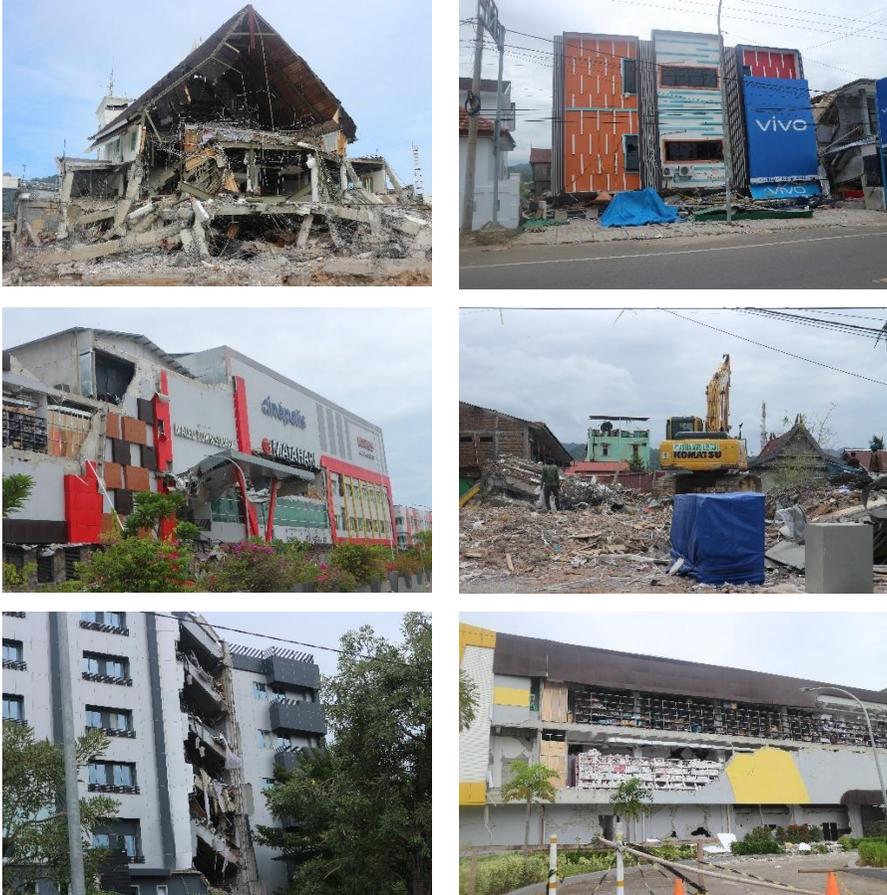
Gambar 72. Kegiatan sosialisasi kepada masyarakat oleh tim BMKG pasca gempa Mamuju

Berdasarkan rilis resmi dari BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana) menyebutkan bahwa gempa bumi M6,2 yang mengguncang Kabupaten Mamuju dan Majene berdampak pada jatuhnya korban jiwa dan kerusakan bangunan. Data sementara BNPB per 26 Januari 2021 mencatat total korban gempa M 6.2 Sulawesi Barat adalah sebagai berikut, korban meninggal dunia sebanyak 105 orang, korban hilang 3 orang, luka 6.489 orang (kategori ringan hingga berat) dan warga yang mengungsi sebanyak 92.075 orang yang tersebar di 318 titik pengungsian. Di samping itu, warga yang berasal dari Kabupaten Mamuju dan Majene mengungsi ke Kabupaten Polewali Mandar berjumlah 5.433 orang. Mereka tersebar di 110 titik pengungsian.

Selanjutnya, total kerusakan dan kerugian akibat gempa tersebut mencapai Rp. 829,1 miliar. Total tersebut teridentifikasi untuk wilayah Kabupaten Mamuju dan Majene di Provinsi Sulawesi Barat (Sulbar).

Total kerusakan dan kerugian di Majene mencapai Rp. 449.8 Miliar. Angka tersebut dinilai dari sektor permukiman Rp. 365.3 M, sosial Rp. 76.9 M, ekonomi Rp. 5.13 M, lintas sektor Rp. 2.1 M

dan infrastruktur Rp. 235 juta. Data kerusakan di Majene meliputi rumah 4.122 unit, fasilitas pendidikan 17 unit, tempat ibadah 8 unit, fasilitas ekonomi dan perkantoran 32 unit, fasilitas kesehatan 17 unit, fasilitas militer 1 unit dan minimarket 1 unit.



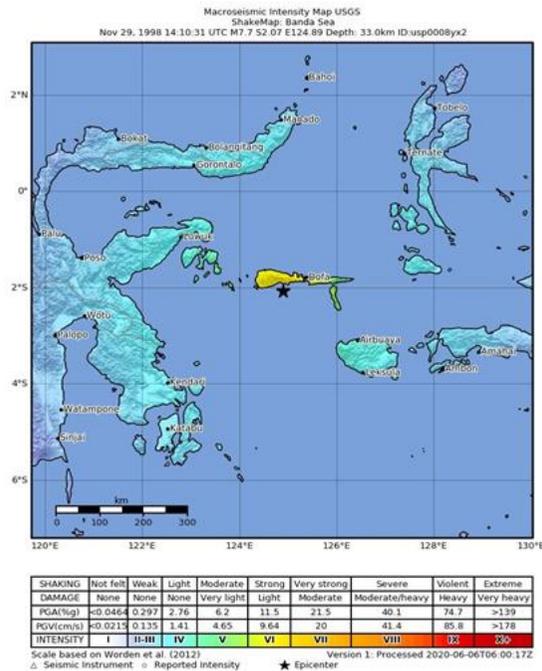
Gambar 73. Kerusakan bangunan akibat gempa bumi M 6,2 di Mamuju dokumentasi tim survei BMKG

Sedangkan di Mamuju, total nilai kerusakan dan kerugian mencapai Rp. 379.3 miliar. Rincian nilai kerusakan dan kerugian sebagai berikut, permukiman Rp. 270.1 M, ekonomi Rp. 50.4 M, lintas sektor Rp. 39.9 M, sosial Rp. 17.4 M dan infrastruktur Rp. 1.3 M. Data kerusakan di Mamuju antara lain, rumah 3.741 unit, fasilitas kesehatan 8 unit, jembatan 3 unit, mini market 2 unit, perkantoran 2 unit, hotel 1 unit, pelabuhan, tempat ibadah, dan fasilitas pendidikan masing-masing 1 unit.

IV. Wilayah Maluku Utara

A. Gempabumi dan Tsunami Taliabu-Sula, 29 November 1998 (M6,5)

Gempabumi terjadi pada pukul 23:10:31 WIB dengan kekuatan M6,5 di 238 km arah timur Pulau Peleng, Provinsi Sulawesi Tengah atau 553 km arah barat laut Pulau Mangole, Kabupaten Maluku Utara, Provinsi Maluku. Episenter gempabumi terletak pada 1,95° LS dan 124,92° BT dengan kedalaman 33 km (USGS). Guncangan gempabumi ini dirasakan cukup luas di Sula dan Taliabu VII MMI, Banggai dan Luwuk V-VI MMI, Poso dan Donggala IV-V MMI, serta di Ambon, Palu, dan Manado II-III MMI.



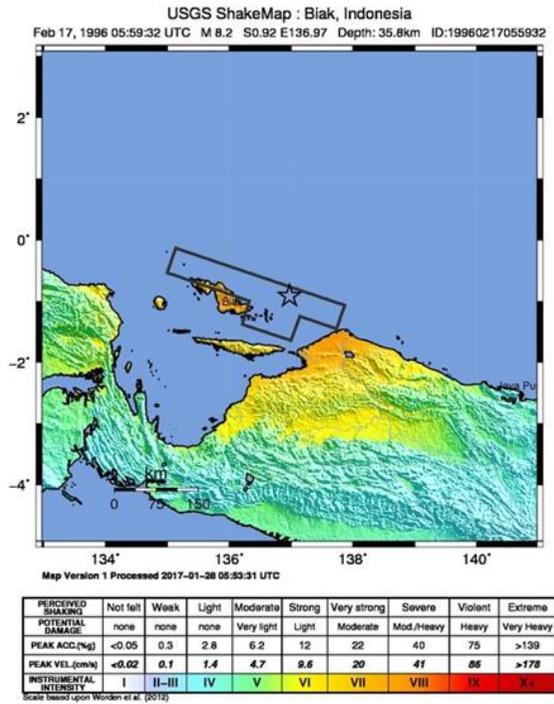
Gambar 74. Skenario guncangan akibat gempabumi Taliabu-Sula 29 November 1998 yang dimodelkan oleh USGS

Kejadian gempa bumi ini mengakibatkan terjadinya tsunami yang melanda Kabupaten Pulau Taliabu dan Kepulauan Sula. Ketinggian tsunami tercatat hingga mencapai 2,75 meter yang teridentifikasi di Mangole. Tercatat terdapat korban jiwa sebanyak 41 orang. Selain itu terdapat 107 orang luka-luka, dan 1000 unit bangunan rusak (NOAA). Gempa ini berasosiasi dengan sesar Sula Selatan-Sorong, yang secara administratif saat itu masuk Provinsi Maluku, namun saat ini termasuk dalam Provinsi Maluku Utara.

V. Wilayah Papua

A. Gempabumi Biak, 17 Februari 1996 (M8,2)

Pada sisi utara Pulau Papua terdapat zona subduksi dengan arah penunjaman ke barat daya yang disebut *New Guinea Trench* (NGT). Tunjaman tersebut terjadi karena terdapat mikro-kontinen Caroline yang menunjam ke Lempeng Australia (Bird, 2003). NGT memiliki strike 120° dengan kecepatan penunjaman menurun terhadap bujur saat semakin ke barat, pada segmen di atas “Kepala Burung” memiliki kecepatan relatif gerak lempeng sebesar 87 mm/tahun (Bird, 2003). Pada 17 Februari 1996 terjadi gempabumi M8,2 dengan mekanisme naik yang disebabkan aktifitas NGT. Gempabumi utama terjadi pada pukul 12:59:32 WIB pada $0,916^\circ$ LS, $136,974^\circ$ BT berdasarkan katalog ISC-EHB (Engdahl dkk., 1998). Episenter tersebut terletak 60 km di lepas pantai sebelah timur laut dari Pulau Biak sehingga memicu kejadian tsunami. Guncangan gempabumi ini dirasakan pada wilayah yang cukup luas (Gambar 61).



Gambar 75. Peta guncangan akibat gempa bumi Biak M 8,2 pada 17 Februari 1996.

Dari hasil survei lapangan pasca kejadian tsunami yang dilakukan Matsutomi dkk. (2001), ketinggian maksimum tsunami yang terekam mencapai 7,7 m terletak pada pantai yang tidak menghadap sumber gempa bumi. Kejadian tsunami ini menarik perhatian para ahli dari Jepang, Indonesia, Amerika Serikat, Inggris, dan Korea untuk melakukan survei lapangan selama 2 pekan setelah tsunami terjadi. Kejadian tsunami ini juga menerjang Pulau Yapen yang terletak di selatan Pulau Biak. Secara keseluruhan distribusi ketinggian tsunami konsisten terhadap mekanisme sumber gempa bumi. Kejadian tsunami ini menyebabkan 107 orang meninggal dunia, 51 orang hilang, 55 orang mengalami luka berat, dan lebih dari 2700 rumah

mengalami rusak sebagian dan rusak total akibat efek guncangan gempa bumi dan terkena tsunami. Bangunan sekolah yang di dekat pantai mengalami kerusakan berat akibat diterjang tsunami (Gambar 62).



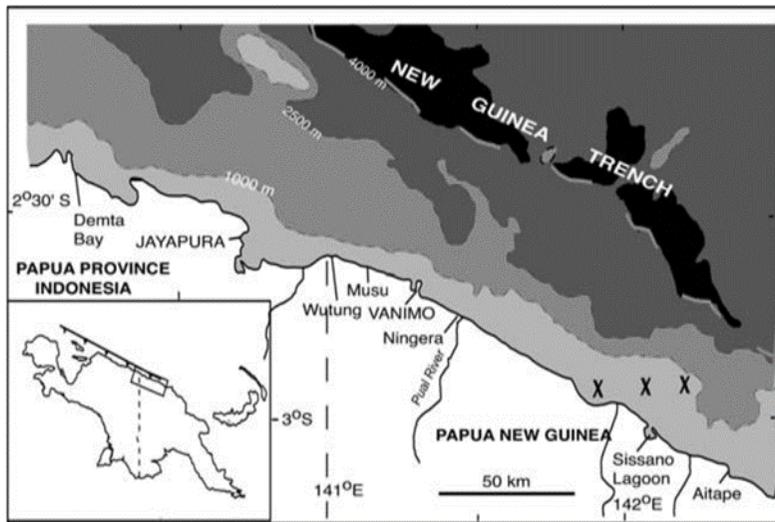
Gambar 76. Bangunan sekolah rusak akibat diterjang tsunami di Korim. Dinding yang menghadap ke arah pantai mengalami kerusakan berat akibat diterjang gelombang kuat (Matsutomi dkk., 2001, Imamura dkk., 1997).

B. Gempabumi dan Tsunami Aitape, 17 Juli 1998 (M7,0)

Pada malam tanggal 17 Juli 1998 tsunami menghantam pesisir barat Aitape, Papua Nugini. Tsunami menyebabkan kerusakan total pada wilayah pesisir pantai sepanjang 14 km yang berpusat di Laguna Sissano. Kejadian sebelum tsunami mencapai daratan, terjadi gempabumi kuat Mw 7,0 pada 15:49 WIB yang diikuti beberapa gempabumi susulan pada 16:02:06 WIB (mb4,4) dan 16:06:03 WIB (tidak ada laporan magnitudo), lalu disusul gempabumi doublet kuat yang dirasakan banyak orang pada pukul 16:09:32 WIB (mb5,6) dan pukul 16:10:02 WIB (mb5,9). (Synolakis dkk., 2002; Hurukawa, dkk., 2003; dan Joku dkk., 2007). Adanya gelombang tsunami dari kejadian pukul 16:02:06 WIB diinterpretasikan diakibatkan adanya longsoran bawah laut (Synolakis, dkk., 2002). Penyebab tsunami yang lain disebabkan deformasi patahan bawah laut (Geist, 2000).

Selisih waktu tiba antara gempabumi awal dengan tsunami yang sampai di pantai selama 10-15 menit, ketika gempabumi doublet belum dirasakan secara luas (Davies, dkk., 2003).

Gempa ini menyebabkan tanah longsor di bawah laut yang memicu tsunami, dengan korban jiwa antara 2.183 hingga 2.700 dan ribuan korban terluka.



Gambar 77. Peta pantai dari Teluk Demta, Indonesia, hingga Aitape, Papua Nugini. Tanda X menunjukkan pusat gempa yang berkembang dari kiri ke kanan, (Hurukawa dkk., 2003).

DAFTAR ISTILAH

| | |
|------------|--|
| Gempabumi | : Suatu peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi |
| Kedalaman | : Kedalaman gempa dalam kilometer |
| Likuifaksi | : Perilaku tanah yang berubah seperti <i>liquid</i> (cair) akibat gempa |
| Latitude | : Koordinat lintang tempat terjadinya gempa (°), Lintang Selatan (-), Lintang Utara (tanpa tanda) |
| Longitude | : Koordinat bujur tempat terjadinya gempa |
| Magnitudo | : Ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa dan merupakan hasil pengamatan seismograf |
| Megathrust | : Daerah pertemuan antar lempeng tektonik Bumi di lokasi zona subduksi |
| Sesar | : Satu bentuk rekahan pada lapisan batuan bumi yg menyebabkan satu blok batuan bergerak relatif terhadap blok yang lain |
| Shakemap | : Peta yang menggambarkan getaran/guncangan tanah yang diakibatkan oleh gempa |

Skala Modified Mercalli Intensity (MMI) : Ukuran kekuatan gempa bumi berdasarkan kerusakan yang diakibatkan oleh gempa tersebut.

Tsunami : Gelombang air laut besar yang dipicu oleh pusaran air bawah laut karena pergeseran lempeng, tanah longsor, erupsi gunungapi, dan jatuhnya meteor

Skala MMI (Modified Mercalli Intensity)

I MMI



Getaran tidak dirasakan kecuali dalam keadaan kecuai dalam keadaan luarbiasa oleh beberapa orang

II MMI



Getaran dirasakan oleh beberapa orang, benda-benda ringan yang digantung bergoyang

III MMI



Getaran dirasakan nyata dalam rumah. Terasa getaran seakan-akan ada truk berlalu

IV MMI



Pada siang hari dirasakan oleh orang banyak dalam rumah, di luar oleh beberapa orang, gerabah pecah, jendela/pintu berderik dan dinding berbunyi

V MMI



Getaran dirasakan oleh hampir semua penduduk, orang banyak terbangun, gerabah pecah, barang-barang terpelanting, tiang-tiang dan barang besar tampak bergoyang, bandul lonceng dapat berhenti

VI MMI



Getaran dirasakan oleh semua penduduk. Kebanyakan semua terkejut dan lari keluar, plester dinding jatuh dan cerobong asap pada pabrik rusak, kerusakan ringan

VII MMI



Kerusakan ringan pada rumah-rumah dengan bangunan dan konstruksi yang baik. Sedangkan pada bangunan yang konstruksinya kurang baik terjadi retak-retak bahkan hancur. cerobong asap pecah. Terasa oleh orang yang naik kendaraan

VIII MMI



Kerusakan ringan pada bangunan dengan konstruksi yang kuat. Retak-retak pada bangunan dengan konstruksi kurang baik, dinding dapat lepas dari rangka rumah, cerobong asap pabrik dan monumen roboh, air menjadi keruh

IX MMI



Kerusakan pada bangunan yang kuat, rangka-rangka rumah menjadi tidak lurus, banyak retak. Rumah tampak agak berpindah dari pondasinya. Pipa-pipa dalam rumah putus.

X MMI



Bangunan dari kayu yang kuat rusak, rangka rumah lepas dari pondasinya, tanah terbelah rel melengkung, tanah longsor di tiap-tiap sungai dan di tanah-tanah yang curam.

XI MMI



Bangunan-bangunan hanya sedikit yang tetap berdiri. Jembatan rusak, terjadi lembah. Pipa dalam tanah tidak dapat dipakai sama sekali, tanah terbelah, rel melengkung sekali.

XII MMI



Hancur sama sekali, Gelombang tampak pada permukaan tanah. Pemandangan menjadi gelap. Benda-benda terlempar ke udara

DAFTAR PUSTAKA

Australian Associated Press (AAP). (2015). Bali earthquake toll reaches 519 dead, 3,400 injured. Canberra Times. 20 July 1976.

Australian Associated Press (AAP). (2015). Bali quake; 200 children feared dead. Canberra Times. 17 July 1976.

Abercrombie R.E., Antolik, M., Felzer, K., Ekstrom, G. (2001). The 1994 Java tsunami earthquake: Slip over a subducting seamont. *Journal of Geophysical Research*. 106(B4):6595-6607.

Abidin, H.Z., Andreas, H., Kato, T., Ito, T., Meilano, I., Kimata, F., Natawidjaya, D.H., Harjono, H. (2009). Crustal Deformation Studies in Java (Indonesia) using GPS. *Journal of Earthquake and Tsunami*. 3(2):77-88.

Ambraseys, N.N. (1962). Data for The Investigation of The Seismic Sea-Waves in The Eastern Mediterranean. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 52(4):895-913.

Associated Press-AP. (2015). Quake rips Bali, kills at least 223. *The Morning Record*. 16 Juli 1976.

Arif, Ahmad (2018).Bencana dari Darat dan Lautan. Kompas. Terbit pada 2 Oktober 2018. Hlm.2

Bidang Seismologi Teknik BMKG. (2021). Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempa Bumi Mamuju Sulawesi Barat.

Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3).

Davies, H.L., Davies, J.M., Perembo, R.C.B., Lus, W.Y. (2003). The Aitape 1998 Tsunami: Reconstructing the Event from Interviews and

Field Mapping. In: Bardet, J.P., Imamura, F., Synolakis, C.E., Okal, E.A., Davies, H.L. (eds) *Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions*. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser, Basel.

Desfandi, M. (2019). *Kearifan lokal smong dalam konteks pendidikan: revitalisasi nilai sosial-budaya Simeulue*. Syiah Kuala University Press.

Dziewonski, A.M., Chou, T.A., Woodhouse, J.H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86:2825-2852.

Dziewonski, A.M., Woodhouse J. H. (1983). An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquake of 198. *Journal of Geophysical Research*. 88:3247-3271.

Dziewonski, A.M., Ekstrom, G., Salganik, M.P. (1995). Centroid moment tensor solutions for April - June 1994. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 88:69-78.

Elnashai, A.S., Kim, S.J., Yun, G.J., Sidarta, D. (2006) . *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. Mid-America Earthquake Center. MAE Center Report No. 07-02 Lavigne F., Gomez, C., Giffo, M., Wassmer, P., Hoebreck, C., Mardiatno, D., Priyono, J., Paris, R. (2007). "Field observations of the 17 July 2006 tsunami in Java". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7:177-183.

Engdahl, E. R., van der Hilst, R., dan Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(3):722-743.

Eva Safitri. BNPB: Tinggi Tsunami Capai 5 Meter di Palu. detikNews Sabtu 29 September 2018, 15:06 WIB

Fenomena Likuifaksi dan Tenggelamnya Rumah-Rumah di Petobo. Republika daring, edisi Selasa 2 Oktober 2018.

Robert Foster, Annelise Hagan, Nishan Perera, Cipto Aji Gunawan, Ivan Silaban, Yunaldi Yaha, Yan Manuputty, Ibnu Hazam, and Gregor Hodgson. (2006). Tsunami and Earthquake Damage to Coral Reefs of Aceh, Indonesia. Reef Check Foundation, Pacific Palisades, California, USA. 33 pp

Geist, E.L. (2000). Origin of the 17 July 1998 Papua New Guinea Tsunami: Earthquake or Landslide. Seismological Research Letters. 71(3):344-351

<https://bangapin.com/mengenang-gempa-30-september-2009-padang-sumatera-barat/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://bpbpd.padang.go.id/konten/mengenang-gempa-2009-di-kota-padang>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2009_earthquake_damage_in_Padang_\(6\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2009_earthquake_damage_in_Padang_(6).JPG). Diakses tanggal 12 Januari 2023.

https://celebrating200years.noaa.gov/magazine/tsunami_database/traveltimemap.html. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Damage_from_the_2009_Padang_earthquake._Indonesia_2009._Photo-AusAID_\(10690967855\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Damage_from_the_2009_Padang_earthquake._Indonesia_2009._Photo-AusAID_(10690967855).jpg). Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://dishub.acehprov.go.id/aceh-transit/smong-kearifan-lokal-untuk-mitigasi-bencana/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2005/usweax/>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://gunungsitolikota.go.id/2018/12/tugu-gempa-dan-tugu-durian-kota-gunungsitoli-diresmikan-menteri-hukum-dan-ham-ri/>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.ibnurusydy.com/tsunami-aceh/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.infonias.id/2022/07/tugu-peringatan-gempa-nias.html>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://www.kompas.com/tren/read/2021/03/28/081500065/hari-ini-dalam-sejarah--gempa-8-2-sr-guncang-nias-1.000-orang-tewas?page=all>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://www.kompas.id/baca/utama/2019/11/14/diguncang-gempa-beberapa-bangunan-seririt-terdampak>. Diakses tanggal 08 April 2023

<https://nasional.kompas.com/read/2018/12/26/11213301/26-desember-2004-gempa-dan-tsunami-aceh-menimbulkan-duka-indonesia>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://nasional.tempo.co/read/1271457/gempa-nias-bermagnitudo-49-terjadi-petang-tadi>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://nasional.tempo.co/read/207068/gempa-merusak-65-bangunan-cagar-budaya-di-padang>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.detik.com/berita/d-329153/gempa-akibatkan-tsunami-3-4-meter-di-simeulue-dan-singkil>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.detik.com/berita/d-330381/australia-dan-as-bantu-korban-gempa-nias>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.detik.com/berita/d-1213784/negara-asing-berbondong-bondong-bantu-indonesia>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.detik.com/berita/d-1498165/hasil-penelitian-lipi-tinggi-tsunami-di-mentawai-capai-14-meter>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.detik.com/internasional/d-2785312/7-foto-menarik-perubahan-di-aceh-ketika-diterjang-tsunami-dan-kini>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://news.google.com/newspapers?id=zKtVAAAAIBAJ&sjid=3uADA AAAIBAJ&pg=6616%2C3592129>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://news.google.com/newspapers?id=ZvtHAAAAIBAJ&sjid=NQAN AAAIBAJ&pg=5855%2C1905963>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://regional.kompas.com/read/2018/10/23/07215351/menuntaskan-rasa-penasaran-di-museum-tsunami-aceh?page=all>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pbaab149.pdf. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://travel.kompas.com/read/2022/12/25/183700027/18-tahun-tsunami-aceh-ini-7-tempat-untuk-mengenang-peristiwanya?page=all>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://trove.nla.gov.au/newspaper/article/110817735>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://trove.nla.gov.au/newspaper/article/110818049>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/slav/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://voi.id/memori/90150/gempa-padang-meluluhlantakkan-pemukiman-dalam-sejarah-hari-ini-30-september-2009>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://web.archive.org/web/20120824011144/http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2009/us2009mebz/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://web.archive.org/web/20120901203916/http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2005/usweax/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

https://web.archive.org/web/20120625214217/http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/slav/#Instrumental_Intensity.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://web.archive.org/web/20120817004055/http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

https://www.bbc.com/indonesia/berita_indonesia/2010/10/101027_men_tawaideatholls. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

https://www.bbc.com/indonesia/dunia/2010/10/101027_tsunamiwarnin g. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.kompas.com/tren/read/2021/03/28/081500065/hari-ini-dalam-sejarah--gempa-8-2-sr-guncang-nias-1.000-orang-tewas?page=all>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.kompas.id/baca/arsip/2022/06/26/bencana-nasional-tsunami-aceh>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.liputan6.com/global/read/3112264/30-9-2009-gempa-76-sr-mengguncang-padang-sumatera-barat>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://medan.kompas.com/read/2009/10/15/1023516/1.117.orang.me-ninggal.akibat.gempa.padang>. Diakses tanggal 12 Januari 2023

<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-data?maxYear=1999&minYear=1997&country=INDONESIA>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/img/pmelwavetraveltime.gif>.

Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.pu.go.id/index.php/berita/pembangunan-infrastruktur-pasca-tsunami-di-aceh>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.republika.co.id/berita/159345/kerugian-akibat-gempa-tsunami-mentawai-mencapai-rp-1916-m>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.republika.co.id/berita/regional/nusantara/11/09/30/lsbtly-pemkot-padang-ukir-1228-nama-korban-gempa>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

<https://www.republika.co.id/berita/qhh45t396/mengenang-gempa-padang-11-tahun-lalu>. Diakses tanggal 27 Januari 2023.

Hurukawa, N., Tsuji, Y., and Waluyo, B. (2003). The 1998 Papua New Guinea Earthquake and its Fault Plane Estimated from Relocated Aftershocks. *Pure and Applied Geophysics*. 160:1829-1841.

Imamura, F., Subandono, D., Watson, G., Moore, A., Takahashi, T., Matsutomi, H., Hidayat, R. (1997). Irian Jaya earthquake and tsunami

cause serious damage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 78(19):197-201

Johnston, Tim (13 April 2005). Indonesian Volcanoes Erupt; Thousands Evacuated. *VOA News*. Diakses tanggal 22 April 2006.

Joku, G.N., Davies, J.M., Davies, H.L. (2007). Eyewitness Accounts of the Impact of the 1998 Aitape Tsunami, and of Other Tsunamis in Living Memory, in the Region from Jayapura, Indonesia, to Vanimo, Papua New Guinea. In: Satake, K., Okal, E.A., Borrero, J.C. (eds) *Tsunami and Its Hazards in the Indian and Pacific Oceans*. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser Basel.

Leimena, S.L. (1979). Disaster in Bali caused by Earthquake, 1976 (A Report). *Disasters*. Pergamon Press Ltd. 3:85-87.

Maramai, A., Tinti S. (1997). Coastal effects and damage due to the 3rd June, 1994 Java Tsunami. In: Hebenstreit, G. (eds) *Perspectives on Tsunami Hazard Reduction*. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 9. Springer, Dordrecht.

Matsutomi, H., Shuto, N., Imamura, F., dan Takahashi, T. (2001) Field survey of the 1996 Irian Jaya earthquake Tsunami in Biak Island, *Natural Hazards*, 24(3):199–212.

McCloskey, J., Lange, D., Tilmann, F., Nalbant, S.S., Bell, A.F., Natawidjaja, D.H. and Rietbrock, A. (2010). The September 2009 Padang earthquake. *Nature Geoscience*, 3(2):70-71

Meisl, C.S.; Safaie S., Elwood K.J., Gupta R. & Kowsari R. (2006). Housing Reconstruction in Northern Sumatra after the December 2004 Great Sumatra Earthquake and Tsunami. *Earthquake Spectra*. 22: S777. doi:10.1193/1.2201668.

Mori, J., Mooney, W.D., Afnimar, Kurniawan, S., Anaya, A.I., Widiyantoro, S. (2007). "The 17 July 2006 tsunami earthquake in West Java, Indonesia". *Seismology Research Letter*. 78:201-207.

Nakano, M., Kumagai, H., K. Miyakawa, T., Yamashita, H., Inoue, M., Ishida, S., Aoi, Morikawa, N., and Harjadi, P. (2006). Source Estimates of the May 2006 Java Earthquake, *EOS Trans. AGU*, 87(45) doi:10.1029/2006EO450002.

Putra, N.P. BNPB: Tsunami di Palu Tingginya Hampir 6 Meter. liputan6 Sabtu 29 Sep 2018, 17:26 WIB

Naryanto, H.S. (2017). Potensi Gempa dan Tsunami Di Kabupaten Banggai Laut, Provinsi Sulawesi Tengah. *Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana*.

Natawidjaja, D. H. (2007). Gempabumidan Tsunami di Sumatera dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam, Laporan KHL, LIPI, Jakarta.

Neal, C. (2000). Geoscience Advisor, USGS and Office of US Foreign Disaster Assistance, Washington DC 20523. Tsuinfo Alert: National Tsunami Hazard Mitigation Program

Newman, A.V., Okal, E.A. (1998). Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The E/Mo discriminant for tsunami earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 103:26.885-26.898.

NOAA. (2023). NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database, 2100 BC to Present".

Nugraha, Indra (5 Oktober 2018). "Fenomena Semburan Lumpur Tenggelamkan Pemukiman Kala Gempa Sulteng". Mongabay. Diakses tanggal 6 Oktober 2018.

Nurdianasari, I., Awaluddin, M., Amarrohman, F.J. (2017). Analisis Deformasi Postseismik Gempa Nias 2005 Menggunakan Data Gps. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4), 381-390.

Papadopoulos, G.A., Imamura, F. (2001). A proposal for a new tsunami intensity scale. *Proc. ITS 2001. Session 5, No. 5-1.*

Polet, J., Kanamori, H. (2000). Shallow subduction zone earthquakes and their tsunamigenic potential. *Geophysical Journal International*. 142:684-702.

Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG. (2021). Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak. Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedeputusan Bidang Geofisika Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. ISBN: 978-602-52407-1-3.

Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG. (2021). Katalog Tsunami Indonesia. Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedeputusan Bidang Geofisika Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. ISBN: 978-602-52407-0-6.

Rahardjo, W., Sukandarrumidi, Rosidi, H. (1977) Geologic map of the Yogyakarta quadrangle, Java, scale 1:100,000, 8 pp., Geology Survey Indonesia, Ministry of Mines, Jakarta.

Rinaldo, A. Thousands flee as Indonesian volcano spews into life. *Hindustan Times*. 12 April 2005.

Sibuet, J-C., Rangin, C., Le Pichon, X., Singh, S., Cattaneo, A., Graindorge, D., Klingelhoefer, F., Lin, J-Y., Malod, J., Maury, T., Schneider, J-L., Sultan, N., Umber, M., Yamaguchi, H., and the "Sumatra aftershocks" team. (2009). 26 December 2004 great Sumatra–Andaman earthquake: Co-seismic and post-seismic motions

in northern Sumatra." *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 263(1-2):88-103.

Suyarso., Prayudha, Bayu., Iswari, Maridah Yulia., (2018). *Adaptasi Mangrove Terhadap Perubahan Lingkungan: Suatu Studi pada Gempa Nias, Sumatera Utara, Maret 2005*. *Oceanologi dan Limnologi di Indonesia* 2018 3(2): 155-164

Synolakis C.E., Bardet, J-P., Borrero, J.C., Davies, H.L., Okal, E.A., Silver, E.A., Sweet, S., Tappin, D.R. (2002). The slump origin of the 1998 Papua New Guinea Tsunami. *Proc. Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.

Synolakis, C., Imamura, F., Tsuji, Y., Matsutomi, H., Tinti, S., Cook, B., Chandra, Y.P., Usman, M. (1995). Damage, conditions of East Java Tsunami of 1994 analyzed. *EOS Transactions AGU*. 76:261-262.

Telford, John., and John Cosgrave. (2006). *Synthesis Report: Joint evaluation of the international response to the Indian Ocean tsunami*, published by the Tsunami Evaluation Coaliton (TEC). July 2006, 176 p.

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. ISBN: 978-602-5489-01-3

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2018). *Kajian Rangkaian Gempa Lombok, Provinsi Nusa Tenggara Barat, 29 Juli 2018 (M6,4) 5 Agustus 2018 (M7,0) 19 Agustus 2018 (M6,9)*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Tim Survei Gempabumi BMKG. (2018). Laporan Survei Gempa Lombok 5 Agustus 2018 M7,0.

Tim Survey Tsunami Teluk Palu BMKG. (2018). Laporan Pendahuluan Gempabumi Dan Tsunami Donggala – Palu 2018.

Tsuji, Y., Imamura, F., Matsutomi, H., Synolakis, C.E., Nanang, P.T., Jumadi, Harada, S., Han, S.S., Arai, K., Cook, B. (1995). Field survey of the east Java earthquake and tsunami of June 3, 1994. *Pure and Applied Geophysics*. 144:839-854.

United Press International (UPI). (2015). Quake jolts island of Bali; 275 killed. *Eugene Register-Guard*. 15 Juli 1976.

US Foreign Disaster Aid Assistance. (2023). Disaster case report: Indonesia/Bali - Earthquake. Washington D.C. hlm. 1-4.

USGS (a). (2023). M 7.7 - 264 km ESE of Luwuk, Indonesia. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0008yx2/executive>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

USGS (b). (2023). M 7.7 - 264 km ESE of Luwuk, Indonesia. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0008yx2/shakemap/intensity>. Diakses tanggal 12 Januari 2023.

Walter, T. R., Wang, R., Luehr, B.-G., Wassermann, J., Behr, Y., Parolai, S., Anggraini, A., Günther, E., Sobiesiak, M., Grosser, H., Wetzell, H.-U., Milkereit, C., Sri Brotopuspito, P. J. K., Harjadi, P., Zschau, J. (2008). The 26 May 2006 magnitude 6.4 Yogyakarta earthquake south of Mt. Merapi volcano: Did lahar deposits amplify ground shaking and thus lead to the disaster?, *Geochemistry Geophysics Geosystem*. 9:Q05006, doi:10.1029/2007gc001810.

Weeks, Linton (2011). The Recorded History Of Quakes Is A Long One. National Public Radio



BMKG

Jl. Angkasa 1 No. 2, Kemayoran, Jakarta 10720

Telp : (021) 4246321 | Fax : (021) 4246703 PO. BOX 3540 Jkt



www.bmkg.go.id



inatews.bmkg.go.id



InfoBMKG