

Kesan Gempa 7.6 M_w Padang Indonesia, 30 September 2009 (Earthquake Impacts of the M_w 7.6, Padang, Indonesia, 30 September 2009)

SRI ATMAJA P. ROSYIDI*, TAJUL ANUAR JAMALUDDIN,
LIM CHOUN SIAN & MOHD. RAIHAN TAHA

ABSTRAK

Gempa bumi pada 30 September 2009, dengan kekuatan 7.6 M_w yang melanda Bandar Padang, Padang Pariaman dan wilayah Sumatera Barat, Indonesia, telah mengorbankan lebih daripada 1200 orang. Ribuan buah rumah, bangunan dan infrastruktur lain telah mengalami kerosakan tahap ringan hingga teruk. Kajian ini bertujuan untuk melaporkan kesan gempa bumi Padang terhadap kerosakan bangunan dan tanah runtuh yang berlaku pada kawasan Bandar Padang, Padang Pariaman, Pariaman dan Agam. Kesan gempa bumi ini dianalisis berdasarkan data geologi, geoteknik dan impak geo-bencana yang telah dikumpulkan daripada berbagai sumber dan hasil kajian lapangan. Hasil kajian menunjukkan bahawa kerosakan di kawasan bandar Padang dan Padang Pariaman lebih disebabkan oleh kualiti bangunan yang tidak memenuhi piawaian bangunan dan pengaruh geologi kawasan, iaitu berlakunya amplifikasi tanah disebabkan oleh endapan aluvium yang tebal. Kerosakan teruk pada bangunan antara lainnya dikaitkan dengan kehadiran jalur-jalur sesar kecil atau ketakselajaran pada lapisan bawah tanah. Beberapa kejadian tanah runtuh besar yang berlaku di Pariaman dan Agam adalah disebabkan oleh geologi kawasan, geomorfologi dan morfologi cerun yang curam. Kajian lanjut diperlukan bagi mengenal pasti dan menilai risiko bencana untuk persediaan menghadapi bencana gempa bumi di masa hadapan.

Kata kunci: Amplifikasi tanah; gempa Padang; geo-bencana; geologi; tanah runtuh

ABSTRACT

The earthquake of 30 September 2009, 7.6 M_w that strucked the city of Padang, Padang Pariaman and nearby areas in West Sumatra, Indonesia, killed more than 1200 people. Thousands of damaged houses, buildings and infrastructure have been reported with low to severe damage level. This research reports the effect of the Padang earthquake in terms of building damages and landslides that occurred in the city of Padang, Padang Pariaman, Pariaman and Agam. Analysis on earthquake effects was carried out based on the geology, geotechnical, building damages and geohazards data collected from various sources and field works in affected areas. Results from field work showed that damages on the building structures in Padang and Padang Pariaman was due to the quality of construction which did not meet the building code and standard requirements, and the effect of geological conditions, i.e., ground amplification on deep layer of alluvial deposit. Some observed damage in the buildings were related to the building location constructed on the fault lines and soil or rock layers discontinuity. From the site visit, it was found that landslide cases which occurred in Pariaman and Agam after the earthquake were caused by the topography, geomorphology of area and steep slopes. Further studies should be carried out for hazard risks identification and assessment in order to prepare for future earthquakes.

Keywords: Geohazard; geology, ground amplification; landslide, padang earthquake

PENGENALAN

Kejadian gempa bumi pada 30 September 2009, berkekuatan 7.6 M_w yang melanda Bandar Padang, Padang Pariaman dan wilayah Sumatera Barat, Indonesia, telah mengorbankan lebih daripada 1200 orang. Dua gempa susulan berlaku pada hari yang sama berdekatan dengan epipusat gempa pertama. Keesokan harinya 1 Oktober 2009 berlaku pula gempa bumi susulan di Jambi pada jam 08.52 WIB. Gempa-gempa ini telah menyebabkan berbagai kerosakan pada bangunan di beberapa kawasan di Sumatera Barat. Rajah 1 menunjukkan beberapa contoh kerosakan bangunan dan gelinciran tanah akibat gempa bumi tersebut.

Kajian ini bertujuan untuk melaporkan maklumat gempa bumi 30 September 2009 yang berlaku di Padang, Indonesia, latar belakang geologi kawasan, kesan dan impak gempa terhadap manusia, geo-bencana dan kerosakan infrastruktur. Maklumat geologi kawasan dan kesan gempa seperti data-data korban dan kerosakan bangunan diperolehi daripada sumber-sumber beberapa pusat penyelidikan dan organisasi bantuan kemanusiaan di Indonesia (seperti Muhammadiyah Disaster Management Center (MDMC), Palang Merah Indonesia (MPI)). Pemerhatian langsung di lapangan juga dijalankan bagi mengenal pasti jenis-jenis kerosakan bangunan akibat gempa dan impak gempa terhadap sifat kejuruteraan geoteknik dan geologi khususnya

pada beberapa kejadian amplifikasi gegaran pada tanah, aliran puing (debris flow) dan tanah runtuh. Amplifikasi tanah sangat dipengaruhi oleh perbezaan impedans antara batuan dan tanah, perbezaan halaju gelombang ricih dan sifat histeresis tanah. Oleh itu, keadaan geologi dan tanah yang berbeza pada setiap kawasan menghasilkan amplifikasi dan respons tanah yang berbeza sewaktu kejadian gempa. Akibatnya, respons di antara suatu bangunan dengan bangunan yang lain juga adalah berbeza. Faktor amplifikasi tanah menyebabkan magnitud gegaran daripada batuan dasar meningkat semasa dirambatkan ke permukaan tanah. Kejadian amplifikasi ini juga boleh menyebabkan tanah berbutir menjadi lemah atau dikenali sebagai pencecairan tanah (liquefaction) akibat wujudnya kenaikan tekanan tanah dan air liang.

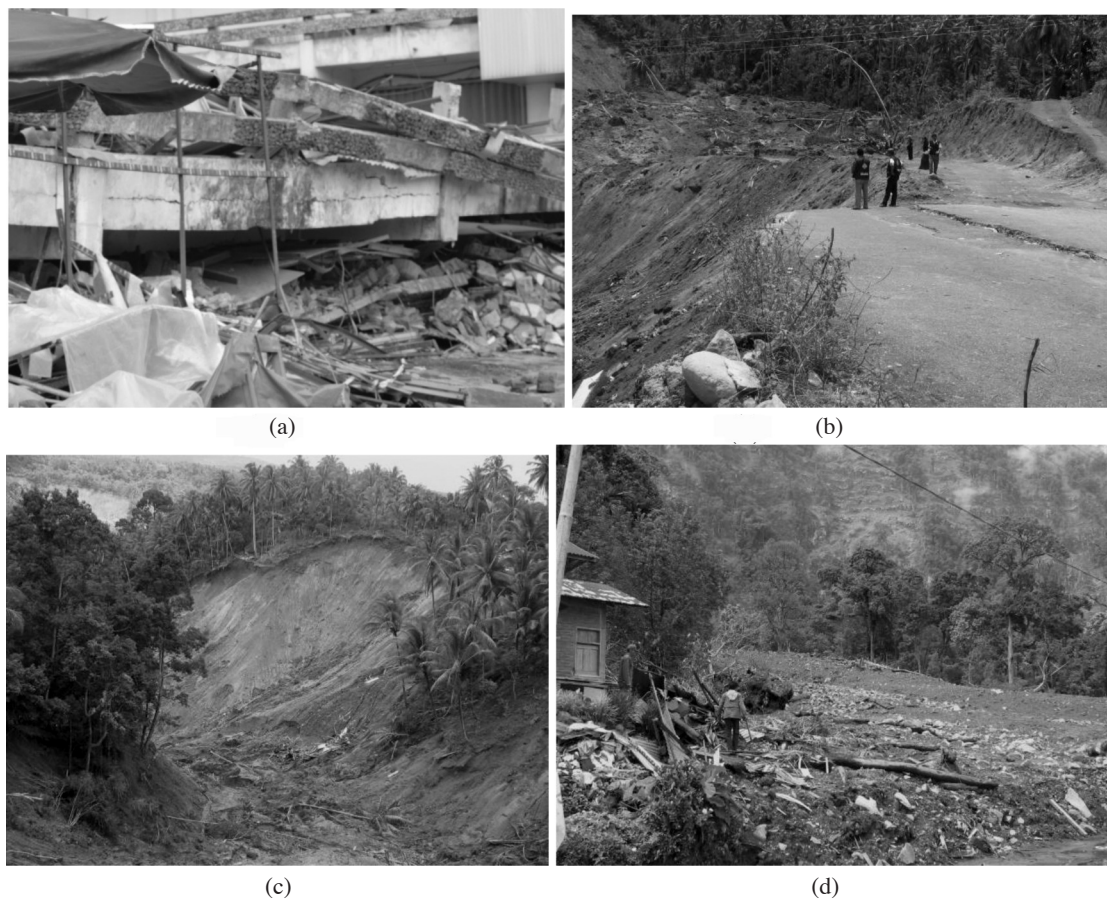
SEJARAH GEMPA DAN KESEISMOSAN SUMATERA

Pulau Sumatera, Indonesia terletak dalam sebahagian daripada jalur Lingkaran Api Pasifik. Panjangnya lebih kurang 5,600 km, dari kepulauan Andaman di sebelah barat dan utara, hingga Busur Banda Timur di sebelah timur dan selatan. Jalur ini seterusnya mengunjur hingga ke

Maluku dan Sulawesi Utara. Kawasan di sepanjang pulau Sumatera terdedah kepada risiko gempa bumi berskala kecil hingga ke besar ($>6 M_w$). Jadual 1 menunjukkan maklumat daripada USGS (2009) mengenai sejarah gempa-gempa bumi besar yang pernah berlaku daripada tahun 2000 hingga Januari 2010 di pulau Sumatera.

Kejadian gempa bumi yang berterusan di Pulau Sumatera adalah kerana letaknya di dalam zon bencana seismik tinggi kerana proses subduksi yang berterusan berlaku di bawah kepulauan Indonesia (Rajah 2). Rangkaian pulau-pulau di Indonesia, khususnya pulau Sumatera dan Jawa, dicirikan oleh aktiviti-aktiviti gempa dan kewujudan barisan gunung berapi yang dihasilkan oleh mekanisme geseran ricih plat tektonik India-Australia di bawah plat tektonik Sunda-Burma (Petersen et al. 2007). Mekanisme sesar songsang, tujahan, gelincir-jurus dan normal juga dilaporkan berlaku berdasarkan data gempa yang berpusat kurang daripada 50 km (Petersen et al. 2007; Dziejowski et al. 1980).

Pertemuan antara plat-plat Indo-Australia dan Sunda (Eurasia) membentuk zon subduksi Sunda yang ditandai oleh palung Sunda seperti ditunjukkan dalam Rajah 4 (Sieh & Natawidjaja 2000). Di sepanjang zon subduksi Sunda

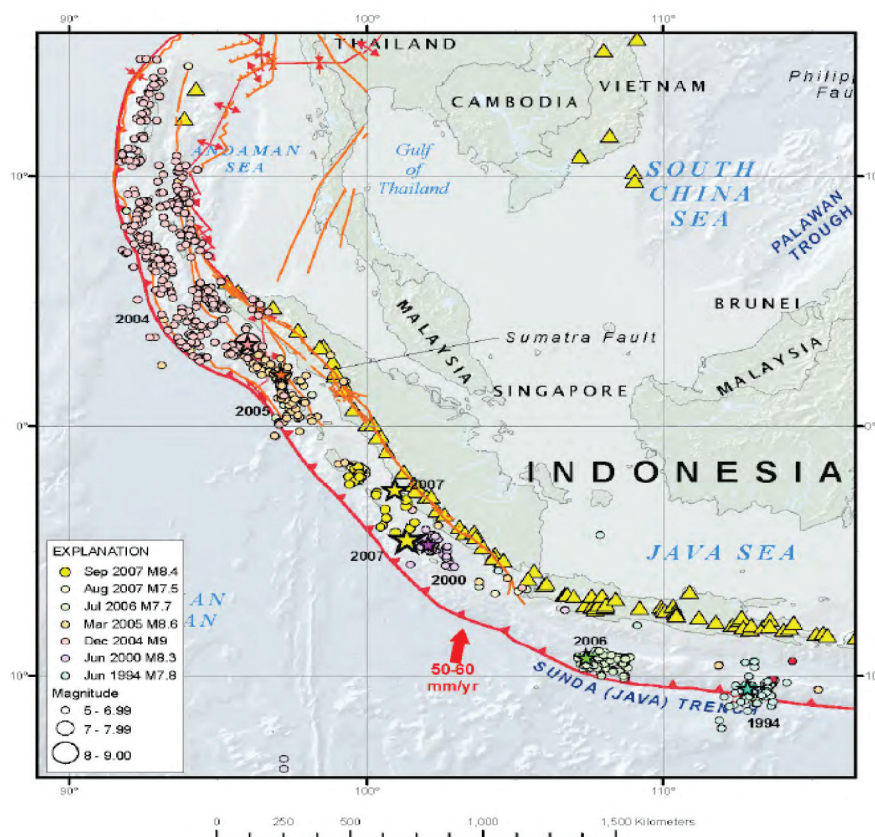


RAJAH 1. Fotograf yang menunjukkan beberapa contoh impak gempa bumi di Sumatera Barat: (a) kerosakan teruk runtuh bangunan (b). kejadian geobencana tanah runtuh yang memutuskan sistem pengangkutan jalan di Pariaman (c). tanah runtuh berskala besar yang menimbus lebih daripada 100 orang dan (d). aliran puing yang menimbus dan meruntuhkan beberapa bangunan di Maninjau

JADUAL 1. Sejarah kejadian gempa besar di pulau Sumatera, Indonesia (2000-2009)

Kejadian	Lokasi	Kedudukan	Kekuatan	Korban
2000 06 04	Lepas pantai Sumatera bahagian selatan	4.72°S 102.08°E	7.9	103
2002 11 02	Lepas pantai Sumatera bahagian utara	3.024°N 96.181°E	7.4	3
2004 07 25	Sumatera bahagian selatan	2.455°S 103.977°E (gempa bumi di darat 105 km daripada Palembang)	7.3	---
2004 12 26	Lepas pantai Sumatera bahagian utara (Aceh) -Andaman	3.316°N 95.854°E	9.1	227,898
2005 01 01	Lepas pantai barat Sumatera bahagian utara	5.09°N 92.30°E	6.7	---
2005 03 28	Lepas pantai barat Sumatera bahagian utara	2.074°N 97.013°E (Pulau Nias, Sumatera Utara)	8.6	1,313
2007 03 06	Sumatera bahagian selatan	0.536°S 100.498°E (gempa bumi di darat 49 km daripada Padang)	6.4	67
2007 09 12	Sumatera bahagian selatan	4.520°S 101.374°E	7.9	25
2007 09 12	Kepulauan Mentawai	2.506°S 100.906°E	8.5	---
2007 09 20	Kepulauan Mentawai	2.025°S 100.136°E	6.7	---
2007 10 24	Kepulauan Mentawai	3.838°S, 100.909°E	6.8	---
2008 02 25	Kepulauan Mentawai	2.370°S, 100.021°E	7.3	---
2009 09 30	Lepas pantai Sumatera bahagian selatan	0.89°S 99.96°E (gempa bumi di lepas pantai 57 km daripada Pariaman)	7.6	1,117
2009 10 01	Sumatera bahagian selatan	2.44°S 101.59°E (gempa bumi di darat, wilayah Jambi)	6.6	---

[Sumber: Historic World Earthquakes, USGS (2009a) http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php#indonesia]



RAJAH 2. Peta gempa 1994-2007 yang menunjukkan sebaran gunung berapi (dalam tanda segitiga), gempa (tanda bintang dan lingkaran), jalur-jalur sesar kerak utama (*major crustal faults* dalam tanda garis oren) dan sempadan plat (garis merah)

ini (Rajah 3), gempa dihasilkan daripada mekanisme sesar tujan pada antara muka kedua-dua plat. Gempa dalam boleh berlaku daripada hasil pergerakan plat Indo-Australia yang memanjang ke bawah hingga kedalaman ratusan kilometer. Gempa cetek dalam kawasan subduksi ini pula boleh dihasilkan daripada aktiviti keseismosan akibat mekanisme sesar normal intra-plat dan sesar-songsang dalam plat India and Australia yang bertindih dengan plat Sunda dan Burma pada kedalaman yang cetek iaitu kurang daripada 30 km. Ini ditambah pula dengan kehadiran sesar Mentawai dan Sumatera, menjadikan pulau Sumatera berada dalam risiko bencana tinggi yang melibatkan aktiviti gempa bumi, tsunami dan volkano.

Wilayah Sumatera Selatan termasuk dalam zon sempadan plat tektonik dengan aktiviti seismos yang paling aktif di dunia. Zon ini mempunyai pergerakan kemiringan ke arah utara-timur dengan kadar pergerakan sekitar 50 mm/tahun antara plat Indo-Australia dan Sunda. Gempa zon subduksi besar (pertemuan plat) yang pernah dirakam terjadi ialah pada tahun 1833 ($\sim M9.0 \pm 0.2$), 1861 (M8.5), 2000 (Mw7.9), 2005 (Mw8.6) (Natawidjaja et al. 2006; Newcomb & McCann 1987; Petersen et al. 2007; Zachariassen et al. 1999), dan 2007 (Mw 8.4, 7.9) (USGS 2009a).

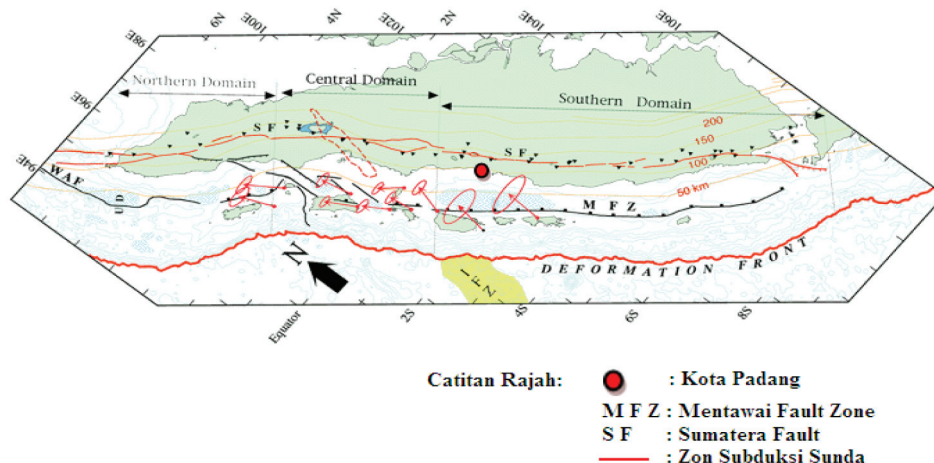
Selain zon subduksi, gempa juga kemungkinan berasal daripada pergerakan sesar pada Sesar Sumatera dan Mentawai (Rajah 3). Sesar Sumatera merupakan sesar jurus-gelincir terbesar dan hampir keseluruhannya terletak pada struktur tanah di puncak barisan perbukitan sepanjang pulau Sumatera. Sieh dan Natawidjaja (2000) telah membuat satu peta zon sesar Sumatera secara terperinci bagi mengenal pasti kemungkinan segmen sesar yang boleh digunakan untuk satu penilaian bencana seismik. Berasaskan geomorfologi dan topografi kawasan sesar, kajian mereka telah membahagi sistem sesar kepada 20 segmen dengan panjang segmen terpendek daripada 35 km hingga yang segmen terpanjang yang mencapai 220 km. Mereka juga telah membahagi sistem sesar Sumatra kepada 19 sesar yaitu: Seulimeum, Aceh, Tripa, Renun,

Toru, Angkola, Barumon, Sumpur, Sianok, Sumani, Suliti, Siulak, Dikit, Ketaun, Musi, Manna, Kumering, Semangko dan Sunda. Sesar Sumatera ditunjukkan terbentang ke seluruh bahagian selatan pulau Sumatera yang secara topografinya merupakan daerah pergunungan. Sesar ini juga melepasi bahagian selatan wilayah Sumatera Barat yang garis sesarnya berdekatan dengan kawasan bandar Padang, Pariaman dan Agam yang menjadi kawasan kajian dan pemerhatian langsung dalam kertas kerja ini. Irsyam et al. (2008) telah membangunkan model seismotektonik, peta dan parameter sesar di kawasan Indonesia daripada pelbagai sumber rujukan. Hasil penemuan mereka menunjukkan bahawa sesar Sumatera mempunyai jarak yang lebih panjang berbanding sesar-sesar yang lain.

GEOLOGI PADANG DAN KAWASAN YANG BERHAMPIRAN

Kawasan bandar Padang terbentuk oleh gabungan formasi batuan metamorf, batuan sedimen, batuan vulkanik, batuan terobosan igneus dan endapan aluvium. Kastowo et al. (1996) dan Prawiradisastra et al. (2009) menjelaskan bahawa batuan-batuan tersebut berjulat usia dari zaman Jura sehingga Resen. Formasi batuan yang lebih tua berada di bahagian timur Padang. Sebaran batuan boleh ditafsirkan daripada keadaan morfologinya. Morfologi landai atau dataran rendah seperti lokasi sekitar lapangan udara bandar Padang, terdiri daripada enapan aluvium. Enapan ini terdiri daripada campuran tanah berlodak, pasir dan kerikil. Enapan rawa pula ditemui di bahagian utara kawasan lapangan terbang Minangkabau di Padang. Enapan rawa ini merupakan kawasan paya di daerah pantai dengan formasi tanah utamanya terdiri daripada campuran pasir, tanah lempung dan lumpur.

Secara amnya, lembangan Padang boleh dibezakan kepada tiga formasi geologi (Prawiradisastra et al. 2009). Pertama: "Kipas Aluvium" terletak di dataran bahagian selatan dan sebelah timur bandar Padang, dan terdiri daripada fluviovolkanik yang terkonsolidat bersama enapan lahar, tuf vulkanik dan andesit. Kipas aluvium



RAJAH 3. Peta zon subduksi, sistem sesar Mentawai dan Sumatera

juga diliputi oleh lapisan pasir kasar Pleistosen dengan ketebalan antara 5 hingga 10 m. Formasi kedua adalah “Pasir Pantai” yang terdiri daripada 15 buah perbukitan pasir yang rendah dengan lebar kawasan sekitar 3 km. Kawasan ini terletak di sebelah utara dan merupakan tahap pembentukan pantai pada masa Pleistosen. Formasi ketiga adalah “Rawa Belakang” yang terdapat antara kambusan pasir yang merupakan enapan lagoon yang secara dominannya diisi oleh lumpur hingga pasir lempungan (Prawiradisastra et al. 2009).

Keadaan geologi kawasan di bandar Pariaman dan Padang Pariaman jauh berbeza berbanding geologi di sekitar Bandar Padang. Formasi batuan di bahagian selatan Pariaman terdiri daripada enapan permukaan hampir sama cirinya dengan endapan aluvium di bandar Padang (Kastowo et al. 1996). Di bahagian timur dan utara Pariaman, formasi batuan yang ditemui adalah sangat kompleks. Majoriti batumannya adalah batuan vulkanik yang terdiri daripada tuf, pumis dan andesit. Pada sebahagian kawasan, batumannya terdiri daripada tuf, pumis hornblend-hipersten dan lapili pumis agak padat yang terletak di atas pumis dan andesit. Formasi pumis dan andesit ini membentang hingga kawasan berdekatan tasik Maninjau (wilayah Agam). Menurut Westerveld (1953), kawasan ini terbentuk daripada letusan rekahan yang berhubungan dengan sesar Sumatera atau letusan terakhir daripada kaldera Maninjau. Di beberapa lokasi, formasi tuf pumis dan andesit ini bercampur dengan lapisan-lapisan pasir dan kerikil yang kurang padat. Keadaan ini memungkinkan berlakunya pencairan tanah semasa gegaran gempa bumi.

KAJIAN KESEISMOSAN GEMPA BUMI 30 SEPTEMBER 2009

Gempa bumi yang melanda Padang dan kawasan sekitarnya berlaku pada 30 September 2009, jam 17:16:10 Waktu Indonesia Barat (WIB) atau jam 18:16:10 waktu Malaysia, berpusat di 0.84° S dan 99.65° T (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, BMKG Indonesia). Menurut sumber USGS, gempa bumi tersebut berpusat di 0.89° S dan 99.96° T (USGS). Kedalaman gempa dianggarkan sekitar 71 km (BMKG) atau 85 km (USGS). Lokasi pusat gempa berada sejauh lebih kurang 60 km barat barat-laut dari bandar Padang.

Menurut USGS (2009), gempa bumi tersebut berlaku akibat suatu hasil tolakan miring sesar berhampiran antara muka sempadan plat Australian dan Sunda. Plat Australia bergerak ke arah utara-timur laut terhadap plat Sunda pada halaju lebih kurang 60 mm/tahun. Bagaimanapun, berdasarkan maklumat mekanisme sesar dan kedalaman gempa (70 hingga 85 km) gempa bumi ini dimungkinkan berlaku akibat aktiviti subduksi plat Australia. Tsunami tidak berlaku susulan kejadian gempa bumi ini kerana tidak melibatkan canggahan pada lantai laut dan fokus gempa terletak pada kedalaman melebihi 20 km, meskipun syarat lain berlakunya tsunami telah dipenuhi iaitu berepipusat di laut.

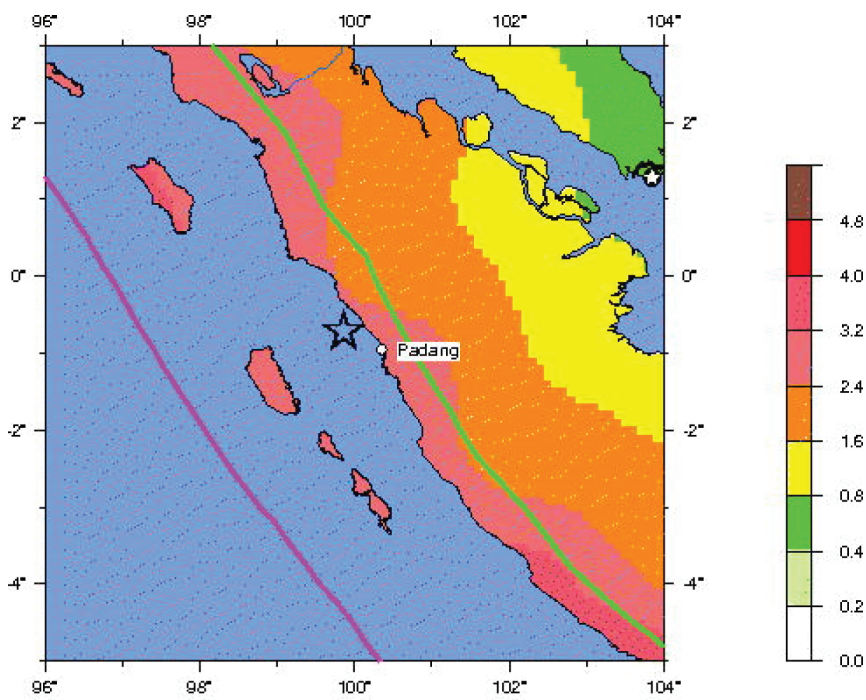
Pada hari yang sama, turut berlaku satu gempa susulan bermagnitud lebih dari 6.2 SR atau $5.5 M_w$, pada jam 17:38:52 WIB berpusat di 0.72° S dan 99.94° T (BMKG) dengan kedalaman epipusat 110 km (BMKG) atau 104.2 km (USGS), kira-kira 22 km ke Barat Daya Pariaman, Sumatera Barat. Menurut USGS (2009), ianya berpusat di 0.717° S dan 100.070° T. Suatu lagi gempa susulan berkekuatan 7.0 SR (BMKG) atau $6.6 M_w$ (USGS) dengan kedalaman 10 km (USGS) berlaku pada tarikh 1 Oktober 2009 pada jam 08.52 WIB yang berpusat di 2.44° S dan 101.56° T (BMKG). Gempa susulan ini berkedudukan di darat, tepatnya pada wilayah Jambi, Sumatera sekitar 46 km arah tenggara daripada Sungai Penuh. Kedua-dua lokasi gempa ditunjukkan dalam Rajah 4.

Perbezaan epipusat gempa daripada pencerapan BMKG dan USGS disebabkan oleh perbezaan kaedah penentuan lokasi epipusat. Pengiraan epipusat yang dilakukan oleh BMKG adalah berasaskan data seismograf daripada stesen terdekat melalui rambatan gelombang jasad primer yang dilepaskan pada saat terjadinya pelepasan tenaga gempa di pusat gempa. Oleh itu, skala penunjuk kekuatan tenaga gelombang yang digunakan adalah skala Richter (SR). USGS pula menggunakan skala “Momen Magnitude” (M_w) yang dihasilkan daripada pencerapan beberapa stesen perakam tenaga gelombang seismik yang tergabung dalam jejaring seismik USGS dan dikira berdasarkan faktor yang menghasilkan pecahan sepanjang sesar. Walau bagaimanapun, perbezaan pengiraan epipusat maupun kedalaman pusat gempa daripada BMKG dan USGS untuk kes gempa Padang ini adalah tidak signifikan, kerana kedua-dua lokasi adalah sangat berdekatan dan masing-masing masih berada dalam slip vektor sesar yang sama.

Gempa Padang dan gempa susulan Jambi boleh dikelaskan kepada gempa dangkal (kedalaman ≤ 70 km). Tenaga gelombang seismik daripada kedua-dua gempa ini dirambatkan mengikuti kadar pelemahan yang dipengaruhi oleh keadaan geologi setempat hingga tenaga seismik tersebut dilepaskan ke permukaan tanah. Daripada cerapan National Earthquake Information Center, USGS (2009a), ditunjukkan bahawa gempa bumi di Padang (30 September 2009), telah menghasilkan pecutan gelombang gempa maksimum di kawasan Bandar Padang antara 240-320 gals atau 0.24 – 0.33 g (24 - 33% g). Kawasan yang mengalami pecutan maksimum pada nilai tersebut boleh dikelaskan kepada gerakan sangat kuat dengan potensi kerosakan sederhana hingga kuat atau jika dikelaskan dalam skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*), ianya dianggarkan berada pada skala VII (Rajah 5). Skala MMI digunakan untuk mengukur kerosakan yang terjadi pada bangunan atau getaran yang dirasakan oleh manusia. Skala VII dalam sistem MMI yang berlaku dalam kawasan dengan pecutan maksimum bererti kerosakan ringan boleh berlaku pada bangunan rumah dengan struktur binaan yang baik manakala keretakan bangunan yang teruk hingga musnah boleh berlaku pada bangunan yang tidak



RAJAH 4. Peta lokasi gempa utama dan susulan pada 30 September 2009



SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA

2009 09 30 10:16:09 UTC 0.72S 99.86E Depth: 81 km, Magnitude: 7.5

Peak Ground Acceleration (m/s²) with 10% Probability of Exceedance in 50 Years

RAJAH 5. Peta pecutan tanah puncak (PGA) akibat gempa Padang

dibina dengan baik. Untuk kawasan di Agam dan Padang Pariaman, rambatan tenaga gelombang daripada gempa mengakibatkan kerosakan bangunan yang dibina tidak mengikuti piawaian untuk bangunan tahan gempa.

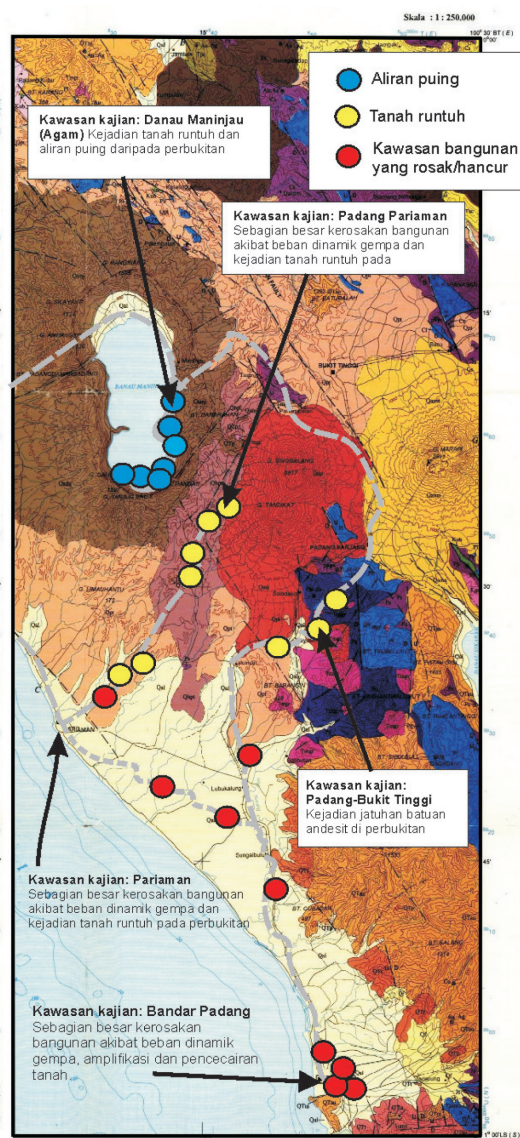
CERAPAN LAPANGAN IMPAK GEMPA BUMI DI PADANG

Kawasan yang dicerapi dalam kajian ini adalah kawasan yang terjejas oleh gempa yang meliputi empat kawasan iaitu bandar Padang, Padang Pariaman, Agam dan Bukit Tinggi. Kerosakan bangunan akibat getaran gempa, pencecairan tanah dan bencana geologi (seperti amplifikasi lapisan sediment/deposit, tanah runtuh dan aliran puing) menjadi fokus dalam kajian lapangan yang dijalankan. Kawasan kajian, plot hasil pencerapan dan titik-titik lokasi kerosakan bangunan dan bencana geologi yang belaku dalam peta geologi Padang dan kawasan sekitarnya diberikan dalam Rajah 6. Seperti yang ditunjukkan daripada Rajah 6, struktur geologi yang membentuk kota Padang adalah endapan aluvium (Q_{al}); endapan kipas aluvial (Q_p), batuan tuf kristal yang telah keras (Q_{tk}) atau batuan aliran lainnya (Q_{tau} iaitu lahar dan endapan kolumivium); andesit dan tuf (Q_{ta}) serta andesit berbutir kasar (Q_{tp}). Batuan endapan aluvium dan ujung endapan kipas aluvial secara amnya bersifat lembut dan tidak padat. Begitu pula dengan batuan andesit juga lebih bersifat longgar dan lembut. sebahagian besar kawasan Pariaman pula majoritinya dibentuk oleh formasi batuan vulkanik kompleks (Rajah 6).

KEROSAKAN BANGUNAN DI KAWASAN ALUVIUM (BANDAR PADANG DAN PARIAMAN)

Seperti yang telah dijelaskan di atas bahawa geologi kawasan bandar Padang terdiri daripada batuan metamorf, batuan sedimen, batuan vulkanik, batuan terobosan dan mendapan aluvium. Mendapan alluvium yang longgar dan tak terkonsolidat membentuk dasar tanah di kawasan Padang hingga Pariaman.

Kerosakan bangunan akibat gempa bumi paling banyak berlaku di Padang dan Pariaman. Hasil pencerapan di lapangan mendapati bahawa kerosakan yang terjadi di Padang menunjukkan pola sebaran tertentu yang kemungkinannya berkait rapat dengan faktor kualiti pembinaan bangunan yang rendah, faktor semulajadi tanah dan keadaan geologi. Walau bagaimanapun, sebaran kerosakan yang meluas di bandar Padang dan Pariaman pada umumnya disebabkan oleh kegagalan struktur bangunan untuk menahan beban dinamik akibat gegaran gempa, 30 September 2009. Bukti mengenai canggaaan tanah yang signifikan di bandar Padang tidak banyak dijumpai. Jalur-jalur sesar dan struktur ketakselajaran pada permukaan tanah atau batuan di kawasan bandar Padang dan Pariaman tidak dapat dikesan kerana ditutupi lapisan tebal mendapan aluvium. Walau bagaimanapun, pencerapan yang dijalankan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (Puslitbang Jalan) Bandung menemui bukti bahawa berlakunya ubah bentuk di sekitar pantai Padang yang ditunjukkan oleh keretakan



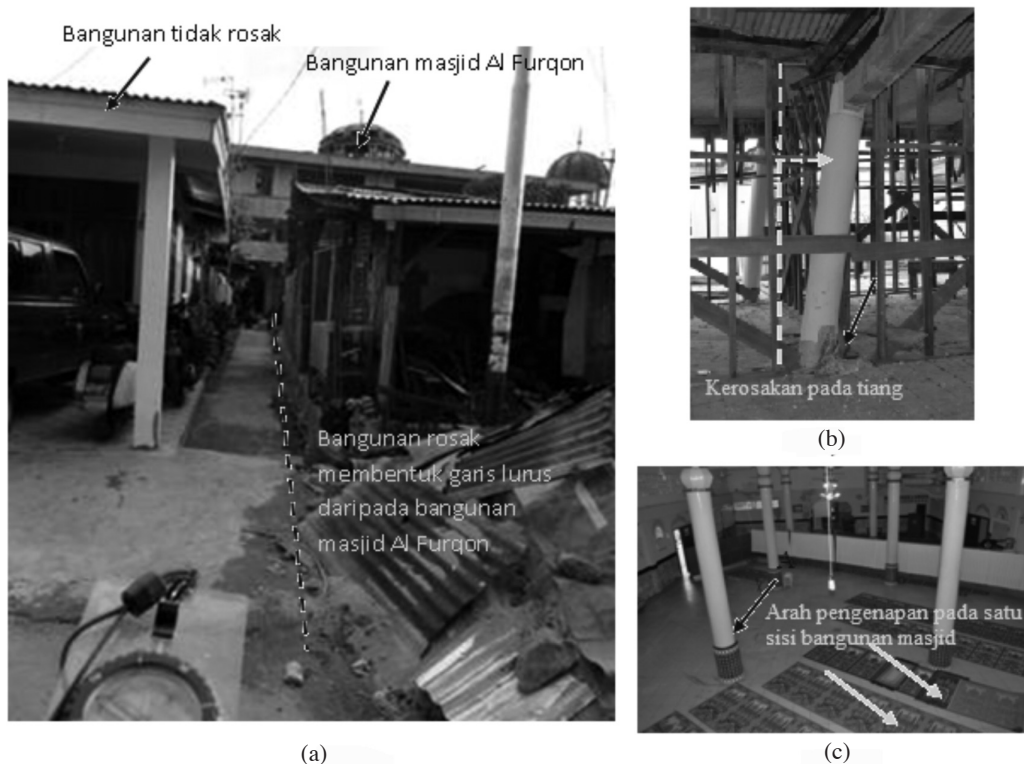
RAJAH 6. Plot kawasan kajian pada beberapa lokasi kerosakan bangunan dan bencana geologi di Padang (Peta geologi bersumber daripada Kastowo et al. 1996)

jalan raya (Rajah 7). Namun, ubah bentuk ini bersifat setempat sahaja dan tidak meluas.

Meskipun kesan canggaaan tidak dapat dikesan dengan jelas pada permukaan tanah, namun di beberapa lokasi didapati kerosakan bangunan yang mungkin disebabkan oleh kedudukannya di atas lapisan aluvium yang berbeza ketebalannya. Perbezaan ketebalan lapisan aluvium ini menyebabkan pergerakan tanah yang tidak seragam. Kesan amplifikasi gempa akan lebih dirasai pada lapisan alluvium yang lebih tebal. Penyiasatan di tapak menunjukkan bahawa beberapa bangunan seperti Masjid Al-Furqon, Jalan Jati VI dan beberapa bangunan di kawasan sekitarnya mengalami kerosakan setempat (Rajah 8). Pada bangunan masjid tersebut, hanya satu bahagian sahaja yang mengalami kerosakan atau pemendapan bangunan.



RAJAH 7. Retakan memanjang sepanjang ± 60 m, ± 2 m ke arah jalan dengan lebar bukaan sekitar 5 - 10 cm di KM 16.2 Jalan Padang [Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan (2009)]



RAJAH 8. Keadaan bangunan Masjid Al Furqon, Jalan Jati VI, Bandar Padang setelah gempa, (a) kerosakan bangunan berhampiran dengan masjid membentuk satu garisan lurus yang kemungkinannya mempunyai kaitan dengan jurus sesar pada kawasan tersebut, (b) kerosakan teruk yang menunjukkan kegagalan tiang di lantai 2 bangunan masjid akibat beban gempa, (c) tiang A pada bangunan masjid turun sekitar 5 – 10 cm, dan satu bahagian sisi masjid yang berlaku pemendapan

Melalui penentuan lokasi kerosakan dengan menggunakan GPS didapati bahawa pola kerosakan bangunan di kawasan tersebut mempunyai susun atur berterusan membentuk satu garisan lurus seakan berada di sepanjang zon sesar. Plot sistem sesar ini merupakan dapatan baru berdasarkan kerosakan bangunan akibat gempa yang belum dipetakan. Daripada sistem sesar besar yang sedia ada (Rajah 3) yang telah dipetakan oleh Sieh dan Natawidjaja (2000), didapati bahawa kawasan

Sumatera Barat dilalui oleh Sesar Semangko yang menjadi sebahagian daripada sistem sesar Sumatra (Sumatra Fault System, SFS) yang merupakan salah satu sistem sesar yang terpanjang di dunia. Walau bagaimanapun, sesar utama ini tidak melalui bandar Padang dan ia lebih berdekatan dengan bandar Bukit Tinggi dan Pandang Panjang. Daripada plot jalur sesar dalam peta geologi yang diberikan oleh Kastowo et al. (1996), pemetaan sesar hanya dijalankan pada sesar-sesar yang kelihatan pada batuan tuf dan andesit

sahaja (Rajah 6). Kajian mengenai sistem sesar kecil di kawasan Padang yang meliputi enapan aluvium dan kipas aluvium masih belum dikaji secara mendalam. Ini kerana sesar tersebut kemungkinannya terletak pada lapisan yang dalam dan ditutup oleh enapan aluvium. Oleh itu, hipotesis wujudnya sistem sesar kecil di bandar Padang ini perlu ditentusahkan melalui penyiataan terperinci seperti kaedah lubang gerudi dan survei geofizik (misalnya pengujian geo-elektrik dan gelombang permukaan).

Faktor lain yang mempengaruhi kerosakan akibat gempa di Padang adalah amplifikasi tanah di kawasan endapan aluvium. Sebahagian besar, kerosakan bangunan mungkin disebabkan oleh berlakunya amplifikasi yang tinggi pada endapan aluvium di sini. Endapan aluvium yang terdiri daripada bahan kelodak, pasir dan kerikil, lazimnya bersifat longgar dan boleh menyebabkan gegaran gelombang dari pusat gempa mengalami penguatan dan seterusnya menjadi rambatan permukaan yang bersifat mengayun dalam arah menegak dan mendatar. Keadaan ini memberikan kesan kerosakan yang lebih besar kepada bangunan jika struktur dan kualiti binaan tidak direkabentuk untuk menanggung beban dinamik yang secukupnya. Sebahagian besar bangunan yang runtuh atau condong juga didapati cenderung mengarah ke Barat Laut-Tenggara, iaitu kerosakan bangunan mengarah ke pusat gempa di Barat Laut bandar Padang.

Bangunan-bangunan yang rosak teruk dan roboh di sekitar bandar Padang dan Pariaman adalah bangunan kediaman yang dibina tanpa struktur tiang yang kukuh, bangunan kedai berstruktur tetapi menggunakan tiang kecil (berukuran < 20 cm) dan bangunan lebih setingkat berstruktur konkrit dengan tembok batu dengan kualiti reka bentuk yang tidak sesuai untuk bangunan dengan ruang dewan yang luas (misalnya bangunan untuk pameran kereta). Walau bagaimanapun, tidak semua bangunan mengalami kesan beban gempa yang sama. Ini kerana keadaan geologi dan litologi setempat, seperti ketebalan lapisan alluvium, yang berbeza di satu lokasi terhadap lokasi lainnya. Beberapa bangunan yang didirikan di atas mendapan aluvium pasir dengan paras air tanah yang cetek terdedah kepada pencecairan dan pemendapan bangunan

pada sebahagian ataupun keseluruhan bangunan, seperti yang berlaku pada bangunan Aisyah Sumatera Barat (Rajah 9). Kerosakan pada bangunan ini menunjukkan pemendapan berlaku pada bahagian sisi depan bangunan sahaja. Dari temu bual dengan pemilik bangunan tersebut, didapati bahawa tiada maklumat dan data penyiataan tapak yang memadai dibuat semasa kerja-kerja pembinaan dilakukan pada sekitar tahun 1980. Bangunan Aisyah ini juga dibina menggunakan asas yang cetek dengan kedalaman lebih kurang 6 m. Pada kedalaman ini, struktur asas bangunan hanya disokong oleh lapisan aluvium dan tidak mencapai lapisan keras atau batuan dasar yang kukuh bagi menahan beban gempa.

TANAH RUNTUH DI KAWASAN PERBUKITAN PADANG PARIAMAN, BUKIT TINGGI DAN DANAU MANINJAU

Perbukitan di daerah Pariaman merupakan rangkaian Bukit Barisan yang diliputi oleh batuan vulkanik (terutama tuf, pumis dan andesit) dan batuan metamorf (terutama syis). Topografi asal kawasan perbukitan tersebut terbentuk oleh Sistem Sesar Sumatera (Sumatera Fault System, SFS). Di sepanjang zon sesar tersebut batuan dasar perbukitan ini dipenuhi dengan ketakselajaran dan bersifat rapuh. Akibatnya, apabila dipengaruhi oleh gempa bumi maka banyak terjadi runtuh dan gelinciran batuan pada lereng-lereng Bukit Barisan. Bahan pembentuk cerun di daerah perbukitan Pariaman terdiri daripada bahan vulkanik (khususnya lapisan atas) yang bersifat tak terkonsolidat (Rajah 10). Oleh itu, kejadian-kejadian tanah runtuh yang besar pada lereng-lereng perbukitan di kawasan ini mungkin juga boleh dikaitkan dengan pencecairan bahan-bahan vulkanik yang tak terkonsolidat.

Di beberapa lokasi bencana tanah runtuh yang telah menimbus lebih daripada 100 orang di Kabupaten Padang Pariaman seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 11, kemungkinannya disebabkan oleh keadaan lokasi atau topografi kawasan; geomorfologi dan kecuraman cerun (30° dan 40°). Lapisan tanah di kawasan tersebut pula terbentuk daripada pumis yang menindih batuan andesit. Batuan pumis tersebut terluluhawa hingga membentuk tanah penutup berupa lempung berlodak. Dalam keadaan



RAJAH 9. Pengerapan sebahagian pada bangunan Urusan Aisyah Wilayah Sumatera Barat



RAJAH 10. Bahan tanah dan batuan yang membentuk kawasan bukit di Padang Pariaman



RAJAH 11. Keadaan tanah runtuh di Padang Pariaman



RAJAH 12. Jatuhan batuan andesit di tepi jalan bandar Padang ke Bukit Tinggi

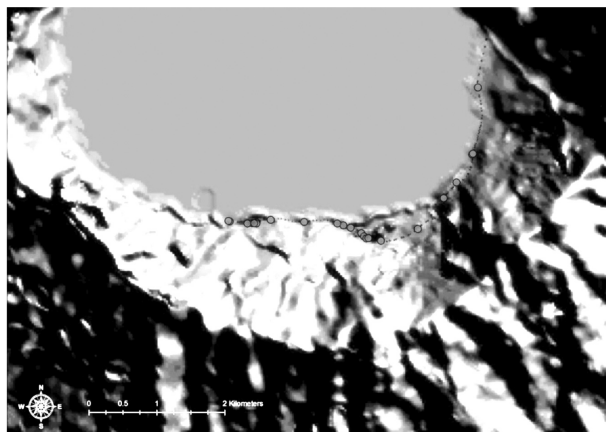
seperti ini, tanahnya menjadi bersifat longgar, dan berpotensi untuk runtuh jika dikenakan beban gempa atau hujan lebat. Kajian lanjutan diperlukan untuk menilai semula risiko beberapa kawasan perbukitan yang masih didiami penduduk. Pemindahan penduduk dari kawasan yang berisiko tinggi terhadap tanah runtuh ke kawasan baru yang lebih stabil adalah satu alternatif yang boleh dilakukan sebagai langkah pengurangan risiko menghadapi geobencana di masa hadapan.

Kawasan lain yang berisiko tinggi terhadap geobencana tanah runtuh yang perlu dikaji lebih lanjut adalah kawasan cerun di sepanjang jalan dari bandar Padang menuju ke Bukit Tinggi. Geologi cerun di kawasan ini terdiri daripada batuan andesit yang ditindih oleh batuan volcanik tuf yang telah terluluhawa menjadi tanah lempung berpasir yang bersifat sangat porous dan telap air. Keadaan cerun yang curam menyebabkan potensi tanah atau batuan runtuh masih tinggi dan sangat berisiko apabila terdedah kepada hujan lebat ataupun gegaran. Blok-blok batuan andesit yang telah jatuh mencapai diameter lebih daripada 3 meter dijumpai berselerakan di tepi-tepi jalan raya (Rajah 12).

Kejadian tanah runtuh dan aliran puing di kawasan perkampungan di bahagian selatan Danau Maninjau, Kabupaten Agam, disebabkan oleh kehadiran longgokan bongkah batuan dan tanah yang bersifat longgar di sepanjang kaki bukit dan cerun (Rajah 13 hingga 16). Gempa bumi telah menyebabkan kegagalan cerun dan

tanah runtuh di bahagian atas cerun bukit, seterusnya ditambah dengan aliran air akibat hujan lebat (3 jam setelah gempa bumi), menyebabkan aliran puing (bahan batuan, tanah dan air) yang besar melanda infrastruktur dan rumah di beberapa kampung, di antaranya Jorong Pandan, Muaro Alai, Durian Gadang, Batu Besar, Sungai Lintabung, Galapung, Batunanggai 1, Batunanggai 2, Durianrampak, Sungai Sibaruah, Muko Jalan, Sungai Gadang, Muara Sungai Gadang, Sarojotuo, Sungai Rangas, Dalu Dalu, Batu Tigo dan Sigiran. Sekitar 500 keluarga perlu meninggalkan rumah kediaman mereka di kawasan perkampungan tersebut.

Kejadian tanah runtuh di kawasan Maninjau ini tidak berkaitan langsung dengan sistem sesar besar kerana lokasi Danau Maninjau terletak jauh dari sesar Sumatera. Kampung-kampung tersebut terletak pada di kaki lereng-lereng bukit yang curam. Aliran puing yang pantas menimbus sangat cepat kawasan perkampungan penduduk dalam masa yang singkat. Berdasarkan keadaan topografi dan risiko terhadap bahaya aliran puing yang ditimbulk, maka kawasan ini sewajarnya dikosongkan. Kawasan ini perlu dikaji lebih lanjut bagi mencari kaedah mitigasi yang sesuai misalnya dengan membuat sistem aliran puing agar boleh dilencongkan ke dalam tasik (Danau Maninjau) tanpa merosakkan bangunan dan infrastruktur penduduk setempat.



RAJAH 13. Kedudukan GPS lokasi aliran puing dan gelongsoran di Danau Maninjau. Lokasi kawasan kajian lapangan terbatas (tidak menyeluruh) kerana jalan terputus atau tidak boleh dilalui oleh kenderaan



RAJAH 14. Salah satu lokasi aliran puing di Danau Maninjau



RAJAH 15. Pelbagai saiz dan bentuk bongkah-bongkah batuan yang mencirikan bahan aliran puing di Danau Maninjau



RAJAH 16. Mendapan aliran puing memenuhi bangunan tempat tinggal, masjid dan sekolah di Danau Maninjau



KESIMPULAN DAN PEMERHATAN

Gempa bumi di Padang pada 30 September 2009 telah mengorbankan lebih daripada 1000 nyawa dan menyebabkan kerosakan bangunan serta infrastruktur yang meluas. Hasil kajian daripada aspek geologi, geoteknik, penilaian kerosakan dalam kajian lapangan ini menunjukkan bahawa kesan gempa terhadap kerosakan bangunan disebabkan oleh kualiti struktur bangunan

yang rendah dan keadaan geologi yang kompleks. Faktor geologi ini lebih utamanya adalah kerana wujudnya amplifikasi gempa bumi pada enapan aluvium yang terdapat di sekitar bandar Padang dan Padang Pariaman serta kedudukan bangunan terletak pada jalur-jalur sesar dan ketakselajaran.

Sebahagian besar kegagalan bangunan 2 tingkat ke atas disebabkan oleh ketiadaan pertimbangan reka bentuk

struktur yang secukupnya, khususnya untuk kerangka struktur. Daripada temu bual yang dijalankan di lapangan dengan pemilik bangunan, sebahagian besar bangunan telah dibina tanpa maklumat data geoteknik dan kajian penyiataan tapak yang memadai.

Untuk bangunan yang tidak rosak teruk ataupun rosak sederhana-ringan, pembaikan pada struktur boleh dijalankan. Walau bagaimanapun, perlu dipertimbangkan untuk mereka bentuk semula struktur bangunan dengan mengambil kira beban dinamik yang tepat. Untuk bangunan-bangunan yang akan didirikan untuk perumahan di atas tanah endapan aluvium yang tebal di masa hadapan, adalah dicadangkan supaya bangunan ini didirikan tidak melebihi 2 tingkat. Walau bagaimanapun, bangunan yang melebihi 2 tingkat ini boleh dibina tetapi dengan kualiti struktur asas dan struktur konkrit yang memenuhi piawaian untuk reka bentuk yang boleh menahan gempa dengan mempertimbangkan kesan amplifikasi tanah.

Pembinaan bangunan 2 tingkat ke atas memerlukan reka bentuk struktur dinamik dan kod bangunan yang tepat. Bagi kawasan alluvium, jalur sesar kecil dan lapisan tak selanjur, data lubang gerudi dan keupayaan galas tanah (uji kaji tusukan piawaian, SPT) diperlukan bagi menyediakan maklumat keperluan struktur asas yang tepat dalam reka bentuk struktur bangunan dan kerja-kerja pembinaan yang akan dijalankan.

Kejadian tanah runtuh di kawasan Pariaman lebih disebabkan oleh (1) keadaan asal (topografi) kawasan (2) geomorfologi; (3) kecuraman cerun antara 30° - 40° yang diliputi oleh tuf batu apung berongga atau pumis yang menumpang di atas batuan andesit. Batuan tuf tersebut kelihatan telah terluluhhawa sehingga membentuk tanah penutup berupa lempung lanauan. Dalam keadaan ini, lapisan tanah menjadi tidak stabil dan berpotensi untuk runtuh jika dikenakan beban gempa atau hujan lebat. Kejadian tanah runtuh sekitar bukit di kawasan Danau Maninjau disebabkan oleh keadaan topografi kawasan yang terletak pada cerun yang curam yang runtuh akibat gempa. Seterusnya hujan lebat menyebabkan berlakunya aliran puing yang menghancurkan penempatan penduduk di beberapa kampung berdekatan.

Kajian kawasan yang lebih terperinci perlu dijalankan dengan melibatkan kajian geoteknik, kajian sistem sesar kawasan dan litologi kawasan untuk mendapatkan peta terperinci topografi kawasan. Penyiataan tapak yang diperlukan untuk mendapatkan keadaan sub-permukaan adalah lubang gerudi dan teknik geofizik bagi mendapatkan keterangan lengkap mengenai kandungan bahan. Selain itu uji kaji amplifikasi tanah bagi menghasilkan peta zon mikro yang lebih terperinci diperlukan bagi kawasan-kawasan di bandar Padang dan Pariaman.

Setiap bangunan baru perlu dilengkapi dengan sistem mitigasi/penyelamatan, misalnya tangga dan pintu darurat yang sesuai dan meminimumkan penggunaan reka bentuk seni bina dan hiasan rumah yang tidak tepat sebagai langkah keselamatan yang sistematik.

RUJUKAN

- Dziewonski, A.M., Chou, T.A. & Woodhouse, J.H. 1980, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity: *Journal of Geophysical Research* 86: 2825-2852.
- Irsyam, M., Asrurifak, M., Hendriyawan, Budiono, B., Triyoso, W. & Hutapea, B. 2008. Usulan Revisi Peta Seismic Hazard Indonesia Dengan Menggunakan Metode Probabilitas Dan Model Sumber Gempa Tiga Dimensi, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XII Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia*, Bandung, p.1-12.
- Kastowo, Leo, G.W., Gafoer, S. & Amin, T.C. 1996. Peta Geologi Lembar Padang, Sumatera. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Indonesia.
- Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Chlieh, M., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., Cheng, H., Edwards, R.L., Avouac, J.-P. & Ward, S.N., 2006, Source parameters of the Great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls: *Journal of Geophysical Research* 111: B06403, 37 pp.
- Newcomb, K.R. & McCann, W.R., 1987, Seismic history and seismotectonics of the Sunda arc: *Journal of Geophysical Research* 92: 421-439.
- Petersen, M., Harmsen, S., Mueller, C., Haller, K., Dewey, J., Luco, N., Crone, A., Lidke, D. & Rukstales, K. 2007. Documentation for the Southeast Asia Seismic Hazard Maps. United States Geological Survey Report (USGS), 67pp.
- Prawiradisastra, S., Tejakusuma, I, Wisyanto & Wibowo, A. 2009. Bencana Gempabumi dan Bencana Kolateral Longsor dan Kebakaran di Sumatera Barat. Laporan Kajian Cepat, Tim Mitigasi Bencana BPPT, Pusat Teknologi Sumberdaya Lahan Wilayah dan Mitigasi Bencana, Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi, Indonesia. <http://sirrma.bppt.go.id/ramu/saat-dan-setelah-bencana/rapid-assessment> (diakses 12 Disember 2009).
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. 2009. Survei Tanggap Darurat Pasca Gempa Sumatera Barat. Laporan Pendahuluan Advis Teknis Tahun 2009. Badan Penelitian dan Pengembangan, Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia.
- Sieh, K. 2009. Padang Earthquake Struck at Edge of Zone Where Much Bigger Quake is Expected. <http://www.earthobservatory.sg/news/2009/> (diakses 10 Januari 2010).
- Sieh, K. & Natawidjaja, D., 2000, Neotectonics of the Sumatran fault, *Indonesia: Journal of Geophysical Research* 105: 28295-28326.
- USGS 2009a. Historic World Earthquakes, United States Geological Survey. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php#indonesia (diakses 27 Disember 2009).
- USGS 2009b. Seismic Hazard Map. Magnitude 7.5 - Southern Sumatra, Indonesia. http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2009/eq_090930_mebz/neic_mebz_w.html (diakses 11 Januari 2010).
- Westervald, J., 1953. Eruptions of acid pumice tuffs and related phenomena along the great Sumatran fault-trough system. *Proc. 7th Pacific Sci. Cong. New Zealand* 2: 411-438.
- Zachariassen, J., Sieh, K., Taylor, F.W., Edwards, R.L. & Hantoro, W.S. 1999, Submergence and uplift associated with the giant 1833 Sumatran subduction earthquake—Evidence from coral microatolls: *Journal of Geophysical Research*, 104: 895-919.

Sri Atmaja P. Rosyidi
Jurusan Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan
55183 Yogyakarta, Indonesia

Tajul Anuar Jamaluddin
Pusat Pengajian Sains Sekitaran dan Sumber Alam
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor D.E.
Malaysia

Lim Choun Sian
Institut Kajian Bencana Asia Tenggara (SEADPRI-UKM)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor D.E.
Malaysia

Mohd Raihan Taha
Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur
Fakulti Kejuruteraan
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor D.E.
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: atmaja-sri@umy.ac.id

Diserahkan: 2 Disember 2010
Diterima: 16 Mei 2011