

# DI BALIK PESONA PALU

TIM BADAN GEOLOGI

DI BALIK PESONA PALU

Bencana Melanda  
Geologi Menata

**BADAN GEOLOGI**

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

ISBN 978-602-9305-76-5



9 786029 105766

**BADAN GEOLOGI**

**DI BALIK PESONA PALU  
BENCANA MELANDA  
GEOLOGI MENATA**

**Undang-Undang RI Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta  
Ketentuan Pidana Pasal 72:**

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# **DI BALIK PESONA PALU**

**BENCANA MELANDA  
GEOLOGI MENATA**

**BADAN GEOLOGI  
2018**



# **DI BALIK PESONA PALU BENCANA MELANDA GEOLOGI MENATA**

Penulis

ADRIKNI WIRIA KUSUMAH M, AKHMAD SOLIKHIN  
ANDIANI, ANJAR H, AMALFI OMANG, ASDANI SOEHAMI  
ATHANASIVS CIPTA, DEFRIZAL, DITA ARIF YUWANA  
EEP R. FIRDAUS, FADLI, G.M. LUCKY DJUNURSYAH  
GINDA HASIBUAN, HAUNAN AFIF, IMAM SANTOSA  
IQBAL E. P, ISNU HAJAR SULISTYAWAN, KURNIAH, N. FALAH  
OKI OKTARIADI, PANDU ADIMINARNO, RISNA WIDYANINGRUM  
RUSTAM EFENDI, RYAN NUR RAHDIANA, SELASIAN GUSSYAK  
SRI HIDAYATI, SUMARYONO, SUPARTOYO, TAAT SETIAWAN  
TAUFIQ WIRA BUANA, W. SYATRIN, WARDOYO, WAWAN HERMAWAN  
WIYONO, YAYAN SOPYAN, YOHANDI K, YUNARA D.T

Editor

ANDIANI  
OKI OKTARIADI  
ATEP KURNIA

Penata letak dan Desainer Cover

EEP R. FIRDAUS  
AYI R. SACADIPURA

Diterbitkan oleh

**BADAN GEOLOGI**

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Alamat: Jl. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

Website: [www.bgl.esdm.go.id](http://www.bgl.esdm.go.id)

e-mail: [geologi@bgl.esdm.go.id](mailto:geologi@bgl.esdm.go.id)

ISBN: 978-602-9105-76-6

Cetakan Pertama: 2018

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku  
tanpa izin penulis dan penerbit.

**BUKU INI DIGUNAKAN SEBAGAI INFORMASI AWAL BAGI MASYARAKAT DAN PARA PENGAMBIL  
KEBIJAKAN DALAM MEMAHAMI KONDISI GEOLOGI PALU SECARA UMUM.**

**BUKU INI MASIH MEMILIKI BANYAK KETERBATASAN KARENA KETERSEDIAAN DATA YANG SANGAT  
TERBATAS DAN WAKTU YANG SINGKAT. KONTRIBUSI PARA PENELITI DIHARAPKAN DAPAT  
MELENGKAPI KEKURANGAN BUKU INI.**

**HARAPAN KAMI , BUKU INI DAPAT MEMBERIKAN SUMBANGSIH DALAM PENATAAN RUANG KOTA  
PALU DAN SEKITARNYA DI MASA MENDATANG.**

**PASIGALA TANGGUH**

**PASIGALA BANGKIT!!!**



# Pengantar Kepala Badan Geologi



SEGALA PUJI DAN SYUKUR kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat-Nya Di Balik Pesona Palu ini akhirnya dapat diterbitkan. Buku ini berusaha memberikan informasi kepada masyarakat umum tentang kebumihan daerah Palu dan sekitarnya, termasuk di dalamnya membahas mengenai potensi kebencanaan geologi.

Badan Geologi sebagai salah satu institusi di bawah Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral memiliki tugas dan fungsi di bidang penelitian dan pelayanan geologi, tentu memiliki kewenangan untuk mengawal penyebarluasan informasi kegeologian ke tengah khalayak banyak. Informasi tersebut meliputi bidang sumber daya geologi, vulkanologi dan mitigasi bencana geologi, air tanah, dan geologi lingkungan, serta survei geologi.

Sebagai upaya penyebarluasan informasi kegeologian, buku ini menjadi salah satu bukti konsistensi Badan Geologi untuk senantiasa mengedepankan upaya perlindungan sekaligus turut mewujudkan masyarakat Indonesia yang sejahtera. Dalam konteks Palu dan sekitarnya, sudah sejak tahun 1973, Badan Geologi melakukan kegiatan pemetaan geologi lembar Palu Skala 1 : 250.000 kemudian disusul kegiatan kegiatan lain yang berkaitan dengan kondisi daerah Palu, baik berupa kegiatan survei geologi teknik, air tanah, geofisika maupun geodinamika yang terjadi di daerah tersebut.

Hingga kini, kegiatan penelitian dan penyelidikan kondisi geologi Palu terus dilakukan untuk menambah informasi dan pengetahuan terhadap kajian geologinya secara lebih rinci, karena ke depannya semua informasi itu sangat dibutuhkan oleh semua pihak, baik pemerintah, masyarakat, akademisi, swasta, maupun pihak luar yang membutuhkan informasi hasil kegiatan ini.

Oleh karena itu, buku Di Balik Pesona Palu sangat layak dibaca oleh semua kalangan khususnya bagi pihak-pihak yang ke depannya akan mengembangkan daerah Palu untuk penataan ruang. Karena di dalamnya berisi berbagai macam informasi geologi Palu mengenai gambaran wilayah serta geodinamikanya.

Akhir kata, kami mengucapkan terimakasih kepada berbagai pihak yang telah membantu tersusunnya hingga terbitnya buku ini. Segala kritik dan saran untuk perbaikan buku ini akan kami terima dengan senang hati. Semoga buku ini dapat bermanfaat untuk masyarakat luas.

Bandung, Desember 2018

Kepala Badan Geologi

**Rudy Suhendar**



# Sambutan Menteri ESDM



PUJI SYUKUR KAMI panjatkan ke hadirat Tuhan yang Maha Esa atas terbitnya buku *Di Balik Pesona Palu*. Saya menyambut baik penerbitan buku yang berisi mengenai tentang geologi beserta kondisi geodinamika daerah Palu dan sekitarnya yang sangat kompleks.

Bila dilihat dari tugas dan fungsi institusi, kegiatan penyampaian informasi tentang kondisi geologi berbagai daerah di Indonesia menjadi salah satu kegiatan strategis di lingkungan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Dalam *Renstra KESDM 2015-2019*, termaktub adanya Tujuan Strategis ke-5, yaitu “Terwujudnya Manajemen dan SDM yang Profesional serta Peningkatan Kapasitas Iptek dan Pelayanan Kegeologian” dan Sasaran Straregis ke-12, yaitu “Meningkatkan kualitas informasi dan Pelayanan Bidang Geologi”. Di sinilah strategisnya buku *Di Balik Pesona Palu*.

Dalam buku ini, penulis yang terdiri dari para ahli kebumian berusaha untuk bercerita banyak tentang kondisi geologi Palu dan sekitarnya dari berbagai sudut pandang, baik geologi teknik, air tanah, geofisika maupun geodinamika. Tentu saja, informasi tersebut sangat penting untuk disampaikan kepada masyarakat dalam kerangka pembelajaran pentingnya kesiapsiagaan hidup di daerah bencana, pengawasan daerah bencana dan cara memanfaatkan kawasan rawan bencana untuk menunjang pembangunan dan kebijakan setiap sektor di Indonesia.

Atas terbitnya buku ini, kami sampaikan penghargaan kepada penulis dan jajaran penyusun buku ini serta semua pihak yang telah mendukung dan berkontribusi dalam penulisan buku, serta membantu dalam proses penerbitannya. Semoga buku ini berkontribusi pada upaya perlindungan masyarakat dari berbagai potensi bencana kebumihan.

Jakarta, Desember 2018  
Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral

**Ignasius Jonan**

# Daftar Isi

PENGANTAR KEPALA BADAN GEOLOGI – vii  
SAMBUTAN MENTERI ESDM – xi  
DAFTAR ISI – xiv

PROLOG – 1

GEOLOGI, GEMPA BUMI,  
DAN HIDROGEOLOGI – 7  
Geologi dan Geofisika untuk Pengembangan Wilayah – 9  
Seismotektonik Palu dan Sekitarnya – 21  
Genetika Gempabumi – 33  
Tingkat Guncangan dan Skala Intensitas Gempabumi – 41  
Menghitung Guncangan Gempabumi – 57  
Mengukur Mikrotremor Balaroa dan Sekitarnya – 71  
Cekungan Air Tanah Palu – 87

BAHAYA IKUTAN GEMPA BUMI – 99  
Sebaran Kerusakan Geologi Permukaan – 101

Munculnya Pergeseran Tanah Konsisten – 113  
Anomali Perilaku Gelombang Tsunami – 133  
Ancaman Gerakan Tanah dan Banjir Bandang – 143  
Menyelidiki Potensi Likuifaksi – 161  
Mekanisme Bencana di Balaroa dan Petobo – 175

PENATAAN RUANG BERBASIS

BENCANA GEOLOGI– 187

Mikrozonasi untuk Kota Palu – 189

Pemanfaatan Ruang Berbasis Geologi – 201

EPILOG – 215

DAFTAR PUSTAKA – 226

SENARAI KATA – 237

LAMPIRAN FOTO – 250





# PROLOG

Oleh

**ANDIANI**

## **Bencana di balik Pesona Lembah Palu**

*Meski gempabumi besar disertai likuifaksi dan tsunami meluluhlantakkan Palu dan sekitarnya yang indah itu, kehidupan harus tetap berjalan. Karena wilayah ini akan senantiasa menjadi sumber kehidupan masyarakat.*

Perairan pesisir Palu yang indah dan unik ini merupakan sebuah ekosistem teluk dengan lengkungan yang menjorok ke dalam bagaikan “oval”. Keberadaan teluk ini sangat penting, baik bagi masyarakat yang berada di pesisir hingga yang tinggal di daerah perkotaan. Mereka menggantungkan hidupnya dari menangkap ikan, berjualan makanan dan minuman (cafe), hingga mengusahakan jasa wisata seperti snorkeling, diving, jetski, jogging, bersepeda, hingga menikmati matahari terbit dan terbenam, serta suasana malam. Dengan demikian, Teluk Palu memiliki nilai ekonomi dan ekologi yang sangat besar.

Daratannya yang berbentuk mangkuk menjadi tempat tumbuhnya ibukota Sulawesi Tengah, yaitu Kota Palu yang memiliki luas mencapai 395,06 kilometer persegi yang terbagi menjadi delapan kecamatan. Selain itu, lembah ini cukup potensial untuk usaha pertanian, misalnya tanaman padi dan palawija. Sebagian penduduk juga menanam buah-buahan dan sayuran serta berternak dengan dukungan padang penggembalaan yang cukup luas. Padahal Lembah Palu termasuk wilayah bayangan hujan, sehingga jarang terjadi hujan. Namun, persediaan air tanah cukup karena pasokan dari sungai-sungai dari pegunungan senantiasa mengalir.

Pegunungan di sekitar Lembah Palu memiliki ketinggian

lebih dari 500 mdpl. Di sana ada Mantantimali yaitu pegunungan berketinggian sekitar 1.500 mdpl yang terletak di Kecamatan Morowala, Kabupaten Sigi. Pegunungan ini menyuguhkan pemandangan indah, karena bila pandangan diarahkan ke utara terlihat pemukiman kota yang padat, bentangan Teluk Palu yang cantik dan sebagian wilayah pantai barat Kabupaten Donggala. Di bagian timur, terlihat Kabupaten Sigi secara utuh, sungai raksasa yang panjang nan berkelok-kelok. Di salah satu bukit Matantimali pengunjung dapat melakukan geotrek untuk memahami fenomena alam yang menakjubkan dan diakhiri dengan berolahraga paralayang, karena letak, ketinggian, temperatur dan keadaan angin, sangat mendukung, sehingga lokasi paralayang di bukit ini menjadi salah satu yang terbaik di Asia Tenggara bahkan dunia.

Namun, di balik pesona itu, jauh sebelum menyandang julukan “Kota Lima Dimensi” ada kisah mencekam yang ikut membentuk sejarah Kota Palu. Gempabumi dan tsunami sering terjadi di sini. Pada 1907, terjadi gempabumi, yang bersumber dari retakan sesar yang berarah tegak lurus Sesar Palu-Koro sekitar wilayah Kulawi hingga Lindu. Dua tahun berikutnya, terjadi gempabumi dengan kekuatan lebih besar yang menghancurkan seluruh wilayah itu. Besarnya gempa digambarkan dengan jatuhnya buah kelapa yang masih muda dari pohonnya.

Dahyatnya gempa 1927 yang disertai tsunami hingga membuat puluhan warga kehilangan nyawa. Pada 1938 terjadi gempabumi yang hebat menyebabkan air laut naik menyapu rumah-rumah dan pohon kelapa rakyat di sepanjang pantai Kampung Mamboro, di tepi pantai barat Kabupaten Donggala.

Pada 10 Agustus 1968 terjadi gempa bermagnitudo 7,3 dengan pusat gempa di Laut Sulawesi. Saat itu gelombang

tsunami besar menyapu kawasan pantai Donggala. Dua ratus orang tewas dan banyak rumah hancur terutama di desa pesisir Tambu. Tsunami juga menghantam Teluk Mapaga, dan Pulau Tuguan setinggi 8-10 meter serta melabrak pantai sejauh 300 meter. Pada 14 Agustus 1968 terjadi gempa bumi kedua berkekuatan 7,4 Mw dengan pusat gempa di Laut Sulawesi yang menghasilkan tsunami besar dan mengakibatkan Pulau Tuguan tenggelam sepenuhnya. Kemudian pada 2012 terjadi gempa di wilayah yang hampir sama dengan karakteristik gempa bumi 1907.

Dari sisi kegeologian, Kota Palu, Donggala, dan Sigi merupakan wilayah yang dilalui oleh Lajur Sesar Palu-Koro. Lajur ini berarah hampir utara-selatan, memanjang mulai dari sekitar batas perairan Laut Sulawesi dengan Selat Makassar sampai pantai utara Teluk Bone. Panjangnya sekitar 500 kilometer. Di darat, sesar ini mempunyai panjang sekitar 250 kilometer, mulai dari Teluk Palu sampai pantai utara Teluk Bone, mungkin di sekitar Masamba Kabupaten Luwu Provinsi Sulawesi Selatan.

Wilayah Sulawesi Tengah tersebut dikenal tempat bertemunya tiga lempeng tektonik utama dunia yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia. Akibatnya, wilayah ini rawan akan bencana alam terutama yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng-lempeng tersebut, yang mendorong pergerakan Sesar Geser Palu Koro. Hal ini pula yang menyebabkan gempa bumi berkekuatan 7,4 Mw yang meluluhlantakan wilayah pesisir Teluk Palu pada 28 September 2018. Guncangan gempa bumi itu dirasakan meliputi wilayah Kabupaten Donggala, Kota Palu, Kabupaten Parigi Moutong, Kabupaten Sigi, Kabupaten Poso, Kabupaten Tolitoli, Kabupaten Mamuju bahkan hingga Kota Samarinda, Kota Balikpapan, dan Kota Makassar.

Gempa dahsyat itu juga memicu likuifaksi dan tsunami. Dua tempat yang paling nyata mengalami bencana ini adalah Petobo dan Balaroa di Kota Palu. Balaroa terletak di tengah-tengah Sesar Palu-Koro. Saat terjadinya likuifaksi, terjadi kenaikan dan penurunan muka tanah. Beberapa bagian amblas 5 meter, dan beberapa bagian naik sampai 2 meter. Di Petobo, ratusan rumah tertimbun lumpur setinggi 3-5 meter. Setelah gempa, tanah di daerah itu dengan lekas berubah jadi lumpur yang dengan segera menyeret bangunan-bangunan di atasnya. Di Balaroa, rumah amblas, bagai terisap ke dalam tanah.

Sementara tsunami menerjang pantai, menghantam permukiman hingga gedung-gedung dan fasilitas umum. Data menyebutkan bahwa titik tertinggi tsunami tercatat 11,3 meter, terjadi di Desa Tondo, Palu Timur, Kota Palu. Sedangkan titik terendah tsunami tercatat 2,2 meter, terjadi di Desa Mapaga, Kabupaten Donggala.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat korban tewas akibat bencana gempa dan tsunami di Sulawesi Tengah tercatat 2.113 orang meninggal dunia. Sebaran korban tewas itu di Kota Palu 1.703 orang, Donggala 171 orang, Sigi 223 orang, Parigi Moutong 15 orang, dan Pasangkayu 1 orang. Jumlah tersebut termasuk 1 orang warga Korea Selatan yang meninggal dunia tertimbun reruntuhan Hotel Roa-Roa Kota Palu.

Dengan demikian, Kota Palu dan sekitarnya harus memulai membangun kembali agar kehidupan berjalan seperti semula. Pengalaman bencana alam berulang-ulang yang memakan korban iitu harus diredam oleh segenap kekuatan daya pikir manusia dengan memanfaatkan keadaan alam itu sendiri khususnya kondisi geologi. Karena kondisi geologi itu, selain

menunjukkan bahaya geologi yang dapat berujung bencana, juga menunjukkan daya dukung geologi yang membuat kehidupan manusia lebih aman dan nyaman.

Dengan kejadian bencana alam di Palu dan sekitarnya, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral harus ikut berperan membantu menyediakan data dan informasi dalam rangka rekonstruksi pasca bencana. Karena Badan Geologi diberi mandat untuk menyelenggarakan penelitian, penyelidikan, dan pelayanan di bidang sumber daya geologi, vulkanologi dan mitigasi bencana geologi, air tanah, dan geologi lingkungan, serta survei geologi.

Data dan informasi kegeologian dibutuhkan untuk menunjang kegiatan tanggap darurat dan revisi rencana tata ruang pasca bencana sesuai dengan konsep geologi lingkungan. Setelah terjadinya bencana alam Teluk Palu itu, Badan Geologi telah melakukan berbagai kajian kegeologian yang berkaitan dengan penyebab bencana alam, menyiapkan data untuk kebutuhan tanggap darurat (rekontruksi cepat wilayah terdampak), dan data untuk kebutuhan revisi rencana tata ruang wilayah.

Berbagai hasil kajian tersebut menjadi inti dari buku *Di Balik Pesona Palu*. Buku berbentuk bunga rampai ini diupayakan disusun dalam bahasa ilmiah populer agar dapat dipahami dengan mudah oleh masyarakat umum. Harapannya para pembaca dapat mengapresiasi dan ikut berpartisipasi sekaligus berperan dalam upaya mengampanyekan mitigasi bencana. Tentu semboyan “kurangi risiko, siagakan diri, tanggulanghi bencana” akan sangat relevan.

*\*Andiani,*

*Kepala Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan*



# **GEOLOGI GEMPA BUMI DAN HIDROGEOLOGI**





# **Geologi dan Geofisika untuk Pengembangan Wilayah**

**Oleh**

**Isnu Hajar Sulistyawan, G.M. Lucky Djunursyah,  
Asdani Soehami, Yayan Sopyan**

*“Dengan kondisi geologi yang kompleks, pengembangan wilayah Kota Palu diharapkan sangat memperhatikan data geologi dan geofisika baik secara regional maupun skala besar, terutama dalam kaitannya dengan upaya pengurangan resiko bencana melalui penataan ruang”.*

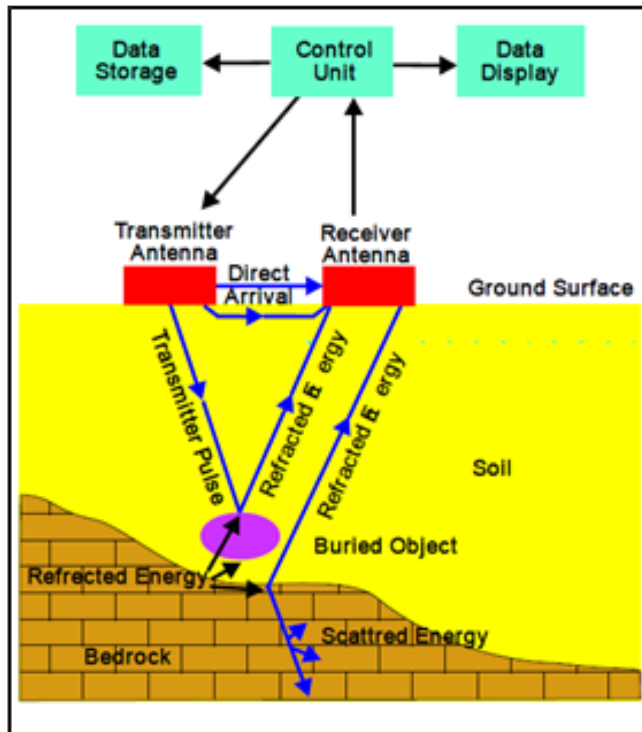
Gempabumi yang diikuti tsunami dan gerakan tanah di Palu-Donggala dan sekitarnya pada 28 September 2018 merupakan kejadian yang dikontrol oleh kondisi geologi wilayah tersebut. Sehubungan dengan itu maka Pusat Survei Geologi (PSG) telah mengirimkan tim tanggap darurat dalam rangka melakukan analisis kejadian bencana dari aspek geologi yang mempengaruhi terjadinya bencana ini. Pengukuran geofisika dengan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) dan mikrotremor dilakukan untuk mengetahui struktur bawah permukaan dan kerentanan tanah dan batuan akibat getaran.

Data-data geologi dan geofisika yang diperoleh dari survei dan pengukuran kemudian dimanfaatkan sebagai salah satu dasar informasi dalam pengambilan kebijakan untuk pengembangan wilayah yang pada tahap awal pasca bencana berupa kegiatan rehabilitasi dan rekonstruksi. Dalam hal ini, untuk pengembangan wilayah Kota Palu perlu dipertimbangkan aspek-aspek geologi baik aspek positif berupa potensi sumber daya geologi maupun aspek lain berupa kerentanan wilayah terhadap bencana geologi.

Beberapa jenis data geologi dan geofisika yang sudah diterbitkan oleh PSG dikaji ulang dan kemudian dilengkapi dengan data-data hasil survei dan pengukuran pasca gempabumi di Palu-Donggala dan sekitarnya. Survei dan pengukuran saat tanggap darurat bencana dilakukan secara terfokus pada lokasi-lokasi bencana, sedangkan pada masa

pasca tanggap darurat dilakukan lebih rinci dengan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR), gradiomagnet dan mikrotremor pada lokasi-lokasi yang dipersiapkan untuk rehabilitasi dan rekonstruksi pasca bencana.

Survei dan pengambilan data dengan metode GPR menggunakan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi (25MHz) dengan kedalaman maksimal antara 20 hingga 30 meter untuk mengetahui kondisi bawah permukaan. Sinyal gelombang elektromagnetik akan dipantulkan (*reflected*) apabila ada kontras dielectric ( $\epsilon$ ) antara dua lapisan batuan (gambar 1).



Gambar 1: Skema mekanisme pengukuran dengan metode GPR

Metode gradiomagnetik digunakan untuk mengukur medan magnet bumi berdasarkan frekuensi Larmor ( $B = 2\pi f / \partial$ ) yang terdiri dari medan magnet utama, medan luar, medan anomali. Sensor Cesium menggunakan electron cahaya yang dipolarisasikan secara horizontal (magnetik) dan vertikal (elektrik) – Pembacaan dapat dilakukan secara cepat dan tanpa arah sensor. Pengukuran metode gradiomagnet menghasilkan nilai medan anomali – secara otomatis menghilangkan pengaruh medan magnet utama dan luar.

Metode mikrotremor digunakan untuk memperoleh nilai periode dominan yang berbanding lurus dengan faktor penguatan guncangan, di mana daerah dengan periode dominan tinggi umumnya memiliki kerentanan untuk mengalami kerusakan yang cukup tinggi ketika terjadi gempa bumi. Metode pengukuran mikrotremor *single station* pada beberapa titik yang tersebar dan telah ditentukan secara berpindah-pindah dan diukur dalam interval waktu per menit dengan durasi pengukuran antara satu hingga satu setengah jam untuk setiap titiknya dengan menggunakan seismometer yang terdiri dari tiga komponen yaitu GPS, sensor getar, dan perekam digital.

Data rekaman gelombang mikrotremor memuat dua parameter utama yakni frekuensi dan amplitudo gelombang serta parameter tambahan berupa koordinat site pengambilan data. Data hasil observasi selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan yang akan diolah untuk mendapatkan nilai periode dominan rambat gelombang pada tanah di area penelitian, VS30, dan nilai PGA.

## **Kondisi Geomorfologi, Geologi dan Tektonik**

Pulau Sulawesi merupakan tempat tumbukan aktif dari

tiga lempeng (Lempeng Hindia-Australia, Lempeng Pasifik dan Lempeng Eurasia) yang secara regional terbagi atas dua mandala yaitu bagian timur dan bagian barat. Mandala Sulawesi bagian timur merupakan *non-volcanic arc* sedangkan Mandala Sulawesi bagian barat merupakan mandala *volcanic arc*.

Wilayah Kota Palu dan sekitarnya merupakan suatu wilayah dataran aluvial yang memanjang berarah relatif utara-selatan dan dibatasi oleh lereng dan punggung di kedua sisi lembah yang di tengah-tengah lembahnya mengalir Sungai Salo Palu. Dataran ini didominasi satuan litologi aluvium berumur Holosen yang terdiri dari lumpur, lempung, pasir, kerikil dan kerakal (Murtolo & Hasan, *Peta Geomorfologi Lembar Palu dan Sekitarnya Sulawesi Tengah*, 1994).

Selain itu, ada Formasi Pakuli yang berumur Plistosen terdiri dari konglomerat dan batupasir setempat betulempung karbonan yang oleh Sukamto (*Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi*, 1973) disebut sebagai Molasa Sulawesi. Batuan yang lebih tua dari Formasi Pakuli berumur Miosen Atas, yaitu Formasi Lariang yang terdiri dari konglomerat, batupasir sisipan batulempung, setempat tuf, batulumpur, batugamping, koral dan napal. Batuan ini oleh Sukamto (1973) juga masih termasuk dalam satuan Molasa Sulawesi.

Di bawah batuan Formasi Lariang ini sudah ditempati oleh Kompleks Granit dan Kompleks Diorit serta batuan metamorfik dari Formasi Latimojong, Kompleks Wana dan Kompleks Gumbasa. Pada Peta Geomorfologi (Murtolo & Hasan, 1994) teridentifikasi keberadaan kipas-kipas aluvial pada sisi kanan dan kiri lembah Palu di mana pola aliran kipas aluvial ini mengarah ke Lembah Palu. Dari kondisi ini dapat diinterpretasikan bahwa proses sedimentasi sangat kuat

mengarah ke arah Lembah Palu dengan kemungkinan gerakan tanah pada wilayah-wilayah kontras topografi tinggi dan batuan yang tidak kompak.

Kondisi tektonik dan geologi di atas mengakibatkan wilayah Kota Palu dan sekitarnya memiliki kerentanan



Gambar 2: Rekaman gempabumi merusak di Sulawesi sejak 1900

yang relatif tinggi terhadap bencana geologi. Berdasarkan *Peta Rawan Gempa Bumi Indonesia* yang diterbitkan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (2004), wilayah ini merupakan wilayah rawan gempabumi dengan skala VI-VII MMI. Demikian pula dari rekaman data kegempaan, tampak bahwa di wilayah ini telah terjadi tidak kurang dari 7 (tujuh) kali gempabumi merusak sejak tahun 1900 (Silver, “*Ophiolite emplacement by collision between the Sula Platform and the Sulawesi Island Arc, Indonesia*”, 1979).

Patahan aktif Palu-Koro memanjang dengan arah utara-selatan membelah wilayah Kota Palu. Patahan ini berada dalam satu sistem dengan lajur subduksi Sulawesi Utara di bagian utara dan patahan Matano pada bagian selatan. Berdasarkan survei lapangan pasca gempabumi pada 28 September 2018, semakin diyakini bahwa patahan Palu-Koro merupakan patahan geser mengiri dan bercabang (*bifurcation*).

Manifestasi patahan aktif Palu Koro antara Kota Palu dan Kulawi dapat dilihat berupa Lembah Palu yang memanjang dengan arah relatif utara-selatan dan gawir-gawir patahan dengan kipas aluvial di sisi barat dan timurnya sebagaimana terlihat dalam *Peta Seismotektonik Daerah Palu* dan sekitarnya. Indikasi neotektonik patahan aktif ini berupa struktur geologi yang memotong endapan berumur Kuartar seperti terlihat dalam Gambar 3. Berdasarkan analisis penarikan umur dengan metode radiokarbon diketahui bahwa pergerakan tektonik Kuartar tersebut pernah terjadi setelah  $26750 \pm 700$  BP dan  $1790 \pm 200$  BP.

Pemodelan berdasarkan data gaya berat menunjukkan adanya offset pada batuan metamorfik, Molassa Sulawesi maupun endapan yang lebih muda (aluvium).

Dari penjelasan kondisi geomorfologi, geologi dan





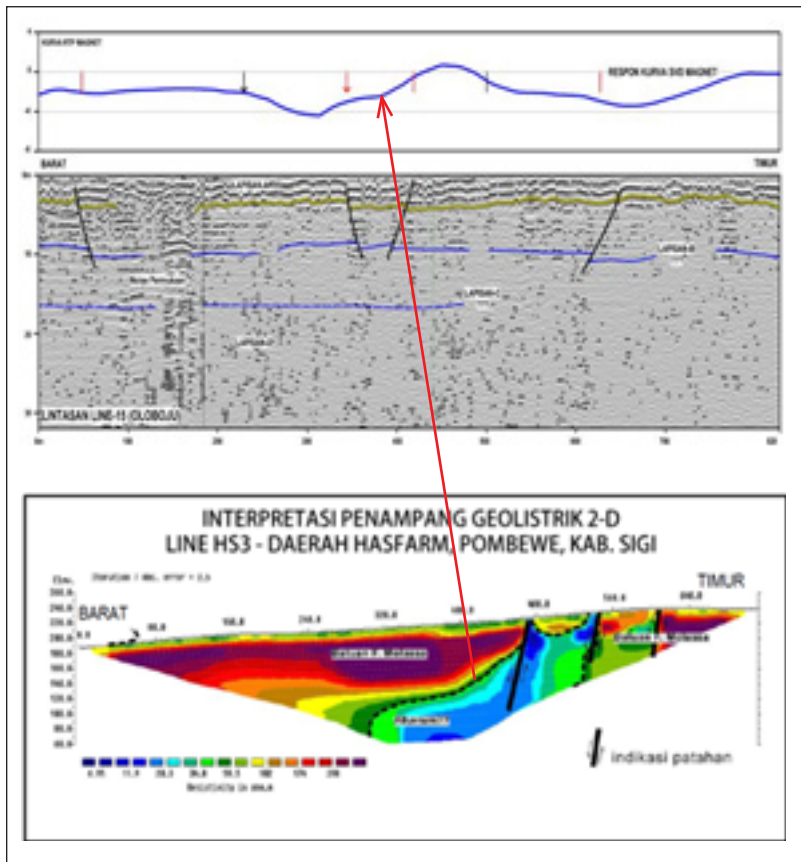
Gambar 3: Offsett pada permukaan aluvium

tektonik di atas maka sudah pasti bahwa wilayah Kota Palu dan sekitarnya cukup rentan terhadap bahaya geologi. Litologi dominan berupa aluvium sangat mudah mengalami dan melipatgandakan getaran gempa bumi. Disamping itu morfologi sisi timur dan barat wilayah ini juga memiliki kerawanan gerakan tanah akibat adanya gangguan stabilitas masa batuan karena getaran gempa bumi.

## **Data Hasil GPR, Gradiomagnet dan Mikrotremor**

Atas pertimbangan kajian awal di atas, PSG melakukan survei dan pemetaan dengan menggunakan metode GPR, gradiomagnet dan mikrotremor. Dari data hasil akuisisi GPR dapat diinterpretasikan bahwa patahan Palu-Koro merupakan

suatu zona patahan. Pengukuran GPR yang dilakukan di daerah Balarooa menunjukkan bahwa patahan cukup intensif relatif miring ke arah timur. Sedangkan pengukuran GPS di daerah Talise menunjukkan bahwa patahan relatif tegak. Kemudian pada bagian yang lebih timur, di daerah Pombewe Kabupaten Sigi patahan lebih cenderung miring ke arah barat.



Gambar 4 : Konfirmasi data antara GPR, geolistrik dan gradiomagnet

Keberadaan kelurusan-kelurusan patahan ini juga terkonfirmasi dengan data-data hasil survei gradiomagnet maupun *resistivity*, di mana dari data survei *resistivity* yang sudah dilakukan pada 2012 oleh PSG diketahui terdapat kelurusan-kelurusan yang sama (gambar 4). Dari interpretasi data *resistivity* juga diketahui bahwa potensi air bawah permukaan terdapat pada batuan-batuan dengan *resistivity* rendah dan dibatasi oleh bidang sesar normal.

Dari data-data GPR yang diambil di daerah Tondo-Talise, Petobo, Pombewe, Balaroo, dan Duyu menunjukkan adanya perbedaan pola patahan dan zona lemah yang berbeda. Di lokasi-lokasi pengukuran tampak bahwa di Tondo-Talise, Pombewe dan Duyu kerapatan patahan-patahan yang dapat diinterpretasikan memiliki spasi kelurusan yang relatif lebih panjang. Zona patahan pada lokasi-lokasi ini tidak kompleks sebagaimana zona patahan di Petobo dan Balaroo.

Interpretasi lebih lanjut menduga bahwa pada kondisi pengaruh getaran gempabumi di mana terjadi aktivasi patahan-patahan yang membatasi sumber air bawah permukaan akan menyebabkan air bawah permukaan tertekan naik dan bercampur dengan material aluvium yang berbutir halus dan menyebabkan gerakan tanah.

Dengandemikian, dari uraian di atas dapat disimpulkan Kota Palu dan sekitarnya merupakan wilayah yang rentan terhadap bahaya gempabumi dan bencana ikutan lainnya. Oleh karena itu, pengembangan wilayah ini harus memperhatikan aspek geologi. Data-data geologi dan geofisika menunjukkan bahwa wilayah Kota Palu dan sekitarnya memiliki karakteristik yang relatif kompleks dan sangat disarankan agar diperhitungkan sebagai pertimbangan utama dalam pengembangan wilayah.

Survei geologi dan geofisika secara rinci diperlukan dalam

pengembangan wilayah pada skala besar. Data-data geologi regional maupun data geologi dan geofisika di wilayah Kota palu dan sekitarnya yang rinci sudah dapat dijadikan sebagai referensi dalam penyusunan pola maupun struktur tata ruang. Data-data geologi dan geofisika juga perlu dibahas secara mendalam dalam penyusunan rencana tata ruang wilayah maupun rencana tata ruang detil kawasan.

Pengembangan infrastruktur dan pemukiman penduduk sebaiknya menghindari daerah sempadan sepanjang patahan aktif Palu-Koro dan mewaspadaai wilayah-wilayah sekitar kelurusan patahan. Selain itu, pembangunan insfratraktur dan pemukiman di wilayah Kota Palu dan sekitarnya harus berpedoman kepada *SNI Bangunan Tahan Gempa Bumi*.

*\*Isnu Hajar Sulistyawan, G.M. Lucky Djunursyah,  
Asdani Soehami, Yayan Sopyan  
bekerja di Pusat Survei Geologi*



# **Seismotektonik Palu dan Sekitarnya**

**Oleh**

**Soehaimi, Yayan Sopyan  
dan Isnu Hajar Sulistyawan**

*“Nilai kuantitatif seismotektonik pada patahan aktif Palu-Koro ditunjukkan oleh panjang segmentasi patahan (km), kekuatan gempa bumi maksimum ( $M_w$ ) dan pergeseran rata-rata per tahun (cm).”*

*Peta Patahan Aktif Indonesia* (PSG, 2010) menunjukkan bahwa Sulawesi Tengah, merupakan bagian dari Sub-Sistem Busur dan Punggungan Aktif dengan ciri memiliki Patahan Aktif Kelas B,  $M_{max} \geq 6,5$   $M_w$  hingga  $\geq 7$   $M_w$ , *Slip Rate*  $< 2$  hingga  $< 5$  mm/th). Daerah sepanjang lajur Patahan Palu-Koro terletak di daerah dengan PGA ( $MCE_G$ ) = 0,8 g (Kementerian PU/SNI 1726:2012) atau terletak di daerah PGA ( $MCE_G$ ) = 0,7 – 0,8 g (Kementerian PUPR,2017).

Data dan informasi tersebut menjadi dasar penentuan bahwa Sulawesi Tengah merupakan bagian dari Daerah Rawan Gempa Bumi Indonesia No.XV (PSG, 2004). Kepadatan penduduk dan infrastruktur hasil pembangun yang berada pada lingkup wilayah ini perlu mendapat perhatian dan perlindungan saat menghadapi ancaman bencana gempabumi yang mungkin terjadi di masa yang akan datang.

Metodologi yang diterapkan dalam pemetaan dan penelitian ini berupa kajian, evaluasi dan analisis data primer dan sekunder. Kajian, evaluasi dan analisis data primer hasil pemetaan dan penelitian terdiri dari bentangalam, stratigrafi dan litologi, struktur geologi patahan aktif, neotektonik, geofisika (gaya berat, geolistrik dan georadar). Sementara kajian, evaluasi dan analisis data sekunder kegempaan yang diperoleh dari NEIC USGS dan BMKG Pusat Jakarta dan BMKG Lokal Palu. Perpaduan kedua data dasar tersebut

dipakai dalam menyusun peta seismotektonik daerah Palu dan sekitarnya.

## **Stratigrafi dan Litologi**

Batuan tertua di daerah ini terdiri dari serpih, batupasir, batupasir malihan, filit dan batu sabak berumur Pra Tersier. Tidak selaras di atas batuan Pra Tersier dijumpai batuan Tersier yang terdiri dari konglomerat, batupasir dan batulempung yang berumur Paleosen-Oligosen. Batuan Miosen-Pliosen berupa granit dan diorite, menerobos batuan tua tersebut di atas.

Batuan Pliosen-Pleistosen berupa konglomerat, batupasir, batulumpur, napal dan batugamping koral dijumpai sebagai Molasa Sulawesi Sarasin. Batuan ini dijumpai tidak selaras di atas batuan Pra-Tersier dan Tersier. Tidak selaras di atas Molasa ini dijumpai batuan muda berupa endapan kipas patahan F1, F2, F3 dan F4 yang diperkirakan berumur Pleistosen hingga Holosen. Endapan kipas ini terdiri dari campuran berbagai macam batuan yang berada disekitar gawir maupun batuan yang berada jauh dari gawir berupa bongkah, krikil dan kerakal batuan sedimen, beku dan metasedimen.

Diantara waktu terendapkannya F2 dan F3 dijumpai Endapan Pantai Purba berupa perselingan pasir kasar dan pasir halus dan lensa-lensa pasir yang banyak mengandung fosil moluska laut. Batuan termuda di daerah ini dijumpai berupa endapan sungai dan pasir pantai berupa pasir kasar hingga halus, lempung dan sisa tumbuhan dan cangkang biota laut.

## **Tektonika**

Tektonika daerah pemetaan dan penelitian ini merupakan bagian dari tektonika Indonesia Timur yang dikontrol oleh



tumbukan empat lempeng tektonik aktif yakni lempeng tektonik samudera Pasifik dengan lempeng tektonik mikronya Laut Philipina dan Carolina, Lempeng Mikro Benua Australia (Banggai-Sula), Lempeng Benua Eropa-Asia (Sunda Land) dan Lempeng Utama Benua Australia (Papua).

Akibat tumbukan ini, terjadi patahan mendatar mengiri regional Sorong Utara dan Selatan yang mengapit Lempeng Mikro Banggai-Sula dengan arah barat-timur. Tumbukan Lempeng Mikro Benua Australia Banggai-Sula ke arah Barat memunculkan Lajur Ofiolit Sulawesi Timur yang terdiri dari batuan mafik, ultramafik, sedimen pelagic dan lava bantal (Simanjuntak, *Sedimentology and Tectonic of the Collision Complex in the East Arm of Sulawesi, Indonesia*, 1986).

Lajur Malihan yang terdapat di sebelah Barat Lajur Ofiolit disebut sebagai Lajur Malihan Sulawesi Tengah (Sukamto, *The structure of Sulawesi in the Light of Plate Tectonics*, 1975b; Sukamto & Simanjuntak, *Tectonic relationship between geologic provinces of Western Sulawesi, Eastern Sulawesi and Banggai-Sula in the light of sedimentological aspects*”, 1983; Surono, “Asal mintakat mintakat benua di bagian timur Sulawesi. Suatu tinjauan berdasarkan stratigrafi, sedimentology, dan paleomagnetik”, 1996).

Batuan penyusun Lajur Malihan Sulawesi Tengah ini terdiri dari batuan malihan tekanan tinggi berderajat rendah berupa sekis, grafit, filit, sabak, genes, serpentinit kuarsit dan batugamping malihan (Simanjuntak dkk, *Peta Geologi Lembar Poso, Sulawesi, Skala 1 : 250.000*, 1993d). Batas antara Lajur Malihan Sulawesi Tengah ini dengan Lajur Vulkanik Sulawesi Barat adalah Patahan Naik Poso.

Lajur Vulkanik Sulawesi Barat dijumpai menempati bagian Barat Sulawesi mulai dari lengan Selatan, Tengah dan Utara

yang didominasi oleh batuan gunungapi dan intrusi berumur Pleogen hingga Kuartar. Patahan Palu-Koro yang berarah relatif Utara – Selatan sebagai patahan regional di Sulawesi dijumpai memotong ketiga lajur tersebut diatas.

## **Struktur Geologi dan Geofisika**

Struktur geologi daerah ini terdiri dari perlapisan, kekar, lipatan minor dan patahan. Patahan utama daerah ini yakni patahan Palu-Koro, dengan patahan sekunder atau percabangannya yakni Patahan Lariang, Mamuju, Palolo Utara, Palolo Selatan dan Lindu.

Patahan Palu-Koro sebagai patahan utama di daerah ini memperlihatkan kinematika gerak patahan mendatar mengiri. Demikian pula halnya dengan patahan sekunder atau percabangannya. Secara keseluruhan patahan Palu-Koro di daerah ini menyerupai ciri sistem patahan Alpine di New Zealand (setelah Lensen, 1960). Patahan Palu-Koro sendiri di daerah pemetaan dan penelitian terdiri dari 8 (delapan) segmen yakni segmen Gimpu, Kulawi, Mantikole, Dolo, Gawalise, Gumbasa, Biromaru dan Tondo.

Analisis kinematika patahan Palu-Koro pada sisi Barat diwakili oleh analisis 1 dan 2 (Donggala), 4 (Balara), 5 (Palu) dan 6 (Dolo). Secara keseluruhan analisis ini memperlihatkan gaya kompresi maksimum adalah baratlaut-tenggara dan gaya kompresi minimum adalah baratdaya-timurlaut. Analisis kinematika patahan Palu-Koro sisi timur diwakili oleh analisis 8 (Gumbasa) dan 10 (Tawaili). Pada analisis 10 (Tawaili) terlihat gaya kompresi maksimum baratlaut-tenggara, pada analisis 8 (Gumbasa) gaya kompresi maksimum adalah barat-timur.

Geofisika gaya berat, geolistrik dan georadar (GPR) dalam

pemetaan dan penelitian ini telah berhasil memperlihatkan kehadiran struktur geologi Patahan Palu-Koro di bawah permukaan untuk kedalaman 0 – 3 Km (gaya berat), 0 – 70 m (geolistrik) dan < 10 m (georadar).

Penampang gaya berat bawah permukaan dibuat dengan arah Barat – Timur (A-B), melalui kota Palu. Pada penampang ini terlihat 5 satuan densitas batuan yakni  $2,97 \text{ g/cm}^3$  (granit),  $2,87 \text{ g/cm}^3$  (metasedimen),  $2,17 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,97 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,77 \text{ g/cm}^3$  (aluvium). Pada penampang gaya berat ini terlihat adanya batas yang tajam antara granit, metasedimen dan sedimen, batas kontak yang tajam ini adalah lajur patahan Palu-Koro.

Penampang geolistrik dan georadar dibuat memotong lajur patahan Palu-Koro dan patahan sekundernya. Penampang geolistrik 1 (Sibedi), memotong sisi Barat patahan Palu-Koro, terlihat adanya mekanisme patahan mendatar turun pada lajur patahan Palu-Koro segmen Dolo. Penampang geolistrik 6 (Balaroa) yang juga dibuat memotong Patahan Palu-Koro, terlihat adanya mekanisme patahan mendatar turun pada lajur patahan Palu-Koro segmen Dolo.

Penampang geolistrik 7 (Bora 1), dibuat memotong patahan Palu-Koro sisi timur, tampak lajur Patahan Palu-Koro segmen Gumbasa miring ke arah timur dengan mekanisme mendatar naik. Penampang geolistrik 8 (Bora 2), dibuat memotong sisi timur patahan Palu-Koro segmen Tondo memperlihatkan mekanisme patahan mendatar turun.

Penampang GPR pada lintasan sama dengan geolistrik menggambarkan jejak patahan pada kedalaman dangkal atau dekat permukaan. Pada patahan Palu-Koro segmen Dolo terlihat jejak patahan mendatar turun dekat permukaan < 10 meter (penampang GPR 5 dan 6). Penampang GPR 20 memotong lajur patahan Palolo, terlihat jejak patahan

mendatar turun.

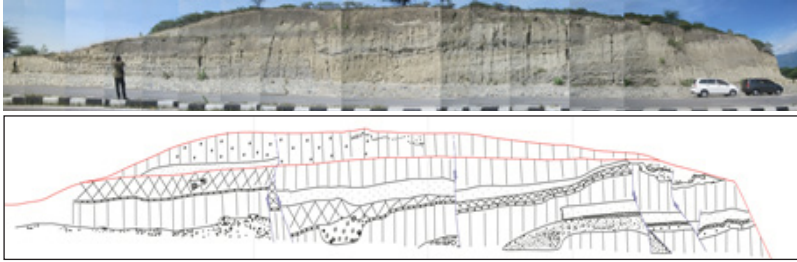
## Neotektonik dan Kegempaan

Indikasi neotektonik di daerah ini diperlihatkan pada patahan aktif Palu-Koro sisi barat dan timur. Neotektonik di sisi barat dapat diamati di daerah Balane, yaitu terlihat adanya patahan yang memotong endapan kipas berumur  $1790 \pm 200$  BP, seperti terlihat pada Gambar 1. Indikasi neotektonik di sisi timur dekat daerah Tondo yang berumur  $26750 \pm 700$ BP dan diperlihatkan dalam Gambar 2. Endapan teras pantai di daerah ini dijumpai pada ketinggian 42 m di atas muka laut, diperkirakan kecepatan pengangkatannya adalah 1,62 cm/tahun.

Data kegempaan yang digunakan dalam pemetaan dan penelitian seismotektonik ini adalah data katalog kegempaan dari NEIC, USGS tahun 1970 hingga 2012 dan data kegempaan dari BMKG. Data dan informasi gempa bumi merusak digunakan dari Pusat Survei Geologi (PSG) dan BMKG.



Gambar 1. Foto patahan memotong endapan kipas berumur  $1790 \pm 200$



Gambar 2. Foto patahan memotong endapan teras pantai berumur  $26750 \pm 700$ BP.

Data gempabumi NEIC USGS dibagi menjadi 4 klas kekuatan gempabumi atau magnitude yakni  $< 4$  Mb,  $4 - 5$  Mb dan  $> 5$  Mb, dengan 5 klas kedalaman yakni 0-30 km (merah), 30-60 km (kuning), 60-90 km (oranye) dan  $> 90$ km (biru tua). Sebaran pusat gempabumi dangkal  $< 30$ km terlihat terkonsentrasi di sepanjang patahan Palu-Koro, Palolo Utara dan Palolo Selatan (Danau Lindu). Sebagian kecil pusat gempabumi tersebar di sepanjang patahan Lariang dan patahan Parigi. Mekanisme fokal gempabumi kuat  $> 5$  Mb dan  $< 30$  km di daerah ini memperlihatkan mekanisme gerak patahan turun terutama di sepanjang patahan Palu-Koro. Mekanisme fokal gerak patahan mendatar di kedalaman 0-60 km dijumpai di sepanjang patahan Palolo di daerah Lindu dan Gumbasa.

Tiga gempabumi merusak yang pernah terjadi di daerah ini yakni gempabumi Bora 1938, gempabumi Gimpu 1985, Gempabumi Parigi 1995, gempabumi Palolo 2006 dan gempabumi Sigi 2012. Berdasarkan tingkat kerusakan infrastruktur (rumah penduduk, gedung perkantoran, pertokoan dan saran jalan dan irigasi) serta kerusakan geologi (tanah retak, patahan gempa serta tanah longsor), dapat diperkirakan intensitas maksimum yang pernah terjadi di daerah ini adalah VII-VIII MMI.

## Seismotektonik

Seismotektonik daerah Palu ini merupakan pencerminan sistem seismotektonik patahan aktif bercabang (*bifurcation*). Ciri khusus yang diperlihatkan pada sistem ini berupa morfostruktur yang bercirikan adanya lembah-lembah terbanan berbentuk ellipsoidal sempit dan memanjang akibat percabangan sistim patahan linier. Selain itu, di daerah ini dapat dijumpai morfostruktur terbanan ellipsoidal sangat lebar yang dibatasi oleh lajur patahan pada kedua sisi blok patahan.

Berdasarkan tatanan seismotektonik yang terdiri dari morfostruktur patahan, kinematika struktur patahan, indikasi neotektonik dan kegempaanannya termasuk di dalamnya tingkat kerusakan akibat gempabumi serta mekanismefokal gempabumi yang pernah terjadi pada lajur patahannya maka seismotektonik daerah ini dapat dibagi menjadi 13 segmentasi seismotektonik yakni:

1. Seismotektonik patahan aktif segmen Gimpu (panjang patahan 21,45 km, pergeseran maksimum 0,2 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,2$  Mw).
2. Seismotektonik patahan aktif segmen Kulawi (panjang patahan 20,93 km, pergeseran maksimum 0,19 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,1$  Mw).
3. Seismotektonik patahan aktif segmen Mantikole (panjang patahan 22,88 km, pergeseran maksimum 0,21 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,2$  Mw).
4. Seismotektonik patahan aktif segmen Dolo (panjang patahan 24,37 km, pergeseran maksimum 0,21 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,2$  Mw).
5. Seismotektonik patahan aktif segemen Gawalise (panjang patahan 26,96 km, pergeseran maksimum 0,20 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,3$  Mw).

6. Seismotektonik patahan aktif segmen Gumbasa (panjang patahan 32,88 Km, pergeseran maksimum 0,25 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,5$  Mw).
4. Seismotektonik patahan aktif segmen Biromaru (panjang patahan 18,60 km, pergeseran maksimum 0,18 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6$  Mw).
8. Seismotektonik patahan aktif segmen Tondo (panjang patahan 15,62 km, pergeseran maksimum 0,15 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 5,9$  Mw).
9. Seismotektonik patahan aktif Lariang (panjang patahan 71,2 km, pergeseran maksimum 0,34 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 7$  Mw).
10. Seismotektonik patahan aktif Mamuju (panjang patahan 40,34 km, pergeseran maksimum 0,28 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,6$  Mw).
11. Seismotektonik patahan potensi aktif Palolo Utara (panjang patahan 62,48 km, pergeseran maksimum 0,32 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,9$  Mw).
12. Seismotektonik patahan aktif Palolo Selatan (panjang patahan 65,21 km, pergeseran maksimum 0,33 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 7$  Mw).
13. Seismotektonik patahan aktif Lindu (panjang patahan 56,61 km, pergeseran maksimum 0,31 cm dan kekuatan gempa  $M_{max} = 6,9$  Mw). Peta seismotektonik daerah Palu dan sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan, untuk pemetaan dan penelitian seismotektonik di daerah Palu dan sekitarnya telah ditentukan 13 segmentasi patahan aktif Palu-Koro, dengan potensi kekuatan gempabumi maksimum 7 MW.







Hasil pemetaan dan penelitian seismotektonik berupa nilai-nilai kuantitatif segementasi patahan aktif ini dapat dipakai sebagai data dasar analisis dalam perhitungan potensi bencana gempabumi PSHA dan DSHA. Besar kecilnya kekuatan gempabumi segementasi patahan aktif, adalah merupakan indeks potensi risiko gempabumi di kawasan ini.

*\*A.Soehaimi, Yayan Sopyan  
dan R.Isnu Sulistyawan  
bekerja di Pusat Survei Geologi*

# Genetika Gempabumi

Oleh

**Soehaimi, Yayan Sopyan  
dan Isnu Hajar Sulistyawan**

*“Nilai kuantitatif potensi gempabumi dapat dipakai dasar untuk menghitung potensi bencana gempabumi PSHA dan DSHA di kawasan Palu dan sekitarnya”.*

Gempabumi tektonik adalah fenomena alam yang terjadi akibat pelepasan energi potensial dari sumber gempabumi berupa patahan di dalam kerak bumi yang kemudian menjalar ke permukaan bumi sebagai energi kinetik berupa gelombang gempabumi.

Teori *asperity* yang menjelaskan genetika kejadian gempabumi, menunjukkan bahwa gempabumi terjadi di bidang patahan yang mengalami penekanan oleh gaya kompresi. Penekanan oleh gaya kompresi di bidang patahan tidak sama dari satu tempat ke tempat lainnya. Daerah pada bidang patahan yang mengandung daerah (*patch*) yang belum pecah atau patah dan bertindak sebagai tempat akumulasi gaya kompresi tersebut di atas dan akan merupakan daerah potensi terjadinya gempabumi. Das dan Aki (1971), Mikumo dan Miyatake (1978), menyatakan bahwa gempabumi baru akan terjadi di antara daerah-daerah yang telah terjadi gempanya. Daerah seperti ini disebut sebagai *barrier (gap)*

Untuk mengetahui besaran potensi bencana dan risiko yang diakibatkan oleh lepasnya energi gempabumi, baik gempabumi awal, utama dan susulannya perlu diketahui secara genetika. Dengan cara demikian, rangkaian kejadian suatu gempabumi diharapkan dapat diketahui seberapa luas daerah yang terdampak oleh kejadian gempabumi, sehingga upaya mitigasi secara maksimal dapat dicapai sesuai dengan target yang diharapkan.

## Patahan Palu-Koro

Sulawesi Tengah terletak di dalam lingkup benturan tiga lempeng tektonik aktif yakni Lempeng Mikrotektonik Aktif Benua Australia (Banggai-Sula) dari timur ke Lempeng Benua Europa-Asia/Sundaland di sebelah barat dan Lempeng Mikro Laut Filipina dari arah utara. Patahan Palu-Koro adalah merupakan akibat dari peristiwa benturan ketiga lempeng tektonik tersebut.

Patahan ini dijumpai di lapangan berarah relatif utara-selatan, dijumpai di sisi bagian barat dan timur Lembah dan Teluk Palu. Ke arah selatan patahan yang berada di kedua sisi Teluk dan Lembah Palu ini menjadi Patahan Kulawi dan Patahan Matano. Patahan Palu-Koro sisi barat ini, yaitu di sebelah baratdaya pusat Kota Palu, dipotong oleh Patahan Balane dengan arah relatif baratdaya-timurlaut. Di sebelah tenggara pusat Kota Palu, patahan sisi timur Palu-Koro dipotong oleh Patahan Palolo, dengan arah baratlaut-tenggara.

Secara keseluruhan Patahan Palu-Koro memperlihatkan gerak patahan mendatar mengiri turun. Berdasarkan analisis kinematika struktur geologi secara lokal maupun regional, struktur patahan ini dikontrol oleh gaya tektonik dengan arah relatif barat-timur.

*Peta Patahan Aktif Indonesia* (PSG, 2010) menunjukkan bahwa Sulawesi Tengah merupakan bagian dari Sub-Sistem Busur dan Punggungan Aktif dengan ciri memiliki Patahan Aktif Kelas B,  $M_{max} \geq 6,5$  Mw hingga  $\geq 7$  Mw, Slip Rate  $< 2$  hingga  $< 5$  mm/th). Daerah sepanjang lajur Patahan Palu-Koro terletak di daerah dengan PGA ( $MCE_G$ ) = 0,8 g (Kementerian PU/SNI 1726:2012) atau terletak di daerah PGA ( $MCE_G$ ) = 0,7 – 0,8 g (Kementerian PUPR,2017). Secara keseluruhan Sulawesi

Tengah yang dilalui oleh patahan Palu-Koro ini merupakan bagian dari Daerah Rawan Gempa Bumi Indonesia No.XV (PSG, 2004).

## **Genetika Patahan Aktif**

Analisis kegempaan untuk gempabumi pada 28 September 2018, berbasis pada peta kegempaan, penampang tegak kegempaan sepanjang lajur Patahan Palu-Koro dengan arah sejajar patahan dan memotong patahan (Supendi, dkk, 2018), mekanisme fokal (USGS) serta citra ALOS 2 interferogram (JAXA, Earth Observatory of Singapore, Sentinel Asia, 2018).

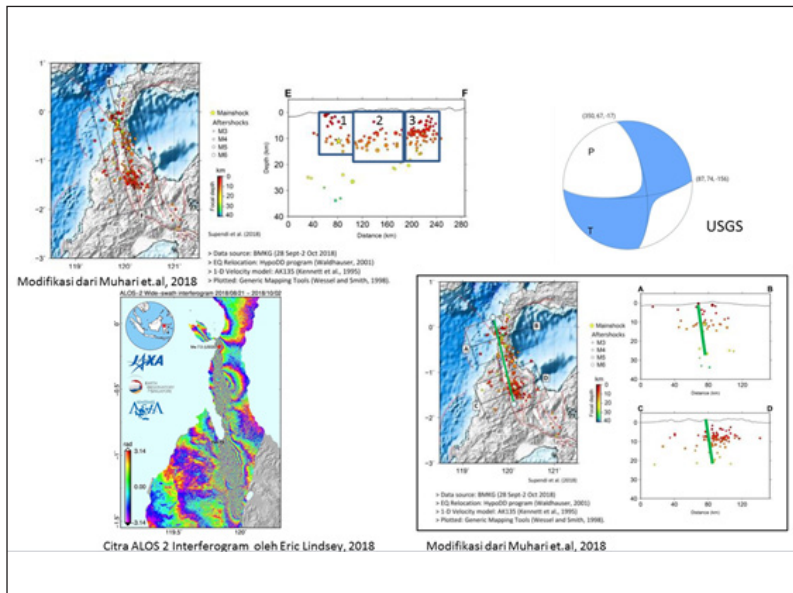
Citra ALOS2 (21 Agustus – 2 Oktober 2018) memperlihatkan sisi bagian timur Teluk dan Lembah Palu pada periode tersebut, terjadi perulangan beda fase yang membentuk perulangan garis warna secara rapat, membentuk kontur radius di sekitar patahan sebagai lajur deformasi, sebelum terjadi gempabumi.

Berdasarkan citra ini diperkirakan daerah potensi deformasi sepanjang  $\pm 150$  km. Data mekanisme fokal gempabumi ini menurut USGS memperlihatkan gerak patahan mendatar mengiri turun, dengan Np.1 ( $350^\circ, 67^\circ, -17^\circ$ ) dan Np.2 ( $87^\circ, 74^\circ, -156^\circ$ ). Bidang patahan yang aktif pada peristiwa gempabumi ini adalah Np.1.

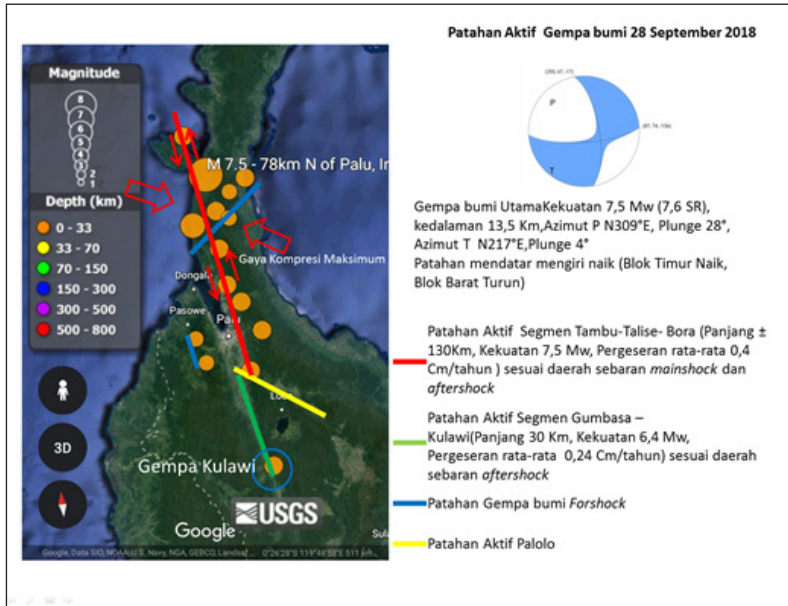
Keberadaan bidang patahan ini diperlihatkan oleh adanya kelurusan sebaran gempabumi secara tegak di kedalaman 0-35 km seperti terlihat pada penampang tegak gempabumi memotong patahan dengan arah barat-timur, terlihat dalam Gambar 1. Penampang tegak sejajar lajur patahan, menunjukkan tiga kumpulan hiposenter yakni kumpulan hiposenter 1, 2 dan 3, terlihat dalam Gambar 1. Kumpulan hiposenter tersebut mencerminkan bahwa Patahan Palu-Koro

yang aktif pada gempa bumi tersebut terdiri atas tiga segmen yakni Segmen Tambu-Talise-Bora (utara dan tengah), Segmen Gumbasa - Kulawi (selatan), seperti terlihat dalam Gambar 2.

Patahan Aktif Segmen Tambu-Talise-Bora ini berdasarkan rumus imperis *Global Relations Between Seismic Fault Parametres and Moment Magnitude of Earthquakes* (Papazachos, B.C et.al, 2004), dengan panjang patahan  $\pm 130$  km, memiliki kekuatan 7,5 Mw dengan pergeseran rata - rata 0,4 cm/tahun. Patahan Aktif Segmen Gumbasa-Kulawi, dengan panjang patahan 30 km, memiliki kekuatan 6,5 Mw dengan pergeseran rata-rata 0,24 cm/tahun, seperti terlihat dalam Gambar 2.



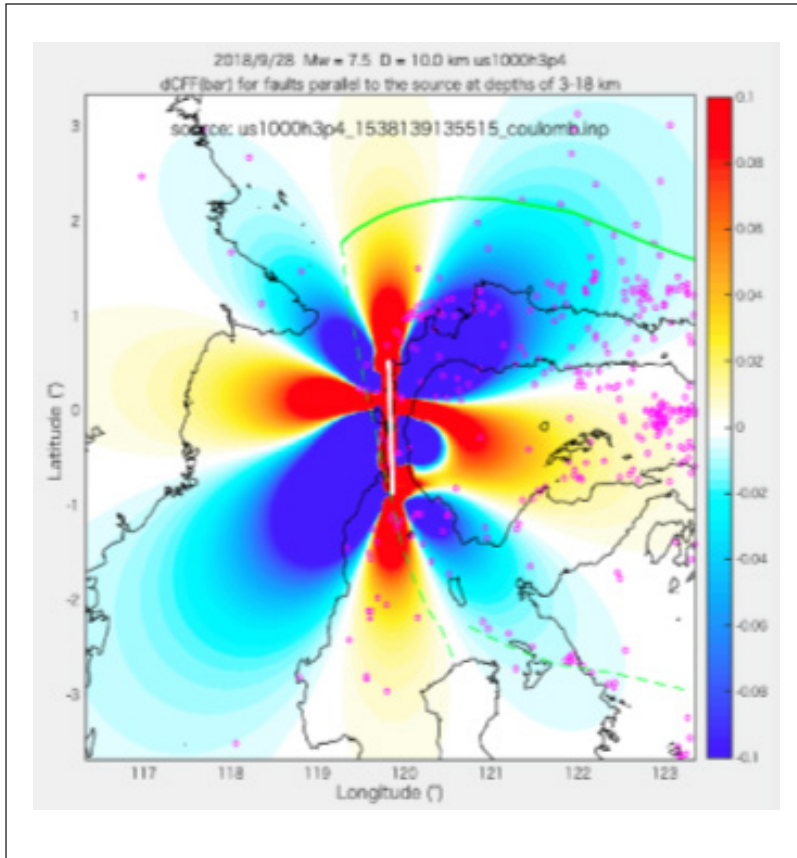
Gambar 1. Citra ALOS 2 (JAXA, *Earth Observatory of Singapore*, Sentinel Asia, 2018), kegempaan dan penampang tegak kegempaan (Supendi dkk, *Lessons Learned dari Gempa Lombok dan Sulawesi Tengah: Implikasi untuk Jawa Barat*, 2018) serta mekanisme fokal gempa bumi 28 September 2018 (USGS)



Gambar 2. Patahan Aktif Palu-Donggala-Sigi 28 September 2018

Selain itu, peristiwa gempabumi itu diawali oleh adanya rangkaian gempabumi-gempabumi *foreshock*, yang berasosiasi dengan patahan berarah baratdaya-timurlaut dan relatif utara-selatan (Gambar 2). Hasil analisis kegempaan pada gempabumi tanggal 28 September 2018 oleh USGS (2018), menunjukkan gaya *static coulomb* pada peristiwa gempabumi 7,5 Mw yang sejajar sumber patahan seperti terlihat dalam Gambar 3. Warna merah dalam gambar menunjukkan kenaikan gaya tekan barat-timur dan utara-selatan, gaya tekan menurun dengan arah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa gempabumi pada 28 September 2018 terjadi di sepanjang patahan aktif Palu-Koro sisi timur, dengan panjang ± 160 km yang terdiri atas tiga segmen yakni 2 Segmen Patahan Aktif Tambu-Talise-



Gambar 3. Gaya *static coulomb* gempa bumi 28 September 2018 kekuatan 7,5 Mw.

Bora dengan panjang 130 km dan 1 segmen Patahan Aktif Gumbasa-Kulawi dengan panjang  $\pm 30$  km.

Gempabumi pada 28 September 2018 itu diawali oleh adanya gempabumi-gempabumi *foreshock* di kedua sisi barat dan timur lajur Patahan Palu-Koro. Segmentasi Patahan Aktif Tambu-Talise-Bora dengan segmentasi Patahan Aktif



Gumbasa-Kulawi terpotong oleh Sistem Patahan Aktif Palolo,  
dengan arah baratlaut-tenggara.

*\*A. Soehaimi, Yayan Sopyan  
dan R. Isnu Sulistyawan  
bekerja di Pusat Survei Geologi.*

# Tingkat Guncangan dan Skala Intensitas Gempabumi

Oleh

**Supartoyo, Athanasius Cipta, Akhmad Solikhin,  
Sri Hidayati, dan Rustan Effendi**

*“Guncangan gempabumi maksimum terjadi di daerah Jono Oge, Kabupaten Sigi pada skala intensitas gempabumi IX MMI (Modified Mercalli Intensity)”.*

Survei pasca gempabumi Palu perlu dilakukan untuk mengetahui besaran dampak guncangannya. Survei tersebut dilakukan melalui identifikasi dampak permukaan yang sangat penting guna mengetahui tingkatan skala intensitas gempabumi dan akan membantu untuk mengidentifikasi posisi sumber gempabumi. Tingkatan guncangan dan skala intensitas gempabumi tanggal 28 September 2018, itulah yang menjadi fokus tulisan ini.

Metodologi identifikasi dampak permukaan tersebut berupa melakukan pemeriksaan dampak guncangan gempabumi berupa kerusakan bangunan dan obyek terdampak lainnya, pemeriksaan sesar permukaan, pemeriksaan bahaya ikutan (*collateral hazard*) (meliputi retakan tanah, likuifaksi dan gerakan tanah atau longsoran), melakukan wawancara secara langsung kepada masyarakat tentang kejadian gempabumi guna mengetahui besarnya guncangan gempabumi tanggal 28 September 2018. Data tersebut diolah dan ditampilkan pada peta isoseismal yang menggambarkan skala intensitas gempabumi. Skala intensitas gempabumi mengacu pada skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) yang terdiri-dari 12 tingkatan.

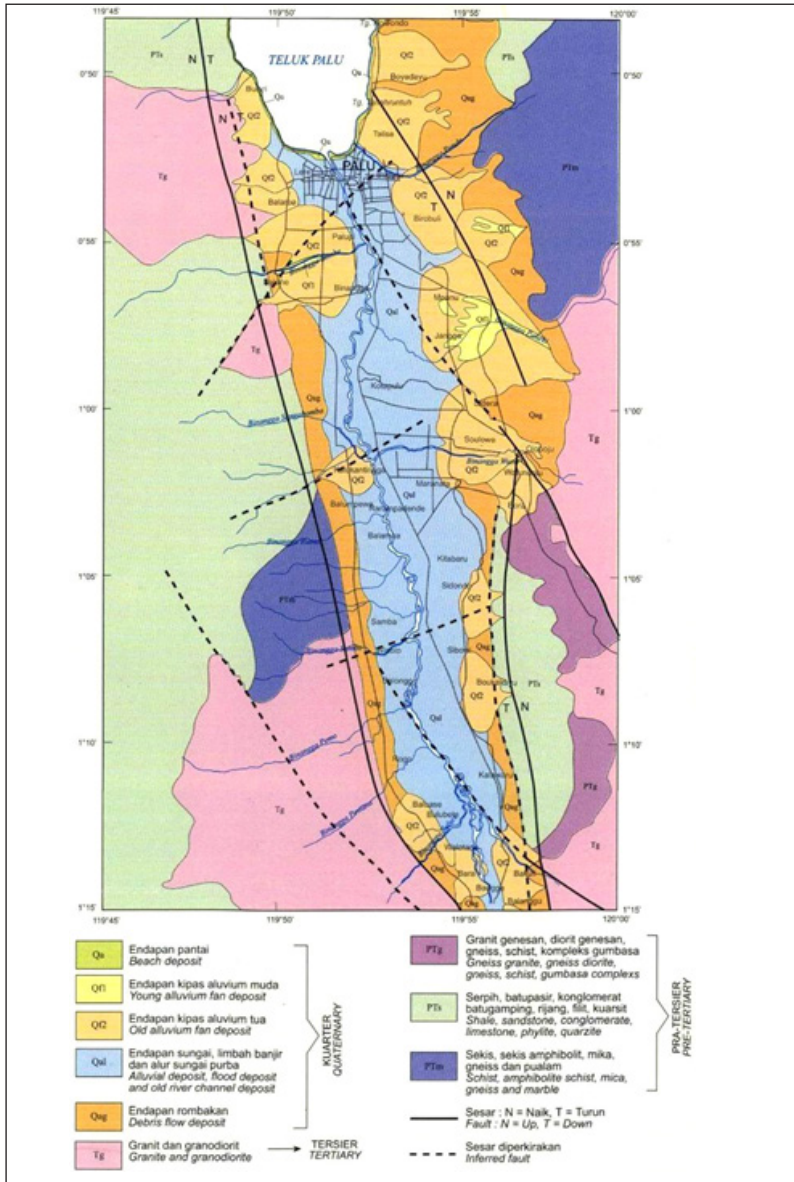
## **Dampak Guncangan**

Gempabumi pada 28 September 2018 mengakibatkan terjadinya bencana cukup luas di daerah Sulawesi Tengah.

Wilayah terdampak adalah Kabupaten Donggala, Sigi, Parigi Moutong dan Kota Palu. Semua jenis bahaya gempabumi muncul di permukaan pada gempabumi 28 September 2018, yaitu efek guncangan, sesar permukaan (*surface rupture*), bahaya ikutan (meliputi retakan tanah, likuifaksi dan gerakan tanah). Bahkan gempabumi tersebut memicu terjadinya tsunami. Tsunami melanda teluk Palu dan sebagian di Kabupaten Donggala, yaitu di Desa Tanjung Padang dan Tompe, Kecamatan Sirenja. Ketinggian rendaman tsunami (*flow depth*) bervariasi antara 65 cm hingga 530 cm dengan jarak landaan terjauh ke darat (*run up distance*) adalah 500 m.

Gempabumi itu mengakibatkan terjadinya pergeseran (*offset*) yang cukup besar, dan arahnya dominan pergeseran mengiri (*sinistral offset*). Nilai pergeseran mengiri yang berkisar 2 cm (di daerah Sigi Biromaru) hingga 580 cm (di Desa Pawunu, Kecamatan Dolo Barat, Kabupaten Sigi). Gempabumi tersebut juga memicu terjadinya likuifaksi dahsyat yang berkembang menjadi aliran. Daerah Balaroa dan Petobo, Kota Palu merupakan daerah terparah akibat fenomena likuifaksi yang kemudian berkembang menjadi aliran. Selain itu gempabumi tersebut juga memicu terjadinya gerakan tanah di daerah Donggala bagian utara hingga daerah Kulawi, Kabupaten Sigi.

Guncangan gempabumi terasa kuat di daerah yang terletak dekat dengan lokasi pusat gempabumi (desa Tompe, Kecamatan Sirenja, Kabupaten Donggala), daerah pesisir Kabupaten Donggala bagian utara, Kota Palu dan Kabupaten Sigi. Daerah sekitar pusat gempabumi tersusun oleh batuan berumur pra Tersier berupa granit (Gambar 2) dan batuan metamorf yaitu sekis (*schist*), gnes (*gneiss*), dan marmer (*Peta Geologi Lembar Palu, Skala 1 : 250.000, Sulawesi, RAB Soekamto dkk., 1973*). Sebagian besar batuan tersebut masih bersifat segar (*fresh*)



Gambar 1. Peta geologi daerah Palu dan sekitarnya (Soehaimi dkk., 2000).



Gambar 2. Bongkahan batuan granit yang jatuh akibat gempabumi tanggal 28 September 2018 di daerah Kecamatan Sindue, Kabupaten Donggala.



Gambar 3. Singkapan endapan material rombakan yang bersifat lepas di Jalan Soekarno Hatta, Kota Palu.

dan sebagian telah mengalami pelapukan. Semestinya batuan tersebut tergolong batuan keras yang bersifat segar, namun karena dekat dengan lokasi pusat gempa bumi, maka efek guncangan akan terasa kuat. Hal ini dibuktikan banyaknya gerakan tanah dipicu gempa bumi pada batuan – batuan tersebut yang materialnya menutupi jalan.

Daerah sepanjang pantai Kabupaten Donggala Utara merupakan dataran pantai yang berbatasan dengan perbukitan hingga perbukitan terjal. Daerah tersebut dominan tersusun oleh endapan Kuartar (Gambar 5). Sebagian kecil tersusun oleh granit dan batuan metamorf. Endapan Kuartar yang dominan adalah satuan Molasa Sulawesi Sarasin dan Sarasin (Soekamto dkk., 1973) serta endapan aluvial pantai. Satuan Molasa Sulawesi Sarasin dan Sarasin terdiri-dari konglomerat, batupasir, batulumpur, napal dan batugamping koral, bersifat lepas dan sebagian bersifat agak kompak.

Kota Palu yang terletak di Teluk Palu berdasarkan pengamatan lapangan merupakan morfologi dataran hingga dataran bergelombang yang diapit oleh morfologi perbukitan hingga perbukitan terjal pada bagian barat dan timur. Kota Palu tersusun oleh endapan Kuartar (Gambar 1) berupa endapan aluvial pantai, sungai, kipas kolovial dan endapan rombakan (Gambar 3) dari batuan yang lebih tua (*Peta Zonasi Kerentanan Bencana Gempabumi Daerah Palu dan Sekitarnya*, A. Soehaimi dkk., 2000).

Endapan Kuartar pada umumnya bersifat lepas, urai, lunak, belum kompak dan memperkuat efek guncangan, mudah berubah susunannya bila terkena guncangan gempa bumi, sehingga rawan guncangan gempa bumi. Pada bagian barat Kota Palu merupakan morfologi perbukitan hingga perbukitan terjal yang tersusun oleh batuan granit, sedangkan pada





Gambar 4. Singkapan pasir kerikilan dengan fragmen dan matrik granit, marmmer bersifat belum kompak di lokasi PT Hasfarm, Kabupaten Sigi.



Gambar 5. Masjid di desa Lambonga, Kecamatan Balaesang, Kabupaten Donggala rusak berat akibat gempabumi tanggal 28 September 2018, terletak pada endapan aluvial pantai.



bagian timur tersusun oleh Satuan Molasa Sulawesi Sarasin dan Sarasin serta batuan metamorf. Guncangan gempa bumi terasa kuat di Kota Palu yang tersusun oleh endapan Kuarter, dibuktikan terjadinya sesar permukaan, kerusakan bangunan, likuifaksi dan banyaknya retakan tanah.

Kondisi geologi daerah Kabupaten Sigi mirip dengan Kota Palu. Morfologi Kabupaten Sigi merupakan dataran hingga dataran bergelombang yang juga diapit oleh morfologi perbukitan hingga perbukitan terjal pada bagian barat dan timur. Pada bagian selatan yaitu daerah Kulawi lembah semakin sempit dan perbukitan hingga perbukitan terjal menjadi lebih dominan. Lembah sempit diapit perbukitan ini merupakan jalur dari sesar Palu Koro pada segmen Saluki dan Moa. Daerah Sigi bagian utara dominan tersusun oleh endapan Kuarter yaitu endapan aluvial pantai, sungai, kipas kolovial dan endapan rombakan dari batuan yang lebih tua. Sebagian lagi terutama pada bagian tenggara tersusun oleh Satuan Molasa Sulawesi Sarasin dan Sarasin (Gambar 4).

Pada bagian barat daerah Sigi merupakan morfologi perbukitan hingga perbukitan terjal yang tersusun oleh batuan granit, sedangkan pada bagian timur perbukitan tersebut tersusun batuan metamorf. Adapun bagian selatannya yaitu daerah Kulawi yang merupakan lembah sempit, tersusun oleh endapan aluvial sungai diapit oleh batuan granit. Guncangan gempa bumi di daerah Sigi terasa kuat terutama pada daerah yang tersusun oleh endapan Kuarter dan juga batuan granit. Hal ini dibuktikan terjadinya sesar permukaan, kerusakan bangunan, likuifaksi, banyaknya retakan tanah dan pada batuan granit banyaknya gerakan tanah dipicu guncangan gempa bumi dengan material bongkahan batuan granit di daerah Kulawi.

## Skala Intensitas Gempabumi

Identifikasi intensitas gempabumi pada 28 September 2018 berdasarkan hasil pengamatan terhadap kerusakan bangunan, respon obyek secara langsung di lapangan dan juga wawancara dengan masyarakat dan aparat setempat. Berdasarkan hasil pemeriksaan lapangan, skala intensitas maksimum gempabumi 28 September 2018 melanda daerah Jono Oge, Kecamatan Sigi Biromaru, Kabupaten Sigi yang mencapai skala intensitas IX MMI. Daerah ini kerusakannya sangat masif. Hampir semua bangunan yang terletak di daerah ini mengalami kerusakan berat dicirikan pondasi dan rangka bangunan rusak, bangunan menjadi miring. Tanah bergelombang terlihat di daerah ini



Gambar 6. Tanah bergelombang yang mengakibatkan kerusakan bangunan di daerah Jono Oge, Kecamatan Sigi Biromaru, Kabupaten Sigi akibat gempabumi 28 September 2018. Skala intensitas gempabumi di daerah Jono Oge mencapai IX MMI.



Gambar 7. Retakan tanah masif berarah utara – selatan mengakibatkan kerusakan bangunan di daerah Jono Oge, Kecamatan Sigi Biromaru, Kabupaten Sigi akibat gempa bumi 28 September 2018.

yang memperlihatkan kuatnya efek guncangan (Gambar 6). Sumbu tanah bergelombang dominan berarah barat – timur, dan di bagian barat berarah utara – selatan. Retakan tanah masif dengan dimensi besar hampir ditemui di seluruh wilayah ini (Gambar 7). Dampak lainnya yang terlihat adalah likuifaksi dimensi besar, terdapat aliran gerakan tanah yang memutus jalan menuju Poso dan memindahkan tanah akibat adanya air yang muncul dari sungai melalui retakan tanah.

Menurut penduduk setempat saat terjadi gempa bumi, guncangan terasa sangat kuat, publik menjadi panik, dan banyak benda yang jatuh ke dalam tanah akibat retakan tanah yang terbentuk. Daerah Jono Oge tersusun oleh endapan Kuarter yaitu endapan aluvial, kipas kolovial dan endapan rombakan



Gambar 8. Guncangan gempa bumi dan juga tsunami tanggal 28 September 2018 mengakibatkan kerusakan dermaga di Kampung Tanah Runtuh, Kecamatan Balaesang, Kabupaten Donggala.

dari batuan yang lebih tua. Kondisi ini memperparah efek guncangan gempa bumi di daerah ini. Skala intensitas IX MMI hanya terletak di daerah Jono Oge.

Daerah di sekitar pusat gempa bumi yaitu daerah Sirenja Kabupaten Donggala, wilayah pesisir Donggala bagian utara, Kota Palu dan sebagian daerah Kabupaten Sigi berada pada skala intensitas VIII MMI. Hal ini dicirikan oleh pengemudi mobil terganggu, terjadi kerusakan pada bangunan-bangunan yang kuat dan juga dirancang tidak tahan gempa bumi (*non-engineering building*), tangki air yang berada di atas berputar hingga terjatuh, rangka rumah berpindah dari pondasinya, dinding-dinding bangunan roboh, ranting pohon patah dari dahannya, tanah yang basah dan lereng yang curam terbelah,



Gambar 9. Rumah penduduk roboh di Kota Pasangkayu akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018.

terjadi retakan tanah, pergeseran tanah, likuifaksi dan gerakan tanah/ longoran. Guncangan gempa bumi di Kota Palu mampu merobohkan beberapa bangunan tempat konsentrasi manusia, seperti hotel Roa-roa, supermarket Ramayana, dan lain-lain. Daerah Petobo dan Balaroa yang mengalami bencana parah likuifaksi terletak pada skala intensitas VIII MMI.

Daerah Balaesang bagian utara Kabupaten Donggala (Gambar 8), daerah Banawa Selatan, Banawa Tengah, Dolo Selatan, Kulawi dan bagian timur Kabupaten Sigi terdampak pada skala intensitas VII MMI. Hal ini dicirikan oleh setiap orang keluar bangunan, dapat dirasakan sopir yang mengemudikan mobil, orang yang sedang berjalan kaki sulit berjalan dengan baik, langit-langit dan bagian konstruksi pada

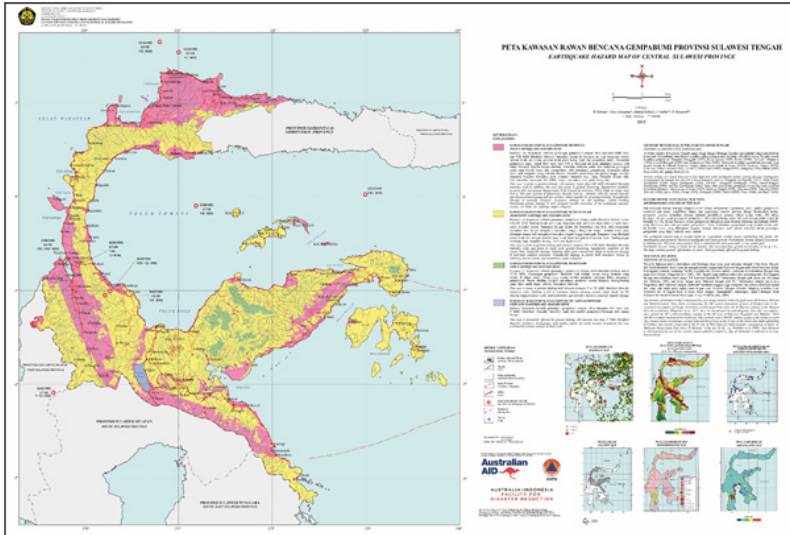


tempat yang tinggi rusak, barang pecah-belah pecah, tembok yang tidak kuat pecah, tembok bangunan jatuh dan roboh, terjadi retakan tanah, air sumur dan permukaan menjadi keruh, selokan irigasi rusak.

Daerah Mamuju Utara yang berbatasan dengan Kecamatan Banawa Selatan Kabupaten Donggala berada pada skala intensitas VI MMI. Di daerah ini guncangan gempa bumi terasa oleh hampir semua orang, barang-barang di atas meja jatuh dan beberapa bangunan mengalami kerusakan. Kota Pasangkayu yang merupakan ibu kota Kabupaten Mamuju Utara, guncangan gempa bumi terletak pada skala V MMI. Pada umumnya masyarakat di Kota Pasangkayu merasakan adanya gempa bumi dan terdapat bangunan yang mengalami kerusakan berat bahkan hampir roboh di Kota Pasangkayu (Gambar 9) dan hingga hari Senin, 1 Oktober 2018, listrik masih mati.

Dampak gempa bumi yang terjadi di daerah sekitar pusat gempa bumi, daerah sepanjang pesisir Donggala bagian utara, Kota Palu dan sebagian daerah Kabupaten Sigi termasuk ke dalam skala VIII MMI. Hal ini bersesuaian dengan peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) gempa bumi yang telah disusun oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Badan Geologi (BG) tahun 2012 (*Peta kawasan rawan bencana gempa bumi daerah Sulawesi Tengah*, R. Robiana dkk., 2012) (Gambar 10).

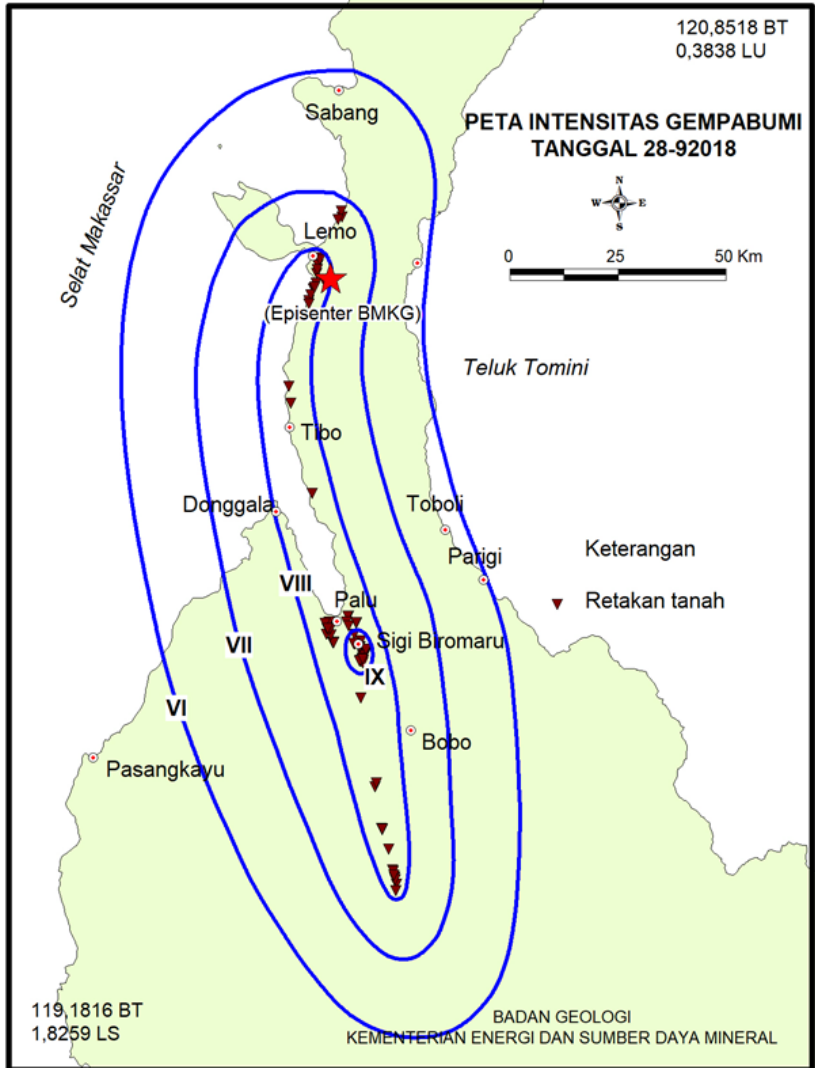
Pada peta tersebut dinyatakan bahwa daerah-daerah tersebut terletak pada KRB gempa bumi tinggi dengan simbol warna merah, artinya berpotensi terlanda guncangan gempa bumi lebih besar dari skala VIII MMI dengan percepatan gempa bumi di tanah permukaan lebih besar dari 0,45 g (gravitasi). Berdasarkan pengamatan lapangan, daerah



Gambar 10. Peta kawasan rawan bencana gempabumi daerah Sulawesi Tengah (Robiana dkk., 2012).

Balaesang bagian utara Kabupaten Donggala, daerah Banawa Selatan, Banawa Tengah, Dolo Selatan, Kulawi dan bagian timur Kabupaten Sigi terletak pada skala intensitas VII MMI dan hal ini cukup bersesuaian dengan peta KRB gempabumi Provinsi Sulawesi Tengah.

Pada peta tersebut dinyatakan bahwa daerah-daerah tersebut terletak pada KRB gempabumi menengah dengan simbol warna kuning, artinya berpotensi terlanda guncangan gempabumi dengan skala intensitas berkisar antara VII MMI hingga VIII MMI. Oleh karena itu peta KRB gempabumi yang disusun oleh PVMBG BG bersesuaian dengan dampak gempabumi yang terjadi tanggal 28 September 2018. Peta isoseismal yang menggambarkan skala intensitas gempabumi tanggal 28 September 2018 ditampilkan pada gambar 11.



Gambar 11. Peta intensitas gempabumi tanggal 29 September 2018.



Berdasarkan uraian di atas berkaitan dengan dampak guncangan gempa bumi pada 28 September 2018, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: *Pertama*, Kabupaten Donggala, Sigi dan Kota Palu, merupakan wilayah rawan gempa bumi karena terletak dekat dengan sumber gempa bumi yaitu sesar Palu Koro. Gempa bumi tanggal 28 September 2018 diakibatkan oleh aktivitas sesar Palu Koro.

*Kedua*, skala intensitas gempa bumi maksimum terjadi di daerah Jono Oge, Kabupaten Sigi yang mencapai skala IX MMI dicirikan adanya tanah bergelombang, retakan tanah dan kerusakan bangunan yang merata. *Ketiga*, daerah di sekitar pusat gempa bumi, wilayah pesisir Donggala utara, sebagian Kabupaten Sigi dan Kota Palu berada pada skala intensitas VIII MMI.

*Keempat*, dampak dari gempa bumi 28 September 2018 relatif bersesuaian dengan peta KRB gempa bumi yang disusun oleh PVMBG BG tahun 2012. *Kelima*, kerusakan bangunan yang terjadi akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018 disebabkan oleh beberapa faktor yaitu : jarak yang dekat dengan sumber gempa bumi, guncangan gempa bumi kuat, bangunan yang dirancang tidak tahan gempa bumi (*non-engineered building*), terletak pada jalur sesar permukaan, retakan tanah dan lokasi likuifaksi serta terletak pada endapan Kuartar.

*\*Supartoyo, Athanasius Cipta,  
Akhmad Solikhin, Sri Hidayati  
bekerja di Pusat Vulkanologi dan  
Mitigasi Bencana Geologi dan  
Rustan Efendi di Fakultas Matematika dan  
Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako*

# Menghitung Guncangan Gempabumi

Oleh

**Amalfi Omang, Akhmad Solikhin,  
Supartoyo, Pandu Adi Minarno, Athanasius Cipta,  
Fadlianto Nurfalalah, dan Rustan Efendi**

*“Guncangan gempa bumi Palu-Donggala M7.5 pada 28 September memiliki nilai maksimum yang besar. Di dalamnya, aspek geologi lokal berperan penting pada nilai percepatan di batuan dasar dan permukaan.”*

Dampak gempa bumi dapat ditinjau dari dua aspek, yaitu aspek parameter sumber gempa yang meliputi magnitudo, jenis sesar, dimensi, heterogenitas, dan kedalaman bidang *rupture*, serta aspek daerah terdampak.

Parameter geologi lokal, yaitu kekerasan batuan permukaan, total ketebalan sedimen di atas batuan dasar, merupakan salah satu faktor terpenting yang harus dievaluasi dalam pemetaan daerah terdampak untuk menjawab apakah faktor amplifikasi berperan dalam memperbesar skala kerusakan. Namun, dalam pemeriksaan dampak gempa bumi di Kota Palu dan Kabupaten Donggala (Gambar 1), Tim Tanggap Darurat Badan Geologi (TTD-BG) menemukan adanya variasi dampak guncangan gempa di lokasi yang memiliki jarak relatif sama dari sumber kejadian gempa bumi.

Perbedaan dampak gempa bumi ini salah satunya dikontrol oleh aspek geologi lokal, yang dalam kondisi tertentu dapat memberikan guncangan yang lebih besar dibandingkan tempat lain di sekitarnya. Upaya untuk memahami penguatan guncangan gempa bumi sebagai akibat dari keberadaan geologi lokal kami lakukan dengan melakukan perbandingan hasil pemodelan bahaya gempa bumi deterministik pada batuan dasar dan pada batuan di permukaan dengan menggunakan pendekatan geomorfologi.



Gambar 1. Peta lokasi gempa bumi Palu-Donggala 28 September 2018. Simbol bintang menunjukkan lokasi episenter gempa dari GFZ. Kotak hitam menunjukkan lokasi pemodelan analisis bahaya gempa bumi deterministik Palu-Donggala, sementara kotak biru menunjukkan lokasi Kota Palu.

## Implikasi Geologi Lokal terhadap Guncangan Gempabumi

Dalam pemodelan bahaya gempabumi kondisi geologi lokal yang dapat sangat berpengaruh terhadap *ground motion* (guncangan tanah) dibagi ke dalam dua terminologi yaitu kondisi geologi permukaan yang diwakili oleh nilai kecepatan geser rata-rata hingga kedalaman 30 m (Gambar 2a) dan total ketebalan sedimen di atas batuan dasar atau kedalaman cekungan (Gambar 2b). Kondisi geologi permukaan sangat berpengaruh terhadap gelombang gempabumi berfrekuensi tinggi (periode pendek) sedangkan kedalaman cekungan sangat mempengaruhi gelombang gempabumi berfrekuensi rendah (periode panjang).

Sedimen permukaan yang belum terkonsolidasi (tanah, lapukan batuan, aluvium), yang secara kolektif disebut *regolith* dapat memperkuat (amplifikasi) guncangan tanah yang dialami selama gempabumi. Oleh karena itu, memasukkan aspek *regolith* ke dalam perhitungan estimasi guncangan gempabumi merupakan komponen penting dari setiap analisis bahaya seismik (D. Robinson dkk, “*Practical Probabilistic Seismic Risk Analysis: A Demonstration of Capability*”, 2006).

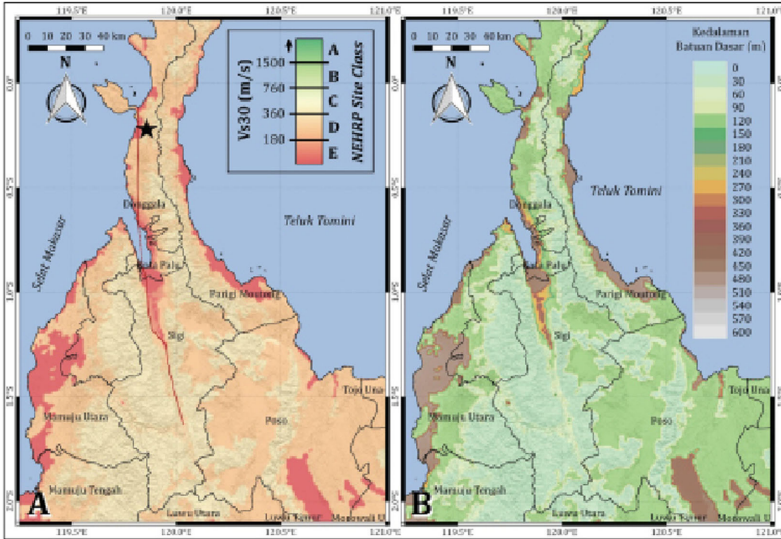
Dari teori propagasi gelombang elastis ada penjelasan bahwa amplitudo gerakan tanah di permukaan dipengaruhi oleh kepadatan dan kecepatan gelombang geser dari media dekat permukaan (i.e. Aki dan Richards, 1980). Karena kepadatan bergantung pada kedalaman, amplifikasi gelombang seismik akan ditentukan oleh kecepatan gelombang geser dekat permukaan. Metode yang biasanya digunakan untuk menyertakan amplifikasi situs adalah nilai kecepatan geser rata-rata hingga kedalaman 30 m ( $V_s^{30}$ ).

Banyak metode yang dapat digunakan untuk menentukan

nilai  $V_s^{30}$ , baik melalui pengukuran geofisika maupun secara empiris seperti yang dilakukan antara lain oleh K.M. Wakamatsu dan kawan-kawan (“*GIS-Based Nationwide Hazard Zoning Using The Japan Engineering Geomorphologic Classification Map*”, 2006), Wald dan Allen (2007) serta Allen dan Wald (2008). Baik Wald dan Allen (*Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ( $V_s^{30}$ ) and Amplification Around the Globe*, 2007) maupun D.J. Wald dan T.I. Allen (2008) menggunakan kemiringan lereng (*slope-topography*) sebagai proksi dalam pendugaan nilai  $V_s^{30}$ . Wald dan Allen (2007) menggunakan data *Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM 30)*, sedangkan Allen dan Wald (2008) menggunakan DEM resolusi tinggi dari *SGS EROS Data Center’s National Map Seamless Server*.

Di sisi lain pendekatan geomorfologi dari Matsuoka dan kawan-kawan (2006) mendasarkan pendugaan  $V_s^{30}$  berdasarkan informasi geologi (jenis dan umur batuan, ketebalan sedimen permukaan) dan topografi (ketinggian dan kemiringan lereng). Informasi geologi dan topografi diolah untuk menghasilkan kelas geomorfologi yang akan digunakan sebagai proksi perhitungan  $V_s^{30}$  secara empiris. Dalam tulisan ini, nilai,  $V_s^{30}$  yang diperoleh dengan metode Matsuoka dan kawan-kawan (2006) digunakan dalam pemodelan gempabumi karena akurasinya lebih tinggi daripada pendekatan *slope-topography*, terutama pada batuan/tanah kelas C (batuan lunak/tanah sangat padat), D (tanah padat) dan E (tanah lunak) yang merupakan penyusun utama Kota Palu (A. Cipta dkk, “*A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia*”, 2016).

Amplifikasi yang disebabkan oleh adanya akumulasi sedimen di atas batuan dasar disebut *basin resonance* (resonansi cekungan). Paleotopografi batuan dasar menyebabkan total



Gambar 2. (A). Peta kecepatan geser rata-rata hingga kedalaman 30 m ( $V_{s30}$ ) di wilayah Provinsi Sulawesi Tengah dan sekitarnya (Cipta & Solikhin, 2011; Cipta dkk, 2016). Garis merah adalah lokasi garis sesar yang digunakan dalam pemodelan bahaya gempa deterministik, sedangkan tanda bintang adalah lokasi episenter gempa bumi. (B). Peta kedalaman batuan dasar di wilayah Provinsi Sulawesi Tengah dan sekitarnya.

ketebalan sedimen yang terakumulasi di atas batuan dasar dapat sangat berbeda dari satu titik ke titik lainnya. Ketebalan sedimen atau kedalaman cekungan berfungsi sebagai penyaring yang akan meneruskan dan mengamplifikasi gelombang gempabumi dengan frekuensi tertentu. Cekungan yang lebih dalam akan mengamplifikasi gelombang gempabumi yang lebih panjang yang pada akhirnya sangat berpengaruh terhadap gedung yang dibangun di atas cekungan tersebut.

Di lain pihak, geometri cekungan tertentu dapat memerangkap gelombang gempabumi sehingga durasi guncangan di cekungan menjadi jauh lebih lama (A. Cipta dkk,

“*Basin resonance and seismic hazard in Jakarta, Indonesia*,” 2018). Amplifikasi dan durasi guncangan dapat memperburuk dampak terhadap bangunan di permukaan.

## Membuat Model Besarnya Guncangan

Pemodelan bahaya gempabumi deterministik dilakukan untuk menghitung estimasi besarnya guncangan di daerah Palu dan Donggala baik di batuan dasar maupun di permukaan tanah. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *OpenQuake*. *OpenQuake* adalah perangkat lunak GEM (*Global Earthquake Model Foundation*) yang canggih, tidak berbayar, bersumber terbuka, dan dapat diakses secara kolaboratif yang dikembangkan untuk bahaya gempabumi dan pemodelan risiko. Kode sumber untuk perangkat lunak *OpenQuake Engine* ini tersedia secara terbuka dari repositori publik [www.github.com/gem](http://www.github.com/gem) sebagai tempat pengembangan kode pemrograman secara langsung.

Parameter gempabumi yang digunakan dalam pemodelan ini merujuk pada data dari *GFZ German Research Centre For Geosciences*, yang merupakan pusat riset nasional Jerman. Parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini, yang diunduh dari <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2018tabt>.

Tabel 1. Parameter gempabumi Palu - Donggala 28 September 2018 (Sumber: GFZ)

Lon	Lat	Magnitude	Depth	Strike	Dip	Rake
119.86	-0.22	7.5	10	351	76	-11

Geometri garis sesar gempabumi Palu - Donggala

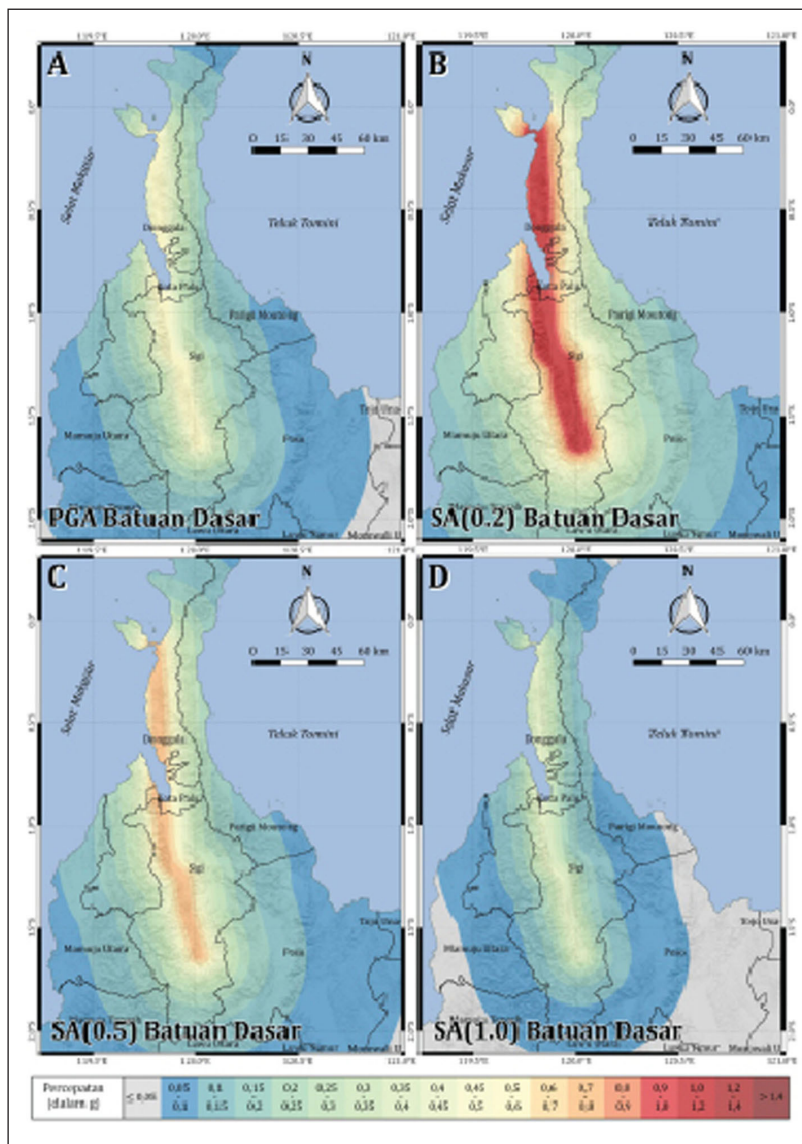


berdasarkan *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017* (PuSGeN) yang dimodifikasi oleh TTD-BG berdasarkan posisi episenter dan hasil pemeriksaan di lapangan (Gambar 1). Besarnya guncangan gempabumi dihitung menggunakan tiga persamaan atenuasi, yaitu: Boore dkk (2014), Campbell & Bozorgnia (2014) serta Chiou & Youngs (2014) dengan bobot masing masing 1/3. Penggunaan tiga persamaan atenuasi ini ditujukan untuk mengatasi ketidakpastian epistemik yang muncul karena belum adanya persamaan atenuasi yang diturunkan berdasarkan data guncangan gempabumi di Indonesia.

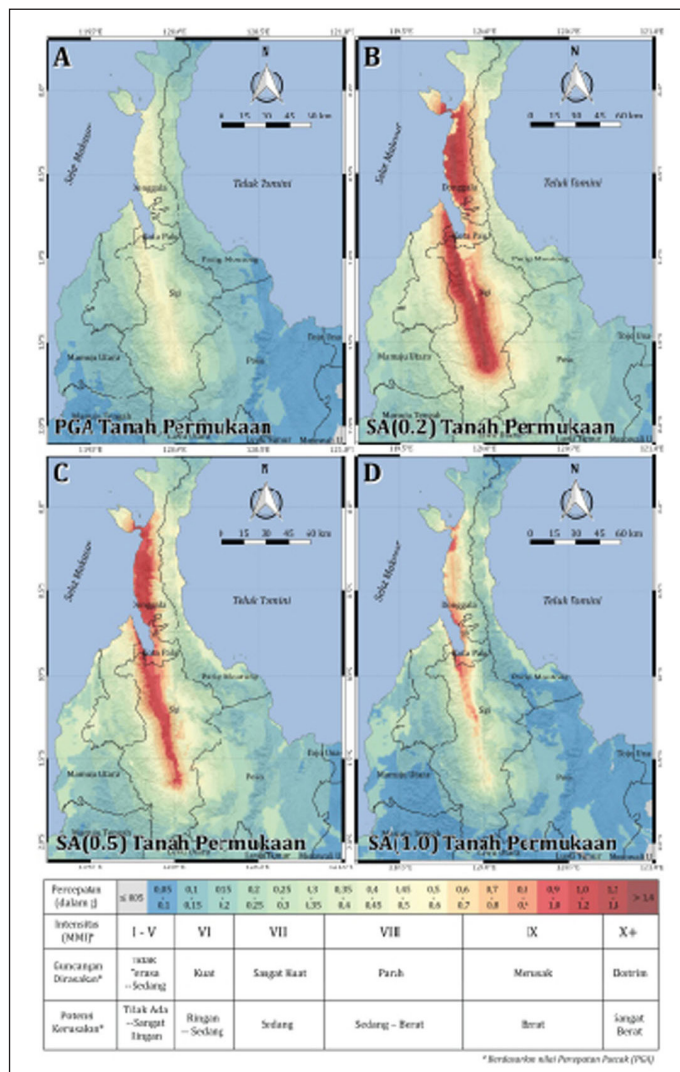
## **Dari Tanah Puncak ke Spektra**

Hasil pemodelan guncangan gempabumi Palu-Donggala M7.5 di batuan dasar dapat dilihat pada gambar 3, terdiri dari peta percepatan tanah puncak (*peak ground acceleration - PGA*), percepatan spektra (*spectral acceleration*) pada periode 0,2 detik (SA0.2), 0,5 detik (SA0.5) dan 1 detik (SA1.0). PGA disebut juga percepatan spektra pada periode 0 detik menggambarkan percepatan tanah pada permukaan tanah sedangkan SA0.2, SA0.5 dan SA1.0 menggambarkan percepatan guncangan gempabumi yang dialami oleh bangunan dengan tinggi dua, lima dan sepuluh lantai.

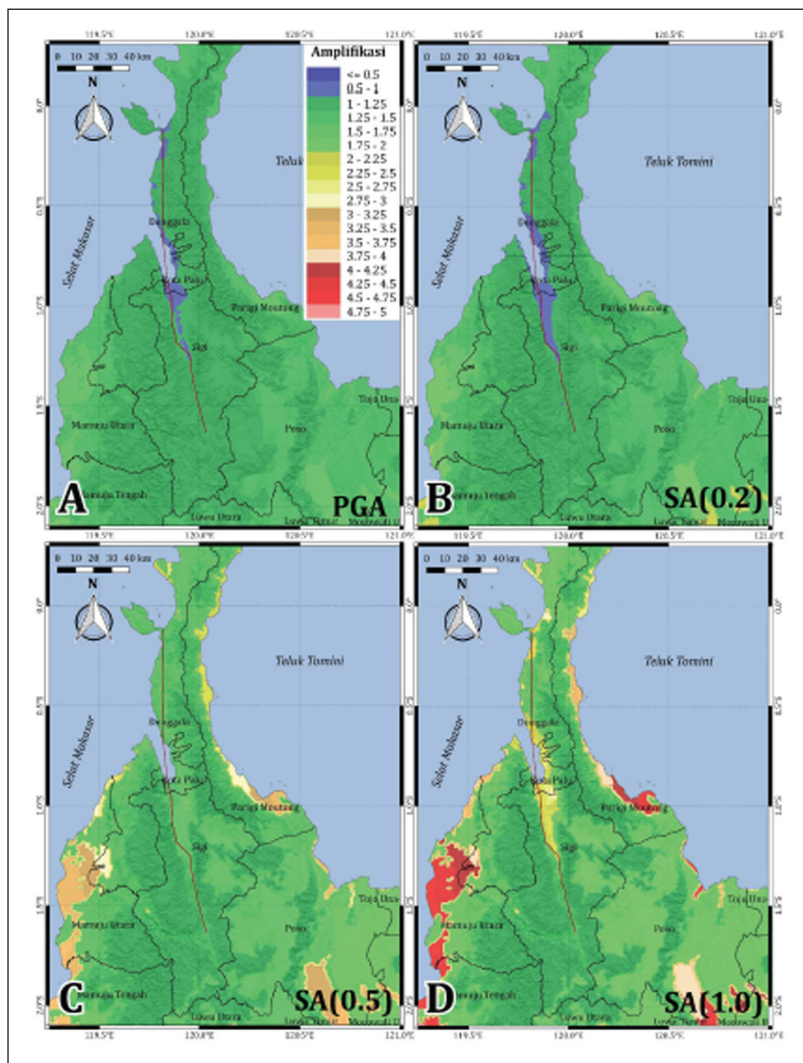
Pemodelan pada batuan dasar (gambar 3) baik untuk percepatan tanah puncak (PGA) maupun percepatan spektra (SA0.2, SA0.5 dan SA1.0) memperlihatkan bahwa guncangan paling tinggi terdapat di daerah yang paling berdekatan dengan garis sesar, sedangkan untuk daerah yang terletak lebih jauh dari garis sesar, besarnya guncangan terus menurun seiring dengan bertambahnya jarak. Percepatan tanah puncak (PGA) di sekitar garis sesar memiliki nilai percepatan 0,4 - 0,45 g



Gambar 3. Hasil pemodelan gempa bumi Palu-Donggala 28 September 2018. Peta percepatan tanah puncak (PGA) di batuan dasar (A), serta peta percepatan spektra 0,2 detik (B), 0,5 detik (C) dan 1,0 detik (D).



Gambar 4. Hasil pemodelan gempa bumi Palu-Donggala 28 September 2018 di tanah permukaan (atas). Peta percepatan tanah puncak (PGA) di tanah permukaan (A), serta peta SA0.2 (B), SA0.5 (C) dan SA1.0 (D). Tabel di bawahnya menunjukkan hubungan percepatan dengan intensitas serta guncangan yang dirasakan dan potensi kerusakan berdasarkan nilai PGA.



Gambar 5. Peta amplifikasi atau perbandingan nilai percepatan di tanah permukaan dengan percepatan di batuan dasar untuk PGA (A), SA0.2 (B), SA0.5 (C) dan SA1.0 (D).

(gambar 3A) dan terus mengecil seiring bertambahnya jarak. Sementara itu, nilai percepatan spektra 0,2 detik (SA0.2) pada gambar 3B menunjukkan nilai yang sangat tinggi, mencapai 1,0 - 1,2 g. Selain memiliki nilai guncangan maksimum yang lebih tinggi, luas area yang mengalami guncangan percepatan spektra 0,2 detik juga lebih luas. Besarnya guncangan pada percepatan spektra 0,5 detik (gambar 3C) mencapai nilai maksimum antara 0,7 - 0,8 g, sedangkan besar guncangan maksimal pada percepatan spektra 1,0 detik sebesar 0,35 - 0,4 g (gambar 3D).

Pemodelan guncangan pada tanah permukaan untuk gempa bumi Palu-Donggala M7,5 dapat dilihat pada gambar 4. Percepatan tanah puncak (PGA) di sekitar garis sesar memiliki nilai percepatan maksimum sebesar 0,4 - 0,45 g (gambar 4A) dan cenderung terus mengecil seiring bertambahnya jarak, kecuali pada daerah dengan  $V_s^{30}$  sangat rendah. Pada daerah dengan nilai  $V_s^{30}$  kurang dari 180 m/s pada gambar 2A, memiliki guncangan yang lebih besar jika dibandingkan terhadap PGA pada batuan dasar. Gambar 5 memperlihatkan peta amplifikasi berdasarkan rasio nilai percepatan di tanah permukaan dengan percepatan di batuan dasar. Percepatan gempa bumi mayoritas mengalami amplifikasi sebesar satu hingga dua kali.

Nilai SA0.2 di tanah permukaan pada gambar 4B menunjukkan nilai yang sangat tinggi, mencapai 1,2 - 1,4 g. Guncangan ini lebih besar jika dibandingkan dengan guncangan pada batuan dasar. Selain memiliki nilai guncangan maksimum yang lebih tinggi, luas area yang mengalami guncangan SA0.2 juga menjadi lebih luas. Hasil yang serupa teramati juga pada SA0.5 (gambar 4C) yang mencapai nilai maksimum antara 1,0 - 1,2 g dan guncangan maksimal pada SA1.0 sebesar 0,9 - 1,0 g (gambar 4D).

Perbandingan hasil pemodelan pada percepatan spektra juga menunjukkan hasil yang sangat menarik. Di daerah sekitar Pantai Talise, ada kontras percepatan yang sangat besar antara hasil pemodelan di batuan dasar dan tanah permukaan. Pada SA0.2, di batuan dasar guncangannya sebesar 1,0 - 1,2 g sedangkan pada tanah permukaan sebesar 0,6 - 0,7 g. Hal ini menunjukkan bahwa deamplifikasi atau pelemahan guncangan pun dapat terjadi. Berdasarkan pemodelan ini, deamplifikasi hanya terjadi pada PGA dan SA0.2 dan pada daerah dengan jarak kurang dari 10 km dari sesar penyebab gempa bumi (Gambar 5). Deamplifikasi PGA terjadi di daerah dengan  $V_s^{30} < 240$  m/s dan kedalaman batuan dasar lebih dari 450 meter, sedangkan deamplifikasi SA0.2 terjadi di daerah dengan  $V_s30 < 290$  m/s dan kedalaman batuan dasar  $> 240$  meter.

Sementara itu perbandingan SA1.0 di batuan dasar dan tanah permukaan di sekitar Pantai Talise menunjukkan hasil yang berbanding terbalik dengan perbandingan pada percepatan spektra 0,2 detik. Pada batuan dasar, diperoleh guncangan pada percepatan spektra 1,0 detik sebesar 0,35 - 0,4 g sedangkan pada tanah permukaan sebesar 0,8 - 0,9 g. Hal ini menunjukkan amplifikasi atau penguatan guncangan gempa bumi sekitar 2,5 kali lipat.

Dengan demikian, hasil analisis di atas menyatakan bahwa guncangan yang diakibatkan oleh gempa bumi Palu-Donggala M7.5 pada 28 September memiliki nilai maksimum yang besar. Hal ini dibuktikan oleh parahnya kerusakan bangunan dan struktur yang ada di wilayah Palu-Donggala secara umum. Hasil kajian ini memperlihatkan bahwa aspek *regolith* atau geologi lokal di dalam analisis bahaya seismik mempunyai peran penting dan memberikan perbedaan yang signifikan antara nilai percepatan di batuan dasar dan di permukaan. Tingkat bahaya meningkat di banyak tempat tergantung pada

aspek geomorfologi daerah tersebut. Daerah yang memiliki nilai rata-rata kecepatan geser hingga 30 m ( $V_s^{30}$ ) yang rendah akan memiliki guncangan yang lebih besar dibandingkan daerah yang memiliki  $V_s^{30}$  yang lebih tinggi. Hasil studi ini juga memperlihatkan bahwa Kota Palu lebih rentan terhadap gelombang gempabumi perioda panjang kecuali di sepanjang sesar.

Analisis percepatan respon spektra juga menunjukkan bahwa amplifikasi dan deamplifikasi dapat terjadi sebagai konsekuensi dari adanya variasi sifat fisis tanah atau batuan permukaan dan ketebalan sedimen. Dari hasil pemodelan dapat disimpulkan bahwa deamplifikasi terjadi pada PGA dan SA0.2 di daerah dengan jarak kurang dari 10 km dari sesar penyebab gempabumi. Deamplifikasi PGA terjadi di daerah dengan  $V_s^{30} < 240$  m/s dan kedalaman batuan dasar lebih dari 450 meter, sedangkan deamplifikasi SA0.2 terjadi di daerah dengan  $V_s^{30} < 290$  m/s dan kedalaman batuan dasar  $> 240$  meter.

*\* Amalfi Omang, Akhmad Solikhin,  
Supartoyo, Pandu Adi Minarno,  
Athanasius Cipta, Fadlianto Nurfalih  
bekerja di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi  
dan Rustan Efendi di Fakultas Matematika dan  
Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tadulako*

# Mengukur Mikrotremor Balara dan Sekitarnya

Oleh

**Athanasius Cipta, Amalfi Omang,  
Akhmad Solikhin, Pandu A. Minarno,  
Supartoyo, Fadli N. Falah,  
dan Rustan Efendi**



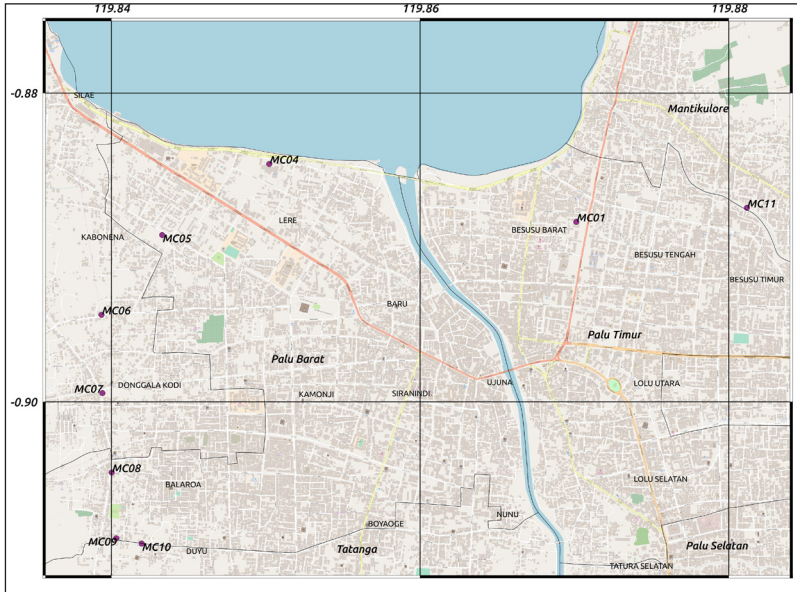
*“Likuifaksi yang terjadi di Balaroa diakibatkan lapisan batuan yang sangat jenuh air mendapat guncangan sangat hebat karena lokasinya berada sangat dekat dengan sesar penyebab gempa bumi”.*

Tim Tanggap Darurat Badan Geologi (TTD-BG) melakukan pengukuran mikrotremor di beberapa lokasi yang mengalami kerusakan berat (Hotel Mercure MC04), likuifaksi (Balaroa MC08-MC10) serta lokasi yang tidak mengalami kerusakan (MC05-MC07, MC01-MC03). Kondisi tanah bawah permukaan hasil interpretasi mikrotremor akan dibandingkan dengan kondisi bawah permukaan daerah yang mengalami kerusakan berat dan likuifaksi untuk mendalami kondisi bawah permukaan yang menyebabkan kerusakan berat bangunan dan likuifaksi.

Pengambilan data mikrotremor dilakukan selama minimal 1 jam di setiap titik ukur. Data hasil pengukuran diolah dengan perangkat lunak *geopsy* untuk mendapatkan kurva eliptisitas (kurva HVSR). Periode/frekuensi dominan ( $T_0/f_0$ ) dan amplitudo puncak ( $A_0$ ) yang secara kasar menggambarkan ketebalan sedimen lunak dan besarnya kontras impedans antar lapisan dapat dilihat dari kurva HVSR.

Selain analisis  $f_0$  dan  $A_0$ , inversi kurva HVSR juga dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang kompresi ( $V_p$ ), kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dan rasio  $V_p/V_s$ .  $V_p$ ,  $V_s$  dan  $V_p/V_s$  akan digunakan untuk analisis ketebalan sedimen di atas batuan dasar dan kerentanan suatu daerah terhadap gempa bumi.

Seismometer yang dipasang di kantor Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sulawesi Tengah (MC01)



Gambar 1. Peta lokasi pengukuran mikrotremor di kota Palu, baik di lokasi yang mengalami kerusakan berat (MC04-Hotel Mercure), likuifaksi (MC08-MC10-Balaroa), maupun lokasi yang mengalami kerusakan minimal atau tidak mengalami kerusakan (MC05-MC07, MC11).

berhasil merekam 6 kejadian gempa. Baik gempa pertama dan gempa kedua menunjukkan  $f_0$  sekitar 1 Hz ( $A_0 = 3-4$ ), demikian pula  $f_0$  yang didapatkan dari pengukuran mikrotremor menunjukkan nilai yang sama namun dengan  $A_0$  yang sedikit lebih besar (4,7). Hal ini menunjukkan bahwa baik sinyal gempa bumi maupun mikrotremor menunjukkan adanya kontras impedans – kontras densitas antara lapisan batuan yang lebih keras dengan lapisan batuan yang lebih lunak di atasnya – pada kedalaman yang sama.

Secara garis-besar kurva HVSR menunjukkan bahwa gelombang seismik dengan frekuensi 1 Hz berpotensi

mengalami amplifikasi (penguatan) pada saat memasuki sedimen lunak di dalam Cekungan Palu di lokasi MC01. Nilai  $f_0$  pada batuan yang lebih keras lebih besar daripada  $f_0$  pada batuan lunak. Kemudian,  $A_0$  berkaitan dengan besarnya penguatan gelombang seismik (Nakamura, “*A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*”, 1989).

## **Analisis Frekuensi dan Amplitudo Mikrotremor**

*Peak frequency* (frekuensi puncak,  $f_n$ , yaitu frekuensi pada saat kurva HVSr membentuk puncak) menunjukkan keberadaan batas antara dua lapisan yang berbeda densitas. Banyaknya frekuensi puncak ( $f_n$  dengan  $n=0, 1, 2, \dots$ ) menunjukkan banyaknya batas lapisan yang dapat dikenali dari pengolahan data mikrotremor. Suatu kurva HVSr dianggap memiliki puncak sebenarnya jika *peak amplitude*  $A_n$  lebih besar dari 2 (Uebayashi, “*Extrapolation of Irregular Subsurface Structures Using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Long-Period Microtremors*”, 2003).  $A_n$  didefinisikan sebagai amplitudo pada  $f_n$ , sehingga  $A_n$  dan  $f_n$  disebut amplitudo dan frekuensi dominan pada  $n=0$ .

Gambar 2 menunjukkan potongan melintang berarah utara selatan mulai dari titik MC04 (Hotel Mercure), MC05 (Kabonena), MC06 (Kabonena), MC07 (Donggala Kodi) hingga Balaroa (MC08 dan MC09). Lokasi mega-likufaksi Balaroa berada di antara MC08 dan MC09. Dari MC05 hingga MC08 terlihat adanya frekuensi puncak ketiga  $f_2$  pada 6-8 Hz, namun di MC 09,  $f_2$  berada pada frekuensi yang lebih rendah,

yaitu pada 3 Hz.

Perubahan secara drastis ini mengindikasikan perubahan secara tegas antara lapisan batuan teratas teratas dengan batuan di bawahnya. Perubahan kedalaman batas lapisan ini dapat mengindikasikan adanya struktur geologi (Tarabusi dan Caputo, “*The use of HVSR measurements for investigating buried tectonic structures: the Mirandola anticline, Northern Italy, as a case study*”, 2016). Di titik MC09 dijumpai satu seri pergeseran permukaan (*surface rupture*) dengan besar pergeseran antara 0.30-1.20 m. Adanya pergeseran permukaan ini mengindikasikan keberadaan sesar penyebab Gempa Palu. Dengan demikian sangat mungkin sesar ini bertanggungjawab terhadap perubahan secara drastis batas lapisan.

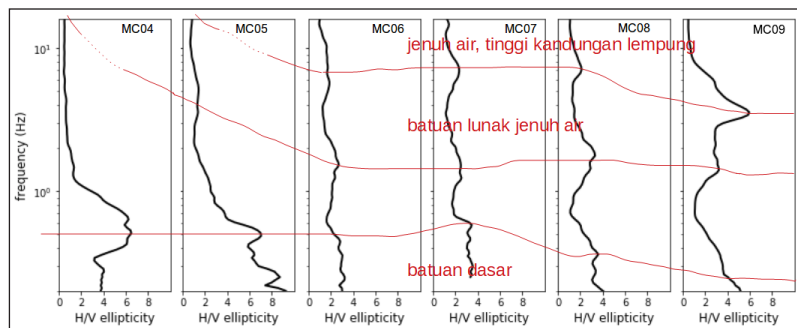
Profil kecepatan yang didapatkan dari inversi kurva HVSR menunjukkan nilai  $V_p/V_s$  yang sangat tinggi ( $>6$ ) pada lapisan dekat permukaan di titik MC08 dan MC08, kemudian di bawah lapisan tersebut terdapat lapisan dengan  $V_p/V_s$  antara 3 hingga 6 (**Gambar 2**). Nilai  $V_p/V_s$  bergantung pada porositas, kandungan lempung dan kejenuhan air (Han dkk, “*Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones*”, 1986), makin tinggi porositas dan kandungan lempung, makin tinggi nilai  $V_p/V_s$ .

Lebih jauh dikatakan bahwa rasio  $V_p$  terhadap  $V_s$  lebih sensitif terhadap perubahan porositas (Castagna dkk, “*Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks*”, 1985; Han dkk, 1986). Nilai  $V_p/V_s$  yang sangat tinggi ( $>6$ ) menunjukkan bahwa lapisan tersebut mengandung lempung yang cukup tinggi dan jenuh air, sedangkan nilai  $V_p/V_s$  antara 3 hingga 6 mengindikasikan lapisan pasir urai yang jenuh air. Lapisan-lapisan jenuh air dekat permukaan ini, yang ditunjukkan oleh anomali  $V_p/V_s$

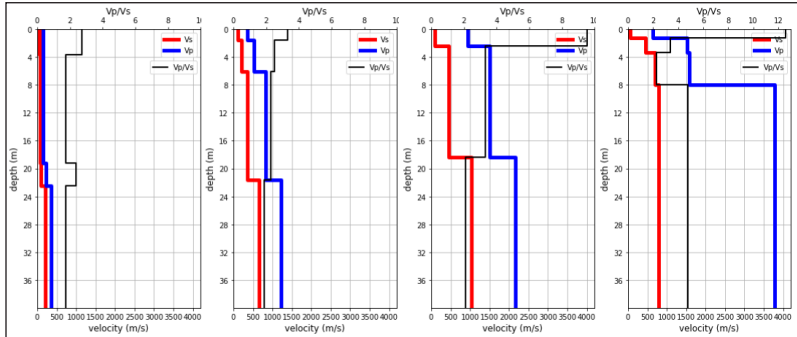
$V_s$  yang sangat tinggi, diduga mengalami likuifaksi ketika terkena guncangan gempa bumi yang cukup kuat (Bailey dkk, “*Implications of  $V_p/V_s$  ratio on shallow P and S reflection correlation and lithology discrimination*”, 2013).

Profil kecepatan di Hotel Mercure MC04 tidak menunjukkan adanya  $V_p/V_s$  yang ekstrem, sampai kedalaman 4 m,  $V_p/V_s$  di titik hampir mencapai 3, menunjukkan saturasi yang tidak terlalu tinggi. Di lain pihak, nilai  $V_s$  titik ini, sampai kedalaman 40 m, cukup rendah, menunjukkan tebalnya sedimen lunak di daerah ini. Kerusakan Hotel Mercure, patut diduga, diakibatkan lemahnya daya dukung tanah terhadap bangunan berkonstruksi berat dengan tinggi 5 lantai. Demikian pula di titik MC07, di bagian atas terdapat lapisan tipis batuan yang jenuh air, kemudian dibawahnya lapisan sedimen lunak hingga kedalaman 20 m, diikuti lapisan sedimen lain yang lebih keras (Gambar 3).

Dari **Gambar 2** dan **3**, dapat ditarik kesimpulan sementara bahwa likuifaksi yang terjadi di Balaroa diakibatkan lapisan batuan yang sangat jenuh air mendapat guncangan sangat



Gambar 2. Kurva HVSR di titik MC04 di utara hingga MC09 di selatan menunjukkan perlapisan yang memiliki kemiringan ke arah Balaroa (MC08 dan MC09) di selatan.



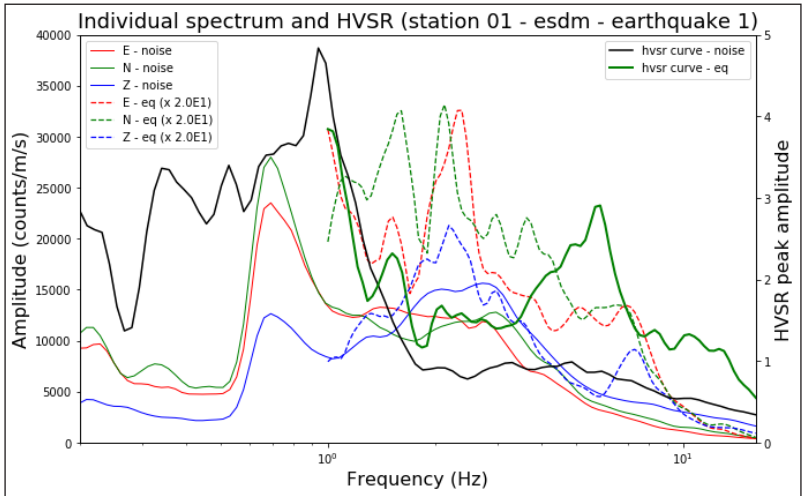
Gambar 3. Profil kecepatan gelombang-P ( $V_p$ ), gelombang-S ( $V_s$ ) dan rasio  $V_p$  terhadap  $V_s$  ( $V_p/V_s$ ) di titik MC04, MC07, MC08 dan MC09.

hebat karena lokasinya berada sangat dekat dengan sesar penyebab gempa bumi.

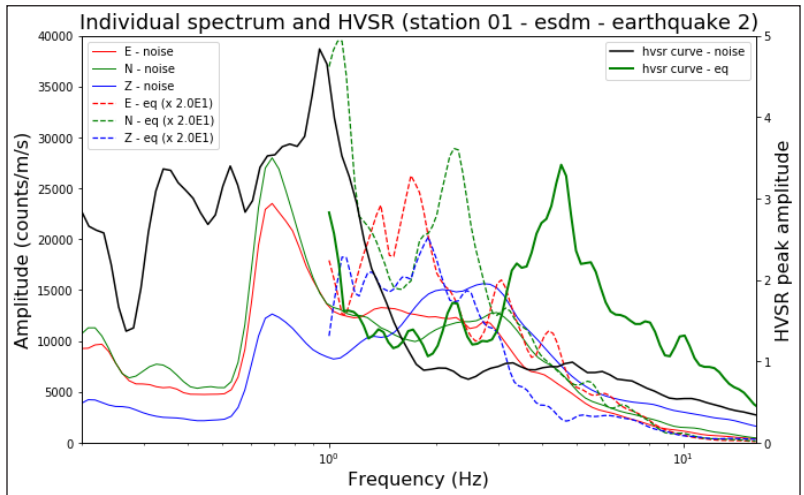
## Analisis Spektrum Gempa Bumi Susulan

Pada masing-masing spektrum gelombang gempa bumi terlihat bahwa eksitasi energi gelombang gempa bumi pada arah horizontal (E dan S) mencapai puncak pada frekuensi sekitar 1 Hz dan 2 Hz (Gambar 4 dan 5). Gelombang seismik dengan frekuensi 1 Hz dan 2 Hz dapat beresonansi dengan bangunan pada frekuensi natural yang hampir sama yaitu bangunan dengan bangunan dengan ketinggian 5 dan 10 lantai (Wiegel, *Earthquake Engineering*, 1970; UBC, *Uniform Building Code*, 1997). Dengan kata lain, guncangan gempa bumi akan dirasakan dengan intensitas lebih tinggi pada bangunan 5 dan 10 lantai daripada bangunan 1-2 lantai seperti kantor dinas ESDM dan bangunan perumahan penduduk pada umumnya.

Kurva HVSr yang diolah dari sinyal gempa bumi memperlihatkan adanya  $f_0$  pada frekuensi sekitar 1 Hz



Gambar 4. Kurva HVSR dan spektrum gelombang pada komponen horizontal dan vertikal yang diperoleh dari sinyal mikrotremor maupun gempa bumi pada tanggal 4 Oktober 2018, pukul 02:30 (UTC).



Gambar 5. Kurva HVSR dan spektrum gelombang pada komponen horizontal dan vertikal yang diperoleh dari sinyal mikrotremor maupun gempa bumi pada tanggal 4 Oktober 2018, pukul 03:18 (UTC).

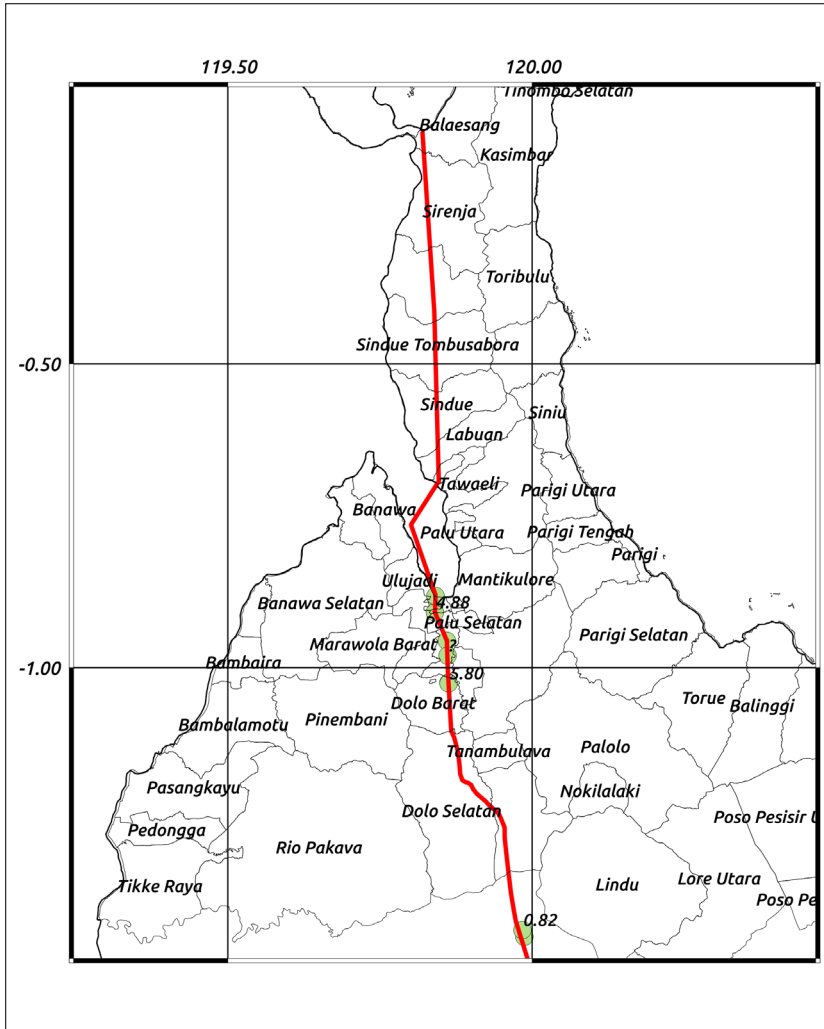
(Gambar 4 dan 5) dan  $f_1$  pada frekuensi sekitar 4 Hz (Gambar 4) hingga 6 Hz (Gambar 5). Kedua *peak frequency*,  $f_0$  dan  $f_1$ , dapat menunjukkan kedalaman batuan dasar dan kontras impedans pada kedalaman dangkal (Cipta dkk, “*Seismic velocity structure of the Jakarta Basin, Indonesia, using trans-dimensional Bayesian inversion of horizontal-to-vertical spectral ratios*”, 2018).

## **Pemodelan Percepatan Gempa Bumi**

Dengan merujuk pada jejak *surface rupture* yang ditemukan oleh TTD-BG dan citra satelit (**Gambar 6**), serta data parameter gempa bumi dari GFZ, dapat disusun skenario pemodelan gempa bumi untuk mendapatkan nilai percepatan gempa bumi. Data lain yang dipakai untuk pemodelan adalah data Vs30 (kecepatan rata-rata gelombang geser pada 30 m teratas lapisan batuan) dan  $Z_{1,0}$  (ketebalan batuan pada saat  $V_s=1000\text{m/s}$ ) untuk menggambarkan model cekungan (Chiou, “*Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra*”, 2014).

Peta Vs30 menunjukkan sifat fisik batuan permukaan suatu daerah, makin besar nilai Vs30, makin keras suatu batuan dan makin tahan terhadap guncangan gempa bumi, dan sebaliknya. Secara umum, daerah dataran yang disusun oleh batuan lunak berumur muda memiliki nilai Vs30 lebih kecil sehingga berpotensi memperbesar dampak gempa bumi. Dalam gambar di bawah ini nampak bahwa kota Palu dan cekungan Kwartir serta daerah tepi pantai cenderung memiliki nilai Vs30 yang rendah. Metode pendugaan nilai Vs30 yang dikembangkan oleh Matsuoka dkk (2006) ini telah digunakan dalam pemodelan bahaya gempa bumi di Sulawesi (Cipta





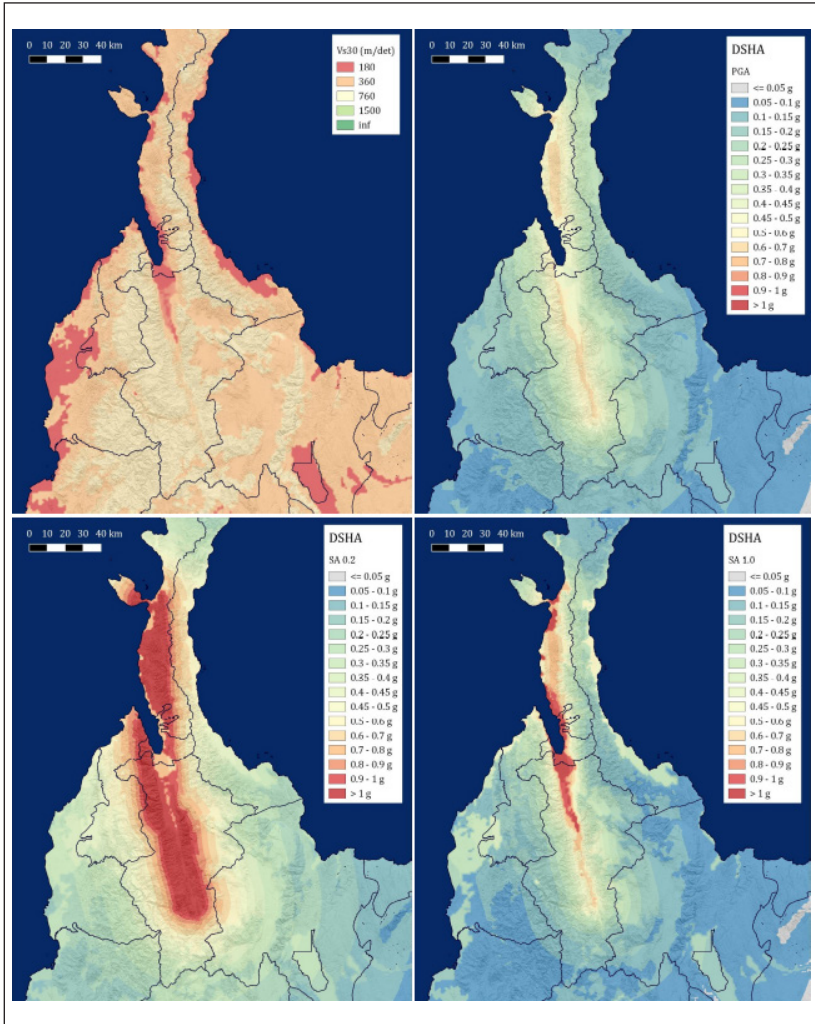
Gambar 6. Peta sesar penyebab Gempa Palu hasil rekonstruksi data pemetaan TTD-BG dan citra satelit. Garis merah tebal menunjukkan jalur sesar pemicu Gempa Palu sedangkan bulatan hijau menunjukkan lokasi ditemukannya surface rupture dengan angka pergeseran yang ditunjukkan oleh angka di sebelah titik hijau.

dan Solikhin, “Pendugaan Kecepatan Gelombang Permukaan (VS30) di Pulau Sulawesi Berdasarkan Klasifikasi Geomorfologi dan Aplikasinya”, 2011; Cipta dkk, “*A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia*”, 2016) dan Papua (Hidayati dkk, “*Earthquake hazard map of Papua, Indonesia*”, 2013).

Dengan menggunakan nilai Vs30 (Gambar 7 kiri atas),  $Z_{1.0}$  sebagai paramter kekerasan batuan dekat permukaan dan kedalaman cekungan (ketebalan sedimen pengisi cekungan) dilakukanlah pemodelan guncangan gempa bumi. Hasil pemodelan, berupa nilai percepatan gempa bumi pada spektra 0 detik (*peak ground acceleration*-PGA), 0,2 detik (SA0.2) dan 1 detik (SA1.0). PGA menggambarkan percepatan tanah pada tanah sedangkan SA2.0 dan SA1.0 menggambarkan percepatan guncangan gempa bumi yang dialami oleh bangunan dengan tinggi 2 dan 10 lantai.

Peta PGA menunjukkan guncangan tanah cenderung lebih besar pada daerah yang dekat dengan sesar sumber gempa bumi, makin jauh dari sesar, makin kecil nilai percepatan. Dengan membandingkan peta SA0.2 dan SA1.0, terlihat bahwa di Kota Palu, kota yang didirikan di atas cekungan sedimen Kuarter, guncangan tanah pada SA0.2 lebih kecil daripada daerah sekelilingnya, sebaliknya pada peta SA1.0, guncangan tanah di Kota Palu lebih besar daripada di daerah sekelilingnya (Gambar 7).

Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah dengan sedimen yang tebal, gelombang gempa bumi frekuensi rendah (periode panjang) dapat mengalami amplifikasi sehingga berpotensi meningkatkan bahaya terhadap bangunan dengan jumlah lantai lebih banyak. Sebaliknya, pada daerah yang disusun oleh lapisan tipis (belasan hingga beberapa puluh meter) batuan



Gambar 7. Peta Vs30 yang menggambarkan kekuatan fisik batuan dekat permukaan (kiri atas), percepatan tanah puncak atau PGA (kanan atas), percepatan spektra 0,2 detik (SA0.2; kiri bawah) dan percepatan spektra 1 detik (SA1.0; kanan bawah).

dengan nilai  $V_{s30}$  rendah, gelombang gempa dengan frekuensi tinggi (periode rendah) akan mengalami amplifikasi sehingga dampak gempa bumi pada bangunan perumahan rakyat (1-2 lantai) dapat menjadi lebih tinggi.

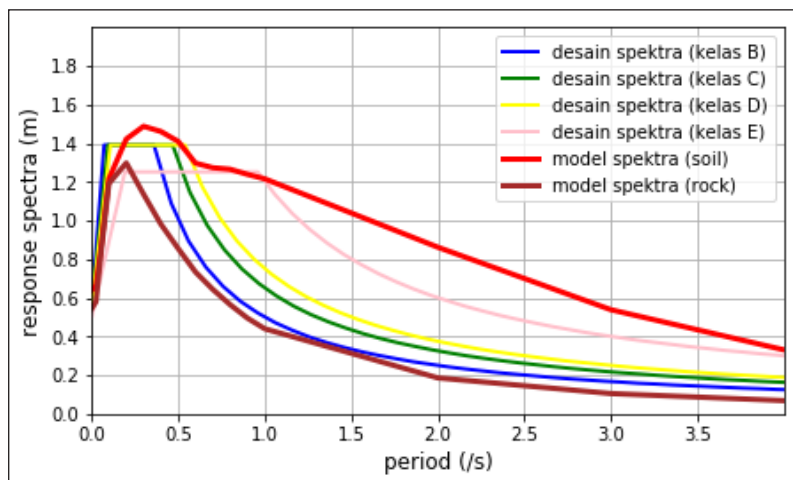
Gambar 8 memperlihatkan model percepatan gempa bumi disandingkan dengan desain respon spektra yang dibuat oleh Kementerian Pekerjaan Umum dengan probabilitas keruntuhan bangunan 1% dalam 50 tahun. Grafik tersebut menunjukkan bahwa percepatan yang dihasilkan oleh Gempa bumi Palu pada 28 September 2018, pada batuan dasar [model spektra (rock)-garis warna coklat pada Gambar 8], lebih rendah daripada yang disyaratkan oleh desain spektra (garis warna biru pada Gambar 8).

Namun, dengan memasukkan parameter kekerasan tanah dekat permukaan, yang diwakili oleh  $V_{s30}$ , dan ketebalan sedimen di atas batuan dasar, diwakili oleh nilai  $Z_{1.0}$  (ketebalan sedimen saat  $V_s=1000\text{m/detik}$ ), nilai percepatan yang dihasilkan dari pemodelan jauh lebih tinggi daripada desain spektra untuk batuan/tanah lunak (kelas E, garis warna merah muda pada Gambar 8). Besarnya nilai percepatan pada tanah tersebut diakibatkan oleh adanya amplifikasi, seperti terlihat pada Gambar 9.

Amplifikasi spektra didefinisikan sebagai percepatan gelombang gempa bumi pada permukaan tanah dibagi percepatan gempa bumi pada batuan dasar. Dengan definisi tersebut, dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 9, grafik tersebut memperlihatkan bahwa pada SA0.2, gelombang gempa bumi mengalami amplifikasi yang sangat kecil sehingga dapat dikatakan bahwa besarnya guncangan tanah pada SA0.2 atau kurang hanya diakibatkan oleh jaraknya yang dekat dengan sumber gempa bumi. Sedangkan pada gelombang gempa bumi

dengan periode antara 0.5 – 1 detik mengalami amplifikasi 2-3 kali dan gelombang gempa bumi dengan periode lebih dari 1 detik mengalami amplifikasi 3-5 kali. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa besarnya guncangan yang diterima oleh Hotel Mercure (gedung 5 lantai) dan hotel Roa-roa (> 10 lantai) sangat dipengaruhi oleh besarnya amplifikasi pada gelombang panjang. Amplifikasi pada gelombang panjang ini sangat dipengaruhi oleh ketebalan lapisan sedimen di bawah Kota Palu.

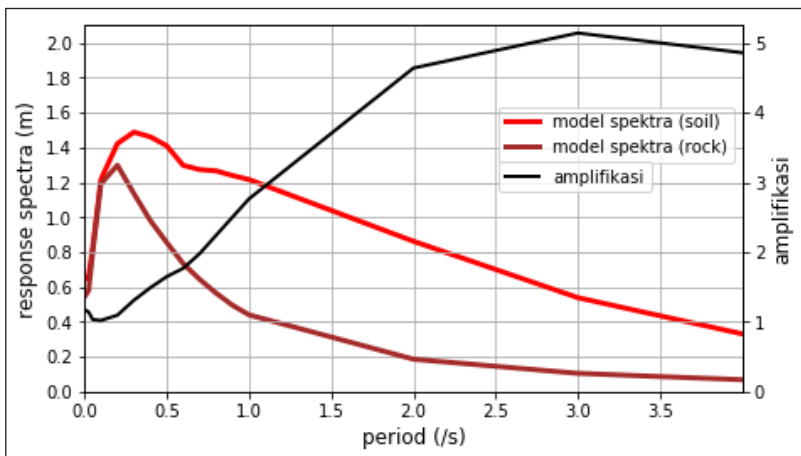
Berdasarkan hasil penyelidikan mikrotremor, dapat diambil beberapa kesimpulan. *Pertama*, di titik pengukuran di Balaroa, nampak adanya frekuensi puncak  $f_1$  dan  $f_2$  pada frekuensi di atas 1-2 Hz dan 3-6 Hz,  $f_2$  menunjukkan ketebalan lapisan yang sangat jenuh air, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. *Kedua*,



Gambar 8. Spektra percepatan hasil pemodelan dibandingkan dengan desain spektra di Kota Palu dengan probabilitas keruntuhan bangunan 1% dalam 50 tahun, yang dibuat oleh Kementerian Pekerjaan Umum dibandingkan dengan respon spektra maksimum hasil pemodelan.

Rasio  $V_p$  terhadap  $V_s$  dapat digunakan untuk mendelineasi daerah rawan likuifaksi, seperti di Balaroa, likuifaksi terjadi pada daerah dengan  $V_p/V_s > 6$  (Gambar 3).

Dengan memperhatikan spektrum gempa bumi susulan (Gambar 4 dan 5), peta percepatan spektra (Gambar 6), grafik respon spektra (Gambar 8) dan grafik amplifikasi spektra (Gambar 9), kesimpulan sementara yang dapat diambil, kecuali untuk Balaroa dan Petobo, adalah sebagai berikut: Kerusakan bangunan perumahan rakyat (1-2 lantai) di Kota Palu diakibatkan besarnya percepatan pada SA0.2 karena letak Kota Palu yang sangat dekat bahkan dilintasi oleh sesar penyebab gempa bumi. Kerusakan parah yang menimpa Hotel Mercure (5 lantai) dan Hotel Roa-Roa (> 10 lantai) diakibatkan besarnya guncangan pada spektra SA0.5 dan SA1.0. Besarnya guncangan pada spektra tersebut sangat dipengaruhi oleh faktor amplifikasi. Besarnya amplifikasi pada SA0.5 (amplifikasi 2 kali) dan SA1.0 atau lebih (amplifikasi 3 kali atau lebih) sangat



**Gambar 9.** Grafik amplifikasi maksimum di Kota Palu hasil pemodelan.

dikontrol oleh endapan tebal sedimen pengisi Cekungan Palu.

*\*Athanasius Cipta, Amalfi Omang,  
Akhmad Solikhin, Pandu A. Minarno,  
Supartoyo, Fadli N. Falah  
bekerja di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana  
Geologi. Rustan Efendi bekerja di Fakultas MIPA,  
Universitas Tadulako, Palu*

# Cekungan Air Tanah Palu

Oleh

**Taat Setiawan, Wawan Hermawan,  
Defrizal, Adrikni Wiria Kusumah M,  
dan Taufiq Wira Buana**



*“Kuantitas dan kualitas air tanah di daerah Kota Palu, Kabupaten Sigi, dan Kabupaten Donggala merentang dari sangat rendah ke tinggi. Dan peristiwa likuifaksi dan gerakan tanah paling parah di Desa Petobo, Balarooa dan lain-lain terjadi pada zona perbatasan antara sistem akuifer bebas dengan sistem akuifer tertekan”.*

Menurut Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2017 tentang Cekungan Air Tanah (CAT) di Indonesia, daerah Palu dan sekitarnya merupakan CAT. Cekungan yang dikenal sebagai CAT Palu ini secara administratif masuk dalam wilayah Kota Palu, Kabupaten Donggala dan Kabupaten Sigi. Batas-batas hidrogeologis CAT Palu dikontrol oleh batas topografi, litologi, dan struktur geologi.

Menurut Zeffitni (“Potensi Air Tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Palu Berdasarkan Satuan Hidromorfologi dan Hidrogeologi”, 2013), geometri akuifer CAT Palu secara vertikal memiliki batas yang terbentuk sebagai akibat dari struktur geologi berupa Graben Palu. Berdasarkan atas hal tersebut maka peranan tektonik dalam pembentukan sistem hidrogeologi di CAT Palu tersebut sangat penting.

Sistem akuifer pada CAT Palu dibentuk oleh tiga kelompok batuan, yaitu endapan aluvium, batuan sedimen klastika, dan batuan padu berumur tua (Pratersier hingga Tersier). Endapan aluvium terutama berada di dataran lembah Sungai Palu, dataran Kamamora di lembah Sungai Gumbasa, dan dataran Walosido di sekitar Danau Lindu. Satuan batuan tersebut tersusun atas lempung, pasir kerikil, dan kerakal dengan ketebalan bervariasi. Hasil pengeboran yang pernah dilakukan menunjukkan ketebalan akuifer dapat mencapai lebih dari 100

m. Batuan tersebut bersifat lepas dan *porous* membentuk tipe akuifer media pori dengan penyebaran luas.

Batuan sedimen klastika tersebar di beberapa tempat, yang terluas berada di lembah Sungai Palu dan lereng perbukitan di sebelah timur Danau Lindu. Kenampakan di lapangan menunjukkan batuan ini tertindih secara tidak selaras oleh endapan aluvium. Litologi penyusunnya berupa batupasir, batulempung, batulanau, konglomerat, dan batuan gunungapi. Secara keseluruhan batuan ini sangat tebal sampai mencapai lebih dari 500 m. Akuifer pada batuan ini memiliki tipe media pori dan secara setempat berupa media rekah dengan kedalaman bervariasi dari 10 hingga 50 m, bahkan di beberapa tempat seperti di lembah Sungai Palu dapat mencapai 150 m.

Batuan padu yang merupakan batuan berumur tua (Pra Tersier hingga Tersier) terdiri atas sekis-ampibol, sekis-mika, gneiss, batusabak, filit, argilit, batugamping, batulanau, serpih, rijang, dan konglomerat. Kompleksnya struktur geologi pada batuan ini mengakibatkan banyaknya sistem rekahan pada batuan yang dapat menyimpan dan dilalui air tanah membentuk tipe akuifer media rekah. Melalui sistem rekahan tersebut juga memudahkan terjadinya peresapan air hujan menjadi air tanah di wilayah perbukitan.

## **Sistem Akuifer dan Pola Aliran Air Tanah**

Daerah Kota Palu dan sekitarnya merupakan bagian dari CAT Palu yang secara geometri memiliki ketebalan akuifer yang cukup tebal. Ketebalan batuan sedimen lepas yang mengisi cekungan air tanah tersebut diperkirakan dapat mencapai lebih dari 150 m. Air tanah di dataran Palu dan sekitarnya terutama memperoleh imbuhan dari air hujan yang jatuh di sekitar daerah tersebut. Sebagian besar imbuhan air tanah tersebut

terbentuk melalui peresapan pada jalur-jalur rekahan dan celahan di kawasan pebukitan selanjutnya mengalir menuju tempat-tempat yang letaknya lebih rendah. Sebagian mengisi sistem akuifer di dataran Palu, Kamarora, dan Walosido serta sebagian lagi muncul sebagai mataair dan rembesan-rembesan di lereng dan kaki pebukitan.

Berdasarkan kondisi hidrogeologinya, ketiga dataran tersebut dapat digolongkan sebagai daerah akumulasi air tanah. Selain memperoleh imbuhan air dari daerah perbukitan, daerah dataran khususnya pada akuifer dangkal juga memperoleh imbuhan dari hujan setempat.

Pemunculan mata air dan rembesan pada umumnya di lereng perbukitan, muncul dari rekah-rekah atau celah-celah batuan padu. Di daerah CAT Palu tercatat paling tidak 83 mataair dengan besaran debit bervariasi. Sekitar 80% dari mataair yang ada memiliki debit antara 1 – 10 l/det, dan hanya sekitar 10% memiliki debit 50 – 100 l/det yaitu pada mataair (Ma) Wera (75 l/det), Ma. mantikole (100 l/det), Ma. Sambo (100 l/det), Ma. Ombi (50l/det), Ma. Pulu (75l/det), Ma. Kinore (50 l/det), dan Ma. Ore (100l/det). Pada musim kemarau, hampir semua mataair tersebut mengalami penyusutan meskipun tidak berarti.

Sistem akuifer pada wilayah CAT Palu terbagi menjadi dua, yaitu sistem akuifer bebas (tidak tertekan) dan sistem akuifer semi tertekan hingga tertekan. Air tanah pada akuifer bebas terdapat sampai kedalaman sekitar 30 m. Kedalaman muka air tanah bebas berkisar antara 2 – 5 m di bawah muka tanah (m bmt), bahkan di beberapa tempat yang rendah kurang dari 2 m bmt, sedangkan di lereng yang agak tinggi kedalamannya lebih dari 10 m bmt. Zeffitni (2013) menyebutkan bahwa fluktuasi muka air tanah bebas atau freatik paling rendah terdapat di

CAT bagian barat yaitu di Kecamatan Dolo Barat 0,48 meter sedangkan yang tertinggi di CAT bagian timur yaitu di Kecamatan Biromaru 0,85 meter. Pola aliran airtanah pada akuifer ini dikontrol oleh bentuk topografi setempat. Secara umum mengalir dari daerah perbukitan menuju ke lembah sungai.

Air tanah pada akuifer yang letaknya lebih dalam dari 30 m pada umumnya bersifat semi tertekan hingga tertekan. Sifat tertekannya air tanah tersebut semakin tinggi ke bagian tengah CAT Palu. Kedudukan muka air tanah tertekan atau pisometrik berkisar antara 8 m bmt hingga 6 m di atas muka tanah (m amt), sehingga pada lokasi tertentu kedudukan pisometrik tersebut lebih tinggi dibanding muka air tanah bebas. Dengan adanya perbedaan tinggi tekanan tersebut menyebabkan kecenderungan terjadinya transfer aliran air tanah ke arah atas, yaitu dari akuifer tertekan menuju akuifer bebas.

Dengan demikian, pengimbuhan air tanah bebas tidak hanya berasal dari peresapan air hujan, tetapi juga dari mekanisme transfer dari akuifer tertekan tersebut. Sifat tertekan pada sistem akuifer di bagian tengah CAT Palu menunjukkan bahwa pada daerah ini air tanah mempunyai kondisi tekanan (*pressure head*) yang tinggi, sehingga air tanah bersifat artesis.

## **Karakteristik Akuifer dan Kualitas Air Tanah**

### **Karakteristik Akuifer**

Zeffitni (2013) menyebutkan bahwa karakteristik akuifer di CAT Palu sangat ditentukan oleh kontrol morfostruktur dan hidromorfologi yang mempunyai pengaruh terhadap sirkulasi air tanah di CAT Palu. S. Ruchiat dan R.D. Boetje (*Survei Potensi Air Tanah Daerah Palu, Sulawesi Tengah*, 1989) serta

Suryaman dan kawan-kawan (*Potensi Air Tanah Cekungan Palu, Sulawesi Tengah*, 1995) menyebutkan bahwa karakteristik akuifer hasil uji pemompaan sumur bor pada endapan aluvium menunjukkan nilai Transmisivitas (T) berkisar 5 - 250 m<sup>2</sup>/hari, konduktivitas hidrolika (K) berkisar 0,5 - 80 m/hari, dan *specific yield* (Sy) 0,02 - 0,30. Pada batuan sedimen klastika menunjukkan nilai Transmisivitas (T) berkisar 10 - 15 m<sup>2</sup>/hari dan konduktivitas hidrolika (K) berkisar 0,5 - 50 m/hari, dan storativitas akuifer (S) diperkirakan sekitar  $6,6 \times 10^{-4}$ .

Berdasarkan analisis jaring-jaring aliran (*flownet*) air tanah, debit aliran air tanah pada sistem akuifer tertekan adalah sekitar 82.192 m<sup>3</sup>/hari atau sekitar 30 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/tahun, sedangkan debit aliran air tanah pada akuifer bebas adalah sekitar 8.220 m<sup>3</sup>/hari atau sekitar 3x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/tahun. Bila debit air tanah dari kedua sistem akuifer tersebut dijumlahkan maka secara keseluruhan air tanah yang mengalir mencapai 33 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/tahun.

## **Kualitas Air Tanah**

Kualitas air tanah bebas secara fisik umumnya jernih, tidak berwarna, tidak berbau, dan tawar. Air tanah sedikit payau hingga payau dijumpai di beberapa tempat di antaranya di daerah pantai sebelah timur Palu. Pengukuran daya hantar listrik (EC) air tanah di daerah pebukitan umumnya kurang dari 250 µS/cm, sedangkan di daerah dataran berkisar antara 250 - 750 µS/cm. Ke arah pantai di daerah Kota palu dan sekitarnya, terjadi kenaikan nilai EC dengan nilai antara 750 - 2250 µS/cm. Untuk keperluan domestik, secara umum air tanah bebas di daerah ini memenuhi baku mutu kualitas air.

Kualitas air tanah tertekan memiliki karakter yang hampir sama dengan akuifer tidak tertekan. Air tanah umumnya

bersifat tawar, jernih, tidak berbau, tidak berasa, daya hantar listrik (EC) berkisar antara 375 hingga 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dan pH berkisar antara 7,9 hingga 8,3. Sifat kimia ion mayor pada contoh air tanah tertekan disajikan pada Tabel-1 berikut.

Tabel-1. Nilai rata-rata ion mayor air tanah

Anion (mg/l)		Kation (mg/l)	
Ca <sup>2+</sup>	9,7 – 89,7	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	161,0 – 356,90
Mg <sup>2+</sup>	3,1 – 23,9	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,0 – 46,80
Na <sup>+</sup>	14,0 – 130,0	Cl <sup>-</sup>	5,80 – 58,0
K <sup>+</sup>	2,0 – 23,0	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,0 – 36,60

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa air tanah tertekan memiliki fasies hidrokimia Ca-HCO<sub>3</sub> yang menunjukkan unsur alkali tanah (Ca<sup>2+</sup>) dan asam lemah (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) merupakan unsur dominan pada air tanah tertekan. Secara fisik dan kimia, air tanah tertekan memiliki kualitas yang lebih baik dibanding dengan air tanah bebas di atasnya, sehingga memenuhi untuk bahan baku air untuk kebutuhan domestik (manusia).

Untuk pertanian (irigasi), air tanah pada sistem akuifer ini juga memiliki bahaya salinitas dan alkalinitas yang rendah, sehingga aman untuk tanaman. Pemanfaatan air tanah untuk irigasi (pertanian) pada sistem akuifer ini telah dimanfaatkan dengan banyaknya pengeboran air tanah oleh P2AT.

## Potensi Air Tanah

Berdasarkan atas kuantitas dan kualitas air tanah, daerah

Kota Palu, Kabupaten Sigi, dan Kabupaten Donggala dibedakan menjadi tiga daerah yaitu Dataran Palu, Dataran Kamamora dan Walosido, serta Dataran Perbukitan.

Dataran Palu secara hidrogeologis memiliki karakter potensi air tanah yang berbeda antara daerah dataran (bagian tengah) dan dataran bagian tepi (barat dan timur). Air tanah pada bagian tengah dataran Palu memiliki potensi air tanah sedang sampai tinggi. Litologi akuifernya berupa endapan aluvium dan batuan klastika memiliki ketebalan sekitar 200 m. Transmisivitas akuifer berkisar antara 5 hingga 250 m<sup>2</sup>/hari. Kedudukan muka air tanah bebas antara 2 hingga 5 m di bawah muka tanah (m bmt), sedangkan akuifer tertekan antara 6 m bmt hingga 8 m di atas muka tanah (m amt).

Pada daerah dataran bagian tepi (barat dan timur), air tanah umumnya terdapat pada akuifer bebas hingga semi tertekan dengan potensi rendah hingga sedang. Litologi akuifer umumnya batuan sedimen dengan transmisivitas antara 20 hingga 200 m<sup>2</sup>/hari. Kedudukan muka air tanah bebas antara 6 hingga 15 m di bawah muka tanah (m bmt), sedangkan akuifer tertekan antara 8 hingga 50 m bmt.

Air tanah pada Dataran Kamamora dan Walosido terutama tersusun atas endapan alluvium dengan potensi rendah hingga sedang. Pada daerah ini terdapat sistem akuifer bebas dan kemungkinan ada sistem akuifer tertekan. Sistem akuifer bebas memiliki kedudukan muka air tanah antara 1 hingga 5 m bmt dengan kualitas air tanah yang baik untuk keperluan air baku.

Sedangkan Daerah perbukitan memiliki potensi air tanah yang terbatas atau sangat rendah. Litologi pada daerah ini bersifat padu sehingga akuifer terbatas pada zona rekahan. Pada daerah lereng bagian bawah memiliki potensi air tanah rendah dan pada banyak tempat terdapat mataair yang muncul

pada rekahan batuan.

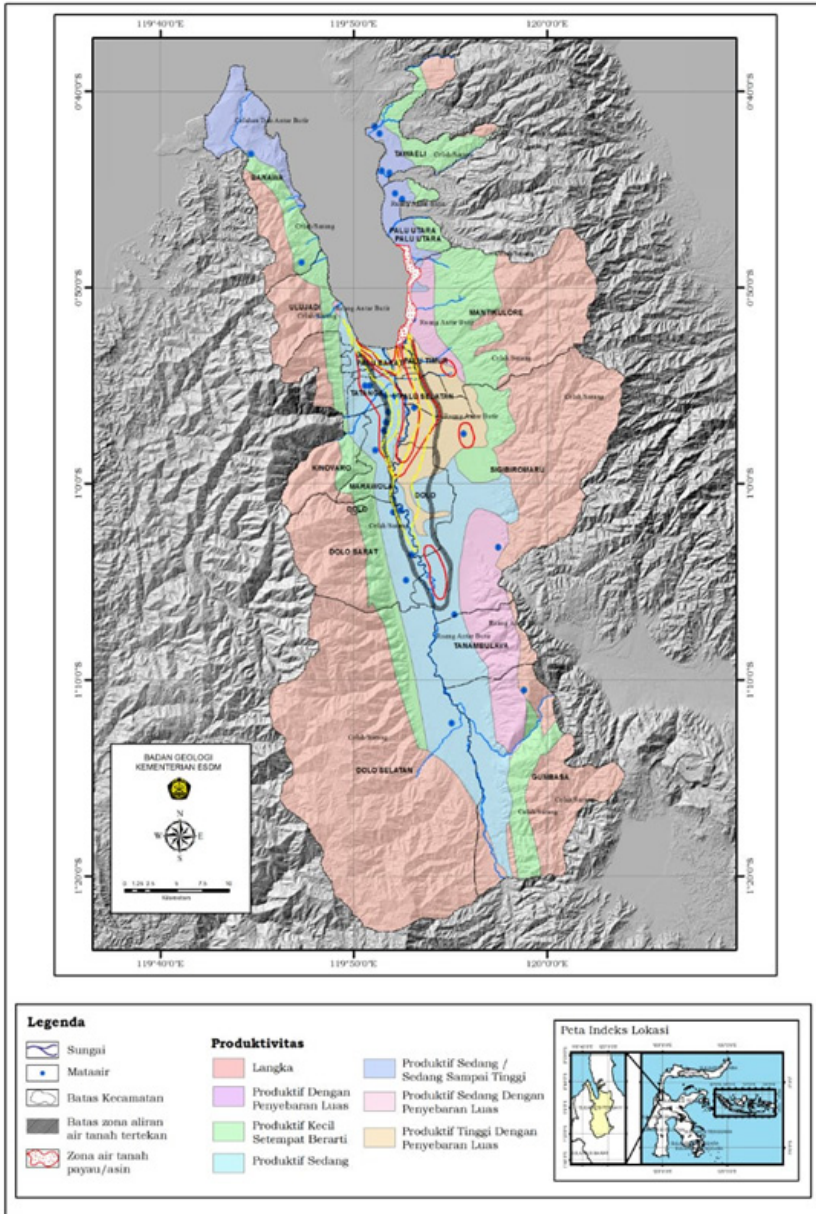
## **Air Tanah dan Likuifaksi**

Gempabumi yang diikuti fenomena tsunami dan likuifaksi pada tanggal 28 September 2018 di Kota Palu, Kabupaten Donggala, dan Kabupaten Sigi telah membawa kerusakan baik material maupun nonmaterial yang sangat banyak. Terjadinya guncangan (*ground oscilation*) menyebabkan terbentuknya retakan-retakan permukaan yang bersamaan dengan proses likuifaksi. Proses tersebut berkaitan dengan tekanan air pori berlebih yang mendorong material pasir dan lanau ke permukaan melalui retakan-retakan permukaan tersebut sehingga kestabilan lereng menjadi kritis.

Apabila dilihat pada peta sistem hidrogeologi dan potensi air tanah CAT Palu dan sekitarnya (*Peta Hidrogeologi Lembar Palu, Sulawesi Tengah, Skala 1:250.000*, S. Arief dan R.S. Hidayat, 1991) maka terlihat bahwa daerah yang mengalami kerusakan likuifaksi dan gerakan tanah yang paling parah seperti di Desa Petobo, Balaroa dan lain-lain berada pada zona perbatasan antara sistem akuifer bebas dengan sistem akuifer tertekan.

Zona tersebut merupakan zona akumulasi air tanah intensif karena air tanah pada zona ini tidak saja mendapat suplai dari aliran air tanah bebas tetapi juga dari aliran air tanah tertekan yang bersifat vertikal ke atas (*pressure head*). Proses akumulasi tersebut mengalami kondisi yang berlebih pada saat kejadian gempabumi yang menyebabkan air tanah pada sistem akuifer tertekan semakin tinggi tekanannya secara tiba-tiba. Besarnya aliran air tanah vertikal dari bagian bawah akuifer disebabkan oleh sistem rekahan yang berkembang pada batuan sebagai media masuknya air tanah.





Gambar 1.. Peta potensi air tanah CAT Palu dan sekitarnya

Selain daerah yang terkena likuifaksi paling parah berada pada daerah batas antara sistem akuifer bebas dengan sistem akuifer tertekan, pola retakan-retakan pada lapisan tanah di permukaan juga memiliki pola yang hampir sama dengan batas zona kedua sistem akuifer tersebut. Hal ini menjadi penting bahwa zona perbatasan kedua sistem akuifer tersebut secara hidrogeologis adalah zona akumulasi air tanah dari aliran yang bersifat lateral (air tanah bebas) yang dikontrol oleh topografi (*elevation head*) dengan aliran air tanah vertikal ke atas yang dikontrol oleh tekanan (*pressure head*). Adanya aliran air irigasi juga memungkinkan menambah akumulasi air tanah pada zona tersebut melalui mekanisme infiltrasi air permukaan menjadi air tanah, terutama di Desa Petobo.

\* Taat Setiawan, Wawan Hermawan,  
Defrizal, Adrikni Wiria Kusumah M,  
Taufiq Wira Buana,  
bekerja di Pusat Air Tanah dan  
Geologi Tata Lingkungan





## **BAHAYA IKUTAN GEMPA BUMI**



# Sebaran Kerusakan Geologi Permukaan

Oleh

**Wawan Hermawan, Dita Arif Yuwana, Eep R. Firdaus,  
Defrizal, Ryan Nur Rahdiana, Taufiq Wira Buana,  
Wardoyo, Selasian Gussyak**

*“Daerah yang mengalami kejadian likuifaksi akibat gempa Donggala 28 September 2018, dapat mengalami kejadian likuifaksi kembali apabila dipicu gempa dengan nilai percepatan gempa ( $g$ ) yang sama atau lebih tinggi”*

Untuk mengetahui tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempabumi Donggala 28 September 2018 sangat penting dilakukannya pemetaan sebaran kerusakan geologi permukaan. Tujuannya untuk mendeliniasi sebaran kerusakan geologi permukaan yang terjadi, serta memperoleh informasi daerah yang masih aman (sedikit terdampak) akibat gempabumi.

Pengamatan sebaran kerusakan geologi permukaan merupakan pemantauan visual terhadap kerusakan yang terjadi akibat gempabumi Donggala tanggal 28 September 2018. Metode seperti ini telah digunakan oleh beberapa peneliti seperti S.H. Bastin dan kawan-kawan (*“Comparison of Liquefaction-induced Land Damage and Geomorphic Variability in Avonside, New Zealand”*, 2015) dan M. E. Jacka dan K.M. Murahidy (*“Observation and characterisation of land damage due to liquefaction and lateral spreading”*, 2011).

Bastin dkk (2015) menggunakan pemetaan langsung di lapangan, interpretasi data lidar dan foto udara untuk memetakan likuifaksi di permukaan yang menyebabkan retakan-retakan *lateral spreading* dan mendeliniasi bentukan *sand boil* akibat gempa dengan magnitudo 6.2 di Christchurch. Jacka dan Murahidy, (2011) melakukan pemetaan kerusakan secara regional, pemetaan kerusakan lokal, dan pemetaan detail untuk keperluan engineering.

Dalam pengamatan sebaran kerusakan geologi permukaan yang dilakukan di Kota Palu, Kabupaten Donggala dan

Kabupaten Sigi menggunakan dua metode yaitu, *desk study* dan Metode pemetaan terukur dengan model grid.

Desk study yang dilakukan meliputi studi literatur dengan menggunakan data sekunder dari berbagai sumber sebagai dasar pengambilan strategi pengambilan data primer di lapangan serta pengamatan dengan menggunakan bantuan citra satelit. Sementara metode pemetaan terukur model grid adalah metode pengambilan data primer dengan grid antara 250 m dan 500 m. Pemetaan terukur model grid 250 m telah dilakukan untuk Kota Palu sedangkan pemetaan terukur model grid 500 m dilakukan untuk Kabupaten Sigi dan Kabupaten Donggala.

Berdasarkan hasil pengamatan visual di lapangan, secara umum kerusakan geologi permukaan yang terjadi akibat gempa Donggala 2018, dapat dikelompokkan sebagai berikut:

*Pertama*, kerusakan akibat retakan tanah permukaan



Gambar 1. Kerusakan akibat *surface rupture*



(*surface rupture*). Kerusakan yang terjadi di sepanjang Sesar Palu Koro bagian barat umumnya mengalami kerusakan di tanah permukaan yang cukup parah sehingga lahan dan bangunan yang berada disekitarnya mengalami kerusakan parah. Kerusakan akibat *surface rupture* ini umumnya mengakibatkan lahan/bangunan retak dan mengalami pergeseran (Gambar 1). Khusus di daerah Balaroa, pergerakan sesar ini diperkirakan memicu gerakan tanah di Balaroa dan membentuk bidang lemah berupa retakan tapal kuda yang memanjang ke selatan hingga daerah Palupi

*Kedua*, kerusakan akibat likuifaksi. Kerusakan ini terjadi setempat-setempat pada suatu daerah, yang diikuti keluarnya pasir ke permukaan (Gambar 2). Fenomena ini terjadi cukup luas dan terkadang menyebabkan kegagalan fondasi. Beberapa bangunan yang terkena dampak likuifaksi mengalami kerusakan berupa retakan, sumur gali menjadi dangkal (terisi pasir).



Gambar 2. Bangunan yang terkena dampak likuifaksi



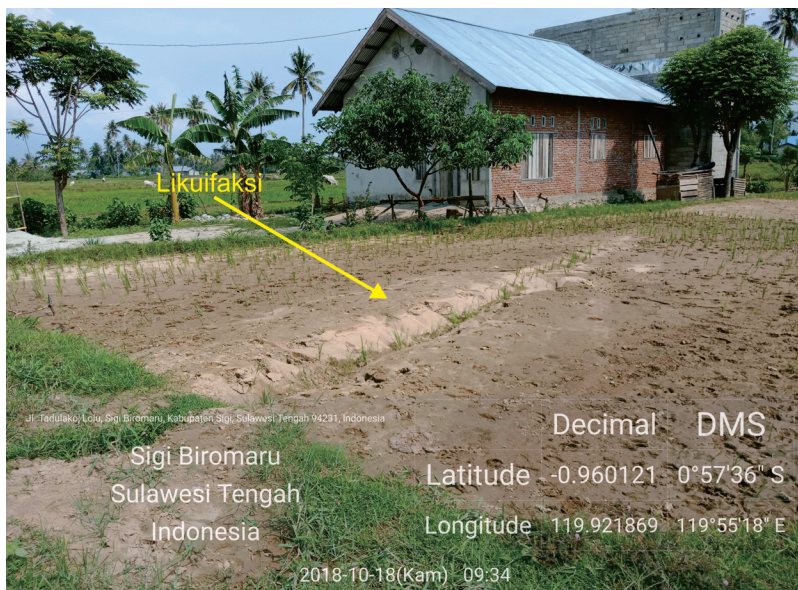
Gambar 3. Kerusakan akibat fenomena *lateral spreading*.

Ketiga, kerusakan akibat fenomena *lateral spreading*. Kerusakan ini memiliki pelamparan yang khas. Pelamparan fenomena ini terutama di sebelah timur Kota Palu hingga Kabupaten Sigi mulai dari sekitar sebelah barat bandara hingga ke arah Kalawara, Kecamatan Gumbasa (sekitar  $\pm$  30 km). Kedudukan mahkota umumnya berada di sekitar tanggul irigasi dengan arah gerakan relatif ke arah barat atau ke arah Sungai Palu. Morfologi relatif landai sampai hampir datar dan pada beberapa tempat terindikasi bentukan pengembungan atau undulasi (Gambar 3).

Selain itu, bentukan tinggian (*horst*) dan rendahan (*graben*) terdapat di beberapa tempat terutama dekat dengan bagian mahkota sekitar tanggul irigasi bahkan dapat mencapai beda tinggi sekitar 1,5 m (Gambar 4) dengan spasi antar retakan dapat mencapai 6 m. Jangkauan kerusakan dapat mencapai 3 km terutama di daerah utara seperti Petobo dan Jonooge sedangkan semakin ke selatan ke arah Kalawar Kecamatan Gumbasa semakin mengecil sekitar 0,5 km.



Gambar 4. Bentukan tinggian (*horst*) dan rendahan (*graben*)



Gambar 5. Daerah yang memiliki tingkat kerusakan geologi permukaan tinggi, karena kehadiran retakan permukaan (*surface rupture*) yang dapat disertai likuifaksi lokal.

## Kriteria Klasifikasi Kerusakan Geologi Permukaan

Kriteria pengelompokan dibuat untuk menggolongkan daerah-daerah yang memiliki tingkat dan jenis kerusakan geologi permukaan yang hampir sama. Klasifikasi ini dibagi menjadi 3 kelompok dengan beberapa kriteria (Tabel 1).

Tabel 1. Klasifikasi Kerusakan Geologi Permukaan

KODE WARNA	Klasifikasi	KRITERIA
KUNING	Sedang	Likuifaksi tidak terjadi Retakan tanah kurang dari 1 cm Penurunan tanah tidak terjadi Pergeseran horisontal tidak terjadi Penggembungan tanah tidak terjadi
ORANGE	Tinggi	Likuifaksi dapat terjadi bersifat lokal/ setempat Retakan tanah kurang dari 5 cm Penurunan tanah kurang dari 10 cm Pergeseran horisontal kurang dari 5 cm Penggembungan tanah permukaan dapat terjadi
MERAH	Sangat Tinggi	Likuifaksi dapat terjadi dengan densitas kerapatan tinggi (lebih dari 25% lokasi pengamatan terjadi likuifaksi) Retakan tanah lebih dari 5 cm Penurunan tanah lebih dari 10 cm Pergeseran horisontal lebih dari 5 cm Penggembungan tanah permukaan dapat terjadi secara luas

Pada daerah yang memiliki tingkat kerusakan geologi permukaan sedang umumnya kerusakan tidak terjadi secara





Gambar 6. Pergeseran dan amblesan tanah akibat likuifaksi

signifikan, tetapi masih dapat dijumpai beberapa retakan. Kerusakan tanah permukaan relatif aman akan tetapi masih dapat bersifat merusak bangunan akibat penguatan gelombang (amplifikasi).

Pada daerah yang memiliki tingkat kerusakan geologi permukaan tinggi, umumnya kerusakan tanah permukaan dapat terjadi karena kehadiran retakan permukaan (*surface rupture*) yang dapat disertai likuifaksi yang bersifat lokal/setempat. Deformasi horisontal dan vertikal kemungkinan dapat terjadi dalam skala yang kecil (Gambar 5).

Pada daerah yang memiliki tingkat kerusakan geologi permukaan sangat tinggi, umumnya kerusakan tanah permukaan dikontrol oleh retakan permukaan (*surface rupture*) yang dapat disertai likuifaksi, deformasi horisontal maupun vertikal dan dapat memicu gerakan tanah pada lereng landai (pada umumnya  $<15\%$ ). Dampak kerusakan tanah pada umumnya berdampak relatif luas. (Gambar 6).

## Sebaran Kerusakan Geologi Permukaan

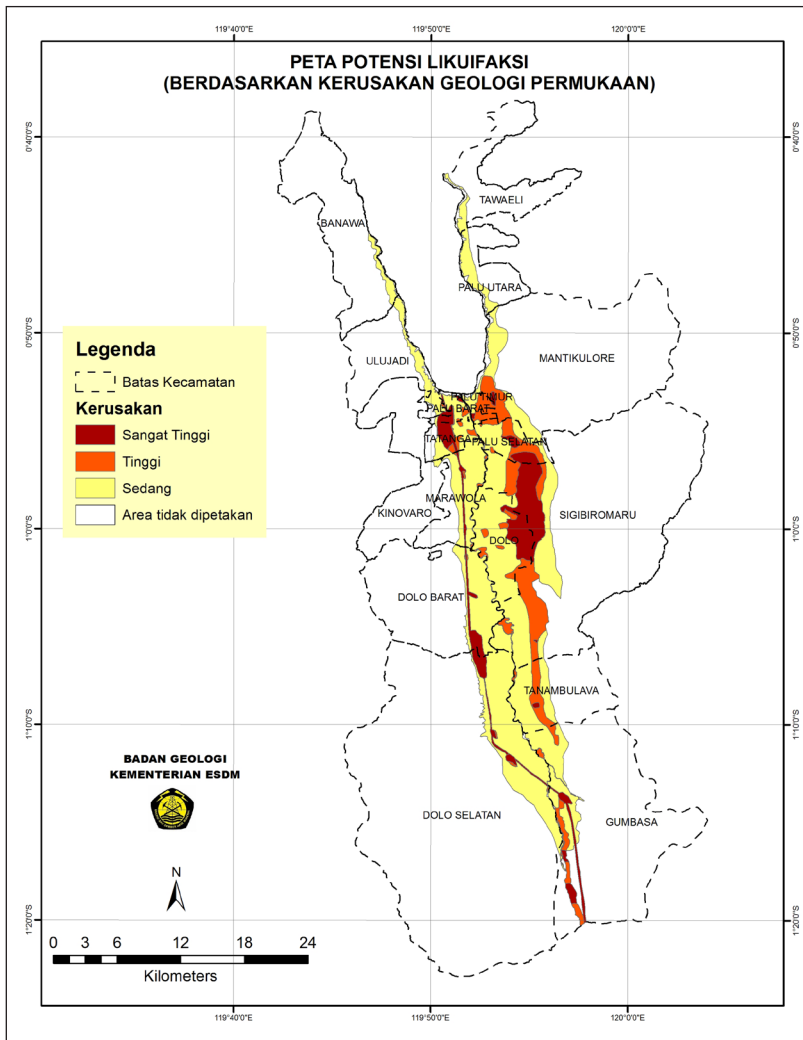
Sebaran kerusakan geologi permukaan akibat gempa Donggala 28 September 2018 disajikan dalam bentuk peta yang memberikan informasi zona tingkat kerusakan yang terjadi hasil pengamatan visual di lapangan serta interpolasi berdasarkan data citra dan penilaian ahli (*judgement expert*) untuk daerah-daerah yang tidak dapat diambil datanya karena keterbatasan akses jalan dan waktu (Gambar 7).

Zona tingkat kerusakan sangat tinggi meliputi daerah yang terjadi *surface rupture* di bagian barat, memanjang dari utara (Palu Barat) hingga selatan (Gumbasa) serta daerah yang terdampak luas akibat likuifaksi seperti daerah Balaroa, Petobo, Jonooge, Sidondo, dan Sibalaya. Selain itu lokasi-lokasi di sekitar daerah terdampak likuifaksi luas seperti daerah selatan Balaroa, daerah Petobo (Palu selatan) hingga bagian selatan Jonooge di sekitar Sigibiromaru dan Dolo.

Zona tingkat kerusakan tinggi meliputi daerah Palu Timur, Palu Selatan, Sigibiromaru, Tanambulava hingga Gumbasa. Umumnya zona ini berada di luar zona tingkat kerusakan sangat tinggi. Pada zona ini masih dijumpai retakan-retakan yang diperkirakan memiliki pola yang memanjang dari Petobo pada zona kerusakan sangat tinggi hingga Gumbasa. Selain itu zona ini terpetakan setempat-setempat pada beberapa daerah seperti daerah Palu Barat, Tatangga, dan Dolo.

Pada zona ini tidak mempertimbangkan kerusakan akibat tsunami. Zona tingkat kerusakan sedang umumnya sangat luas meliputi daerah pedataran-bergelombang di sepanjang Pantai Bawana, Ulujadi, Tawaeli, Palu Utara, Mantikulore, Palu Barat dan Palu Timur. Selain itu daerah pedataran di sekitar sepanjang Sungai Palu meliputi daerah Tatangga, Palu Selatan, Marowala, Dolo, Dolo Barat, Sigibiromaru, Tambulava, Dolo

Selatan hingga Gumbasa.



Gambar 7. Peta Potensi Likuifaksi.

Dengan demikian, daerah yang mengalami kejadian likuifaksi akibat gempa Donggala 28 September 2018 dapat mengalami kejadian likuifaksi kembali apabila dipicu gempa dengan nilai percepatan gempa (g) yang sama atau lebih tinggi. Pada daerah sekitar aliran Sungai Purba memiliki potensi terjadinya likuifaksi, oleh karena itu diperlukan studi potensi likuifaksi di daerah ini.

*\*Wawan Hermawan,  
Dita Arif Yuwana, Eep R. Firdaus,  
Defrizal, Ryan Nur Rahdiana,  
Taufiq Wira Buana,  
Wardoyo, Selasian Gussyak  
bekerja di Pusat Air Tanah  
dan Geologi Tata Lingkungan.*





# Munculnya Pergeseran Tanah Konsisten

Oleh

**Supartoyo, Athanasius Cipta, Amalfi Omang,  
Akhmad Solikhin, Pandu Adiminarno**

*“Gempabumi pada 28 September 2018 mengakibatkan munculnya pergeseran tanah konsisten yang mengindikasikan adanya sesar permukaan.”*

Gempabumi pada 28 September 2018 mengakibatkan bencana di Kabupaten Palu-Donggala-Sigi-Parigi Moutong. Menurut data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) hingga tanggal 20 Oktober 2018 tercatat 2.113 orang meninggal dunia, 1.309 orang hilang, 4.612 orang mengalami luka-luka, dan puluhan ribu bangunan mengalami kerusakan. Kejadian gempabumi tersebut bersumber dari aktivitas Sesar Palu-Koro mengakibatkan goncangan sangat kuat dan terbentuknya pergeseran (*offset*). Pergeseran tersebut teramati dalam dimensi besar maupun kecil yang mengakibatkan kerusakan bangunan.

Oleh karena itu, yang menjadi pusat perhatian tulisan ini adalah tentang hasil pengamatan dan pengukuran pergeseran pada gempabumi pada 28 September tersebut berdasarkan hasil survei secara langsung di lapangan. Maksudnya adalah untuk menyajikan data permukaan tanah terutama data pergeseran sebagai dampak dari kejadian gempabumi Palu-Donggala-Sigi tanggal 28 September 2018. Data yang dihimpun bersumber dari survei lapangan di daerah Palu, Donggala dan Sigi yang dilaksanakan pada 29 September hingga 12 Oktober 2018. Tujuannya untuk memberikan informasi data pergeseran dan kaitannya dengan sebaran sesar aktif Palu-Koro.

Metodologi yang dipergunakan untuk analisis sesar permukaan akibat kejadian gempabumi tanggal 28 September 2018 meliputi identifikasi adanya pergeseran permukaan melalui pengamatan objek yang mengalami pergeseran atau perpindahan baik secara horizontal maupun vertikal,

penentuan lokasi titik ikat untuk melakukan pengukuran besarnya nilai pergeseran horizontal dan vertikal, mengplot data pergeseran pada peta dasar, dan melakukan analisis sesar permukaan berdasarkan data pergeseran yang diperoleh.

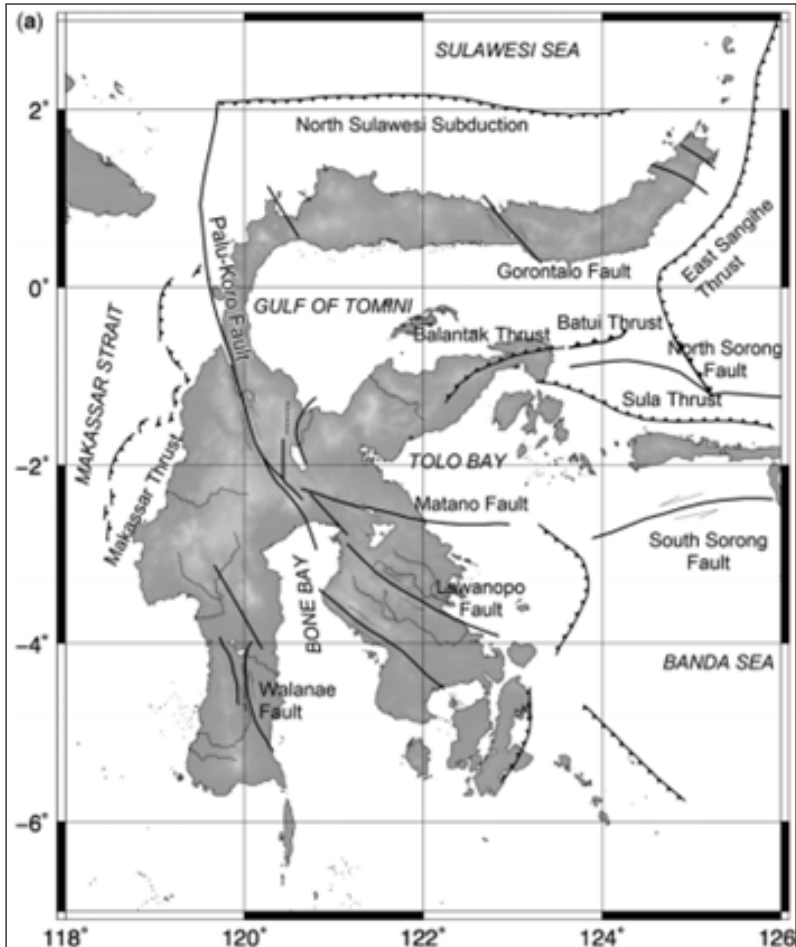
## **Tektonik dan Geologi Daerah Palu-Donggala-Sigi**

Pulau Sulawesi yang mirip huruf K ini merefleksikan rumitnya mekanisme tektonik yang terjadi akibat proses subduksi, kolisi dan amalgamasi. Kondisi ini mengakibatkan banyaknya para peneliti yang menjelaskan tentang tektonik Sulawesi, antara lain Soekamto (*Peta Geologi Indonesia Lembar Ujung Pandang, Skala 1 : 1.000.000*, 1975), Hamilton (*Tectonic of Indonesia Region*, 1979), Hall dan Wilson (*“Neogene sutures in eastern Indonesia”*, 2000).

Hall dan Wilson (2000) menyebut istilah *suture* Sulawesi untuk menggambarkan kerumitan tektonik yang terjadi di Sulawesi. Pembentukan *suture* Sulawesi diperkirakan terjadi pada Kala Oligosen Akhir dan berlanjut hingga Miosen Awal. Hingga saat ini diperkirakan deformasi tersebut masih berlangsung. Hamilton (1979) berdasarkan perbedaan litologi membagi Pulau Sulawesi menjadi empat mandala (*province*) tektonik yaitu Lengan Utara (*North Arm*), Lengan Selatan (*South Arm*), Lengan Timur (*East Arm*), dan Lengan Tenggara (*Southeast Arm*).

Evolusi tektonik yang terjadi di Pulau Sulawesi telah mengakibatkan terbentuknya pola struktur geologi yang rumit di laut dan di darat berupa sesar, lipatan, dan kekar. Pola struktur geologi yang terbentuk di laut di daerah Sulawesi Tengah berupa subduksi Sulawesi Utara, sesar naik Makassar,

sesar naik Batui, sesar naik Sula dan sesar mendatar Matano (Cipta dkk., “A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi Indonesia”, 2016) (Gambar 1).



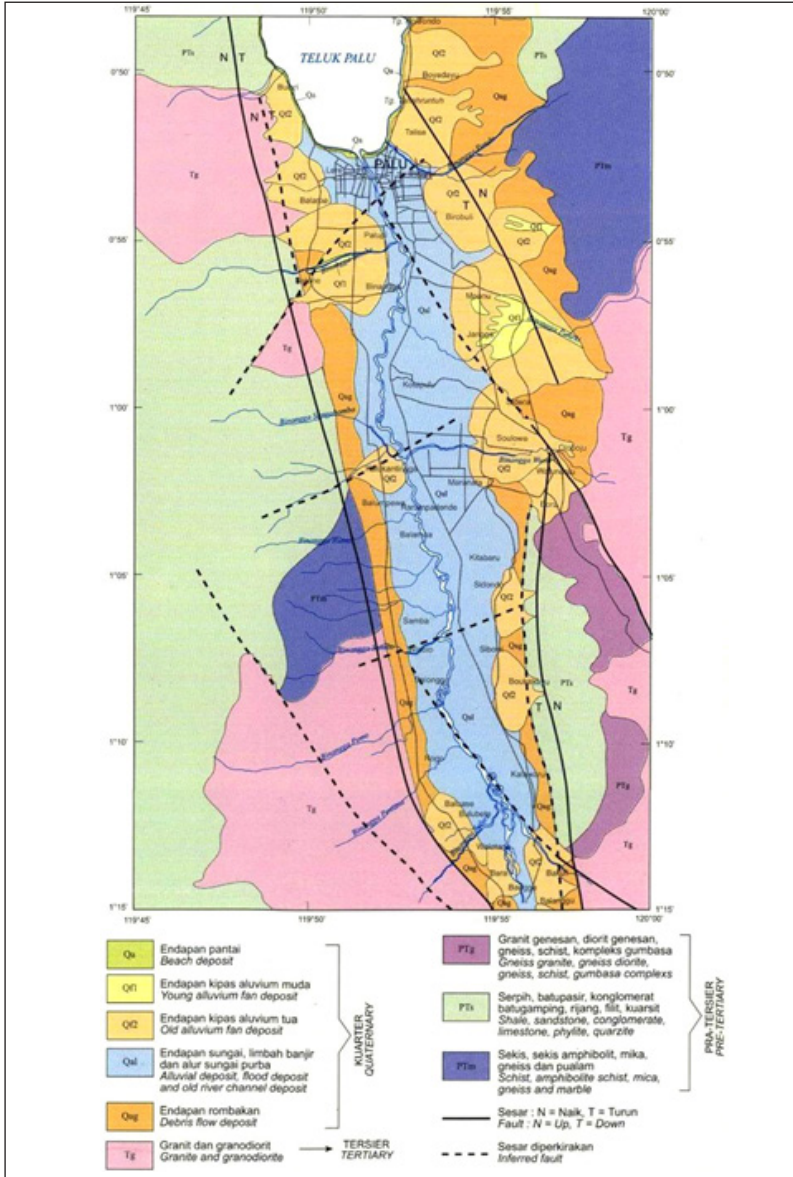
Gambar 1. Struktur geologi utama Pulau Sulawesi yang terbentuk akibat mekanisme tektonik (Cipta dkk., 2016).

Adapun di darat berupa Sesar Palu Koro, Sesar Matano, sesar di daerah Poso dan sesar naik Balantak. Sesar Palu Koro telah dibagi menjadi 7 segmen oleh Bellier dkk. (2001), dengan urutan dari selatan ke utara adalah S0 (panjang 15 km), S1 (panjang 59 km), S2 (panjang 43 km), S3 (panjang 29 km), S4 (panjang 40 km), S5 (panjang 20 km), dan S6 (panjang 12 km).

Sementara itu M. Daryono (2016) membagi sesar Palukoro menjadi 6 segmen dengan urutan dari utara ke selatan adalah segmen Palu, segmen Gumbassa, segmen Saluki, segmen Moa dan segmen Graben Meloi. Adapun tim Pusat Studi Gempa Nasional atau Pusgen (*Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*, 2017) membagi sesar Palu Koro menjadi 4 segmen dengan urutan dari utara ke selatan adalah segmen Selat Makassar, segmen Palu, segmen Saluki, dan segmen Moa.

Berdasarkan kenampakan peta topografi dan pengamatan lapangan, Kota Palu dapat dibagi menjadi tiga satuan morfologi, yaitu: satuan dataran, perbukitan, dan perbukitan terjal. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Palu (Soekamto, dkk., 1973), Peta Geologi Lembar Pasangkayu (Sukido, dkk., 1993), dan Peta Geologi Lembar Poso (Simandjuntak, dkk., 1997) didapatkan informasi mengenai kondisi geologi Kota Palu, Donggala dan Sigi.

Berdasarkan sebaran litologinya tersusun oleh lima satuan batuan yaitu satuan malihan (geneis, sekis, filit, batusabak, batugamping, dan serpentinit), satuan batuan gunungapi (breksi, tuff, dan lava), satuan batuan terobosan (diorite-andesit, dan granit-gabrodiorit), satuan batuan sedimen (batulempung, batupasir, lanau, serpih tufan, batulempung gampingan, batugamping, perselingan batupasir dan batulempung, konglomerat dan tuff), dan endapan Kuartar terdiri-dari material lepas berukuran butir lempung, lanau,



Gambar 2. Peta geologi wilayah Palu dan sekitarnya (Soehaimi dkk., 2000).

pasir, kerikil, dan kerakal serta molasa Celebes atau molasa Sulawesi terdiri-dari konglomerat, batupasir, batulumpur, batugamping koral dan napal.

Di Kota Palu endapan Kuarter berupa endapan aluvial pantai, sungai, kipas kolovial dan endapan rombakan dari batuan yang lebih tua (Soehaimi dkk., *Peta Zonasi Kerentanan Bencana Gempabumi Daerah Palu dan Sekitarnya*, 2000) (Gambar 2). Endapan Kuarter dan batuan berumur lebih tua (pra Tersier dan Tersier) yang telah mengalami pelapukan kuat, pada umumnya bersifat lepas, urai, lunak, belum kompak dan memperkuat efek guncangan, mudah berubah susunannya bila terkena guncangan gempabumi, sehingga rawan terhadap guncangan gempabumi.

## **Data Pergeseran**

Beberapa saat setelah kejadian gempabumi terutama gempabumi dengan lokasi pusat gempabumi terletak di darat dan mempunyai magnitudo besar, menjadi sesuatu yang penting bagi ahli gempabumi, karena setiap kejadian gempabumi menghasilkan jejak yang sangat berharga bagi data kegempaan. Salah satu data yang penting tersebut adalah data pergeseran (*offset*). Pada kejadian gempabumi tanggal 28 September 2018 semua jenis bahaya gempabumi muncul di permukaan, yaitu efek guncangan (*shaking*), sesar permukaan (*surface rupture*), bahaya ikutan (*collateral hazard*) meliputi retakan tanah, likuifaksi dan gerakan tanah. Bahkan kejadian gempabumi tersebut juga memicu terjadinya tsunami.

Salah satu ciri yang sangat khas dari sesar permukaan adalah adanya pergeseran tanah yang menerus, konsisten dan sebarannya memanjang cukup jauh. Pergeseran tanah sangat berbeda dengan retakan tanah. Retakan tanah hanya berupa



tanah retak dan tidak bergeser, walaupun bergeser akan sangat kecil nilainya. Retakan tanah dapat bersifat tarikan (*extension crack*) terutama daerah yang berada diantara dua retakan tanah, juga pada morfologi lembah.

Pada kasus ini retakan tanah yang terbentuk pada umumnya mengarah ke lembah dan berbentuk melingkar seperti tapal kuda. Hal ini mencirikan adanya gerakan tanah, dimana retakan tanah ini nantinya menjadi bidang gelincir dan gawir gerakan tanah. Pada kejadian gempa bumi 28 September 2018 retakan tanah ditemukan dalam dimensi kecil dan juga besar. Retakan tanah bisa mengakibatkan kerusakan bangunan yang terletak di atasnya. Adapun pergeseran tanah merupakan merupakan jalur sesar permukaan yang mampu memindahkan/ menggeser obyek yang dilaluinya. Apabila obyeknya merupakan rumah maka akan mengakibatkan kerusakan hingga rumah tersebut roboh.

Pengukuran pergeseran dilakukan dengan penentuan lokasi titik ikat, dan selanjutnya dilakukan pengukuran besarnya nilai pergeseran horizontal maupun vertikal menggunakan meteran. Berdasarkan survei lapangan jenis pergeseran tanah yang ditemukan berarah horizontal dan vertikal. Jenis pergeseran horizontal yang ditemukan berarah mengiri (*sinistral*) dan menganan (*dextral*), adapun pergeseran vertikal berupa turun (*down*).

Pergeseran yang ditemukan dominan pergeseran horizontal berarah mengiri dan dapat diikuti di bagian barat Teluk Palu menerus ke selatan hingga daerah Kulawi, Kabupaten Sigi dengan nilai bervariasi antara 2 cm (di daerah Sigi Biromaru) hingga 580 cm (di Desa Pawunu, Kecamatan Dolo Barat, Kabupaten Sigi). Pergeseran horizontal mengiri tersebut semakin mengecil ke arah selatan (daerah Kulawi, Kabupaten

Sigi). Tabel 1 berikut ini menampilkan lokasi pergeseran mengiri di Kota Palu dan Kabupaten Sigi. Adapun tabel 2 menampilkan data pengukuran pergeseran mengiri.

Tabel 1. Data besarnya pergeseran mengiri (*sinistral offset*) akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018.

No.	Lokasi	Panjang Pergeseran Mengiri dalam cm
1.	Palu Barat, Kota Palu	25-238
2.	Ulujadi, Kota Palu	429-515
3.	Tatanga	509
4.	Marawola	35-246
5.	Dolo Barat, Kab. Sigi	80-580
6.	Kulawi, Kab. Sigi	30-300

Gambar 3 dan 4 menampilkan lokasi pergeseran mengiri di daerah Palu dan Kabupaten Sigi.

Tabel 2. Lokasi pengukuran pergeseran mengiri (*sinistral offset*) akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018. Angka pada kolom offset dalam satuan cm.

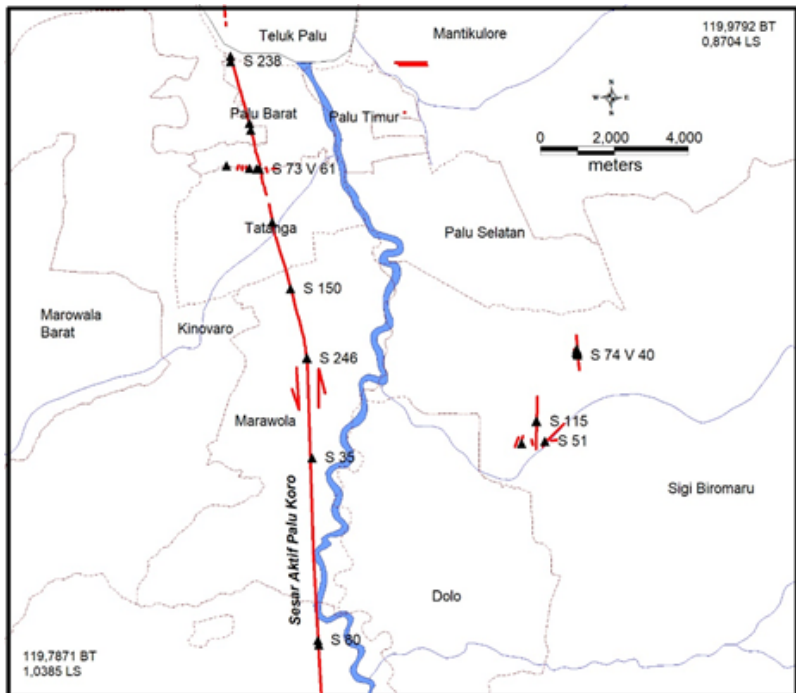
No.	Bujur	Lintang	Elevasi (m)	Offset	Lokasi
1	119.8457794	-0.898464164	19.59240723	S 429	Jln Cemara Indah, Donggala Kodi, Ulujadi
2	119.8461562	-0.900084218	20.79406738	S 515	Jln Cemara Indah, Donggala Kodi, Ulujadi
3	119.8598056	-0.955775259	34.25244141	S 246	Marawola
4	119.8598631	-0.955886571	34.7331543	S 129	Marawola
5	119.9257904	-0.955040501	84.00024414	S 74 V 40	Jono Oge, Sigi Biromaru

6	119.9178836	-0.976053346	73.42578125	S 51	Sigi Biromaru
7	119.9122088	-0.976574617	59.48681641	S 21	Sigi Biromaru
8	119.8482159	-0.909611173	34.01208496	S 73 V 61	Tatanga
9	119.8475856	-0.909571946	34.25244141	S 26 V 10	Tatanga
10	119.8558458	-0.938788662	68.85961914	S 150	Marawola
11	119.9663116	-1.347272163	279.6270752	S 300	Kulawi
12	119.9258301	-0.954256877	80.87609863	S 11 V 10	Sigi Biromaru
13	119.9872032	-1.442589322	568.7414551	S 35	Kulawi
14	119.8458507	-0.909448061	35.93469238	S 25	Palu Barat
15	119.9867021	-1.44136372	568.2607422	S 30	Kulawi
16	119.9256677	-0.953602167	82.79870605	S 3	Sigi Biromaru
17	119.9257026	-0.95448344	79.91467285	S 3	Sigi Biromaru
18	119.9830213	-1.427512458	594.9370117	S 105	Kulawi
19	119.9257103	-0.954654096	99.38122559	S 11	Sigi Biromaru
20	119.9254805	-0.954384869	88.56652832	S 2 WD 23	Sigi Biromaru
21	119.91595	-0.971228387	71.26293945	S 115	Sigi Biromaru
22	119.915725	-0.97124096	70.54187012	S 15	Sigi Biromaru
23	119.8513659	-0.9225576	60.251	S 509	Jln Padanjakaya, Tatanga
24	119.84023	-0.9088	-	S 488	Balaroa, Palu Barat
25	119.84122	-0.88331	-	S 238	Diponegoro, Palu Barat
26	119.84122	-0.882	-	S 230	Talise, Palu Barat
27	119.85991	-0.95581	-	S 207	Marawola
28	119.8611	-0.98008	-	S 35	Marawola

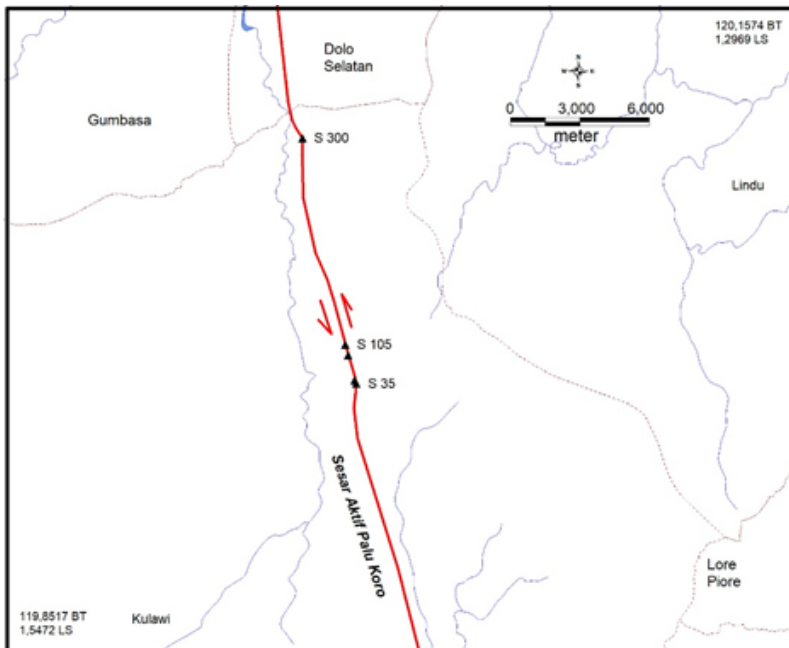
29	119.86256	-1.02462	-	S 80	Dolo Barat
30	119.8627	-1.02571	-	S 580	Pawunu, Dolo Barat
31	119.98721	-1.44259	-	S 35	Bolapapu
32	119.98408	-1.43166	-	S 82	Bolapapu

Keterangan :

S : sinistral offset; V : vertikal offset



Gambar 3. Lokasi pengukuran pergeseran mengiri (simbol segitiga hitam dengan nilai pergeseran mengiri) di Kota Palu dan sekitarnya.



Gambar 4. Lokasi pengukuran pergeseran mengiri (simbol segitiga hitam dengan nilai pergeseran mengiri) di daerah Kulawi, Kabupaten Sigi

## Sesar Permukaan Gempabumi 29 September 2018

Pergeseran dominan berarah horizontal mengiri terdapat pada bagian barat daerah Kota Palu hingga Kabupaten Sigi mengindikasikan sebagai sesar permukaan (*surface rupture*), karena sebaran pergeseran tersebut ditemukan cukup panjang dengan jenis pergeseran relatif konsisten yaitu mengiri (Gambar 5). Obyek yang dilaluinya bermacam-macam, yaitu rumah penduduk, jalan, sawah, pagar, dan lain-lain. Umumnya bangunan yang dilaluinya mengalami kerusakan, kerusakan berat bahkan roboh. Pergeseran mengiri tersebut jalur dan

zona sesar aktif Palu Koro. Jalur sesar aktif Palu Koro tidak berada tepat pada zona muka pegunungan (*mountain front*), tetapi lebih ke arah dataran. Pada kasus ini lebih ke arah timur dari zona muka pegunungan yang terletak di sebelah barat Kota Palu. Pergeseran tersebut memotong endapan Kuarter berupa endapan aluvial, molasa Sulawesi dan endapan kipas aluvial.

Pada kejadian gempa bumi tanggal 28 September 2018 sesar permukaan ini telah mengakibatkan kerusakan bangunan, jalan, sawah, pagar dan obyek lainnya pada jalur sesar aktif Palu Koro (Gambar 6, 7, 8). Kerusakan bangunan pada jalur sesar permukaan tersebut pada umumnya tergolong kerusakan sedang hingga berat. Di desa Bolapapu, Kecamatan Kulawi sesar permukaan tersebut berbentuk merencong (*enclilon*) yang melewati rumah dan mengakibatkan kerusakan dengan pergeseran mengiri 35 cm (Gambar 10).

Pada bagian timur tidak ditemukan data pergeseran signifikan dari sesar Palu Koro seperti halnya pada bagian barat, sehingga dianggap garis sesar aktif Palu Koro adalah yang terletak di sebelah barat. Pergeseran yang ditemukan hanya dimensi kecil, dan arahnya horizontal mengiri, horizontal manganan dan vertikal. Pergeseran tersebut setempat dan tidak menerus.

Pergeseran lainnya ditemukan dalam dimensi kecil berarah pergeseran manganan (*dextral offset*) dan vertikal kurang dari 0,5 m dan pada umumnya berarah barat – timur dan timur laut – barat daya. Pada bagian timur Kota Palu di jalan Soekarno Hatta terdapat pergeseran vertikal berarah barat – timur sekitar 5 cm. Indikasi pergeseran horizontal manganan terdapat di daerah Jono Oge yang membentuk gejala *step over restraining* dengan kenampakan lapangan adanya bukit terangkat akibat

kompresi dan berarah NE-SW (Gambar 9). Hal ini mencirikan adanya sesar mendatar menganan.

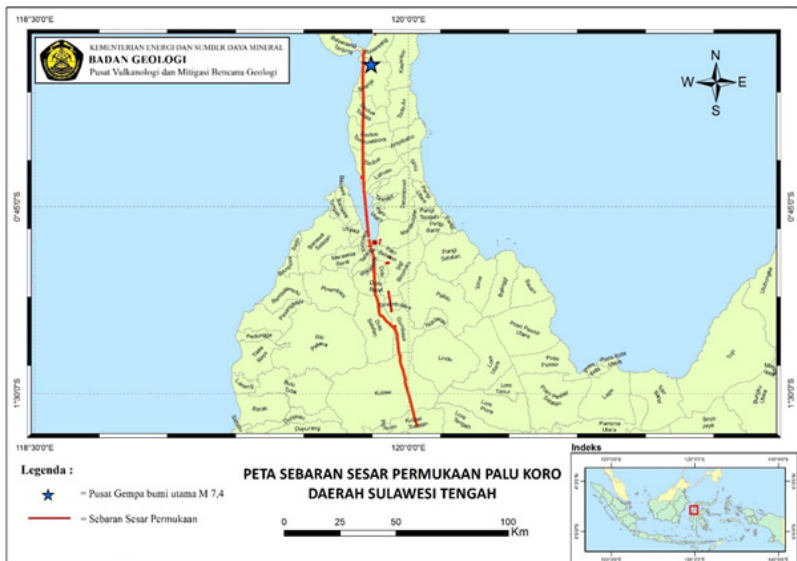
Retakan tanah (*ground fracture*) ditemukan cukup banyak di Kota Palu dan Kabupaten Donggala bagian utara yang dengan arah utara – selatan, barat – timur, timur laut – barat daya dan barat laut – tenggara. Retakan tanah tersebut bukan diakibatkan oleh proses tektonik atau sesar permukaan, tetapi karena kondisi tanah setempat, misalnya pada tanah urug, tanah jenuh air, tepi tebing. Beberapa retakan tanah tersebut terjadi akibat tarikan dan retakan tanah lainnya berkaitan dengan indikasi gerakan tanah, dicirikan searah lembah atau slope yang berbentuk melingkar seperti tapal kuda. Retakan tanah semacam ini harus diwaspadai karena berpotensi terjadi gerakan tanah, apalagi kini sudah memasuki musim hujan. Di daerah Kulawi cukup banyak pola retakan tanah seperti ini dan telah mengakibatkan terjadinya gerakan tanah.

Berdasarkan sebaran kerusakan bangunan, sebaran gempabumi susulan, sebaran sesar permukaan, sebaran dampak (kerusakan bangunan, retakan tanah) (Gambar 11) maka panjang sesar yang bergerak dari lokasi pusat gempabumi hingga lokasi terdampak diperkirakan sekitar 155 km dengan lebar zona sesar berdasarkan data tersebut sekitar 40 Km. Data sumber gempabumi dari Pusgen (2017) membagi sesar Palu Koro menjadi 4 segmen dengan urutan dari utara ke selatan adalah segmen selat Makassar, Palu, Sulaki dan Moa. Segmen Makasar terletak di laut, sedangkan segmen Palu, Sulaki dan Moa terletak di darat.

Berdasarkan posisi pusat gempabumi 28 September 2018 dan sebaran dampaknya, maka terdapat tambahan segmen baru sesuai dengan sebaran gempabumi susulan yaitu segmen Donggala Utara. Pada gempabumi tersebut sesar Palu Koro

menggerakkan tiga segmen sekaligus, yaitu segmen Donggala Utara, Palu dan Sulaki. Adapun segmen selat Makassar tidak terindikasi bergerak pada kejadian gempabumi tanggal 28 September 2018.

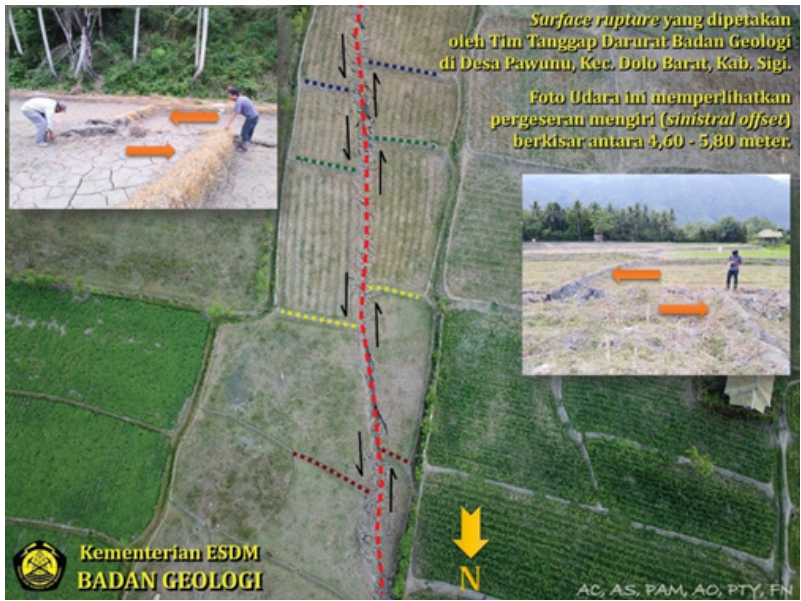
Pada jalur atau zona sesar permukaan Palu Koro yaitu pada bagian barat sebaiknya tidak untuk permukiman, karena bangunan yang terletak pada jalur dan zona sesar permukaan mengalami kerusakan. Jalur atau zona tersebut sebaiknya dipergunakan untuk jalur hijau atau monumen untuk memperingati kejadian gempabumi 28 September 2018. Berdasarkan pengamatan lapangan zona aman minimal 20 m dari garis sesar permukaan, 10 m pada sisi kiri dan 10 m pada sisi kanan.



Gambar 5. Peta sesar aktif Palu Koro. Tanda bintang biru merupakan episenter menurut BMKG.



Negara kita belum mempunyai ketentuan peruntukan ruang pada zona sesar aktif. Pada Peraturan Pemerintah (PP) nomor 26 tahun 2008 tentang rencana tata ruang wilayah nasional pada pasal 61 butir keempat disebutkan bahwa jarak aman dari zona patahan aktif ditetapkan paling sedikit 250 m dari tepi jalur patahan aktif. Sayangnya ketentuan ini bukannya diperbaiki atau diperbaharui, tetapi malah dicabut pada PP nomor 13 tahun 2017 tentang perubahan atas PP nomor 26 tahun 2008 tentang rencana tata ruang wilayah nasional. Oleh karena itu, dengan adanya gempa bumi 28 September 2018 merupakan momen yang tepat untuk melakukan kajian ulang untuk zona aman pada jalur atau zona sesar aktif dalam kaitannya untuk peruntukan kawasan budi daya atau lindung pada penataan ruang.



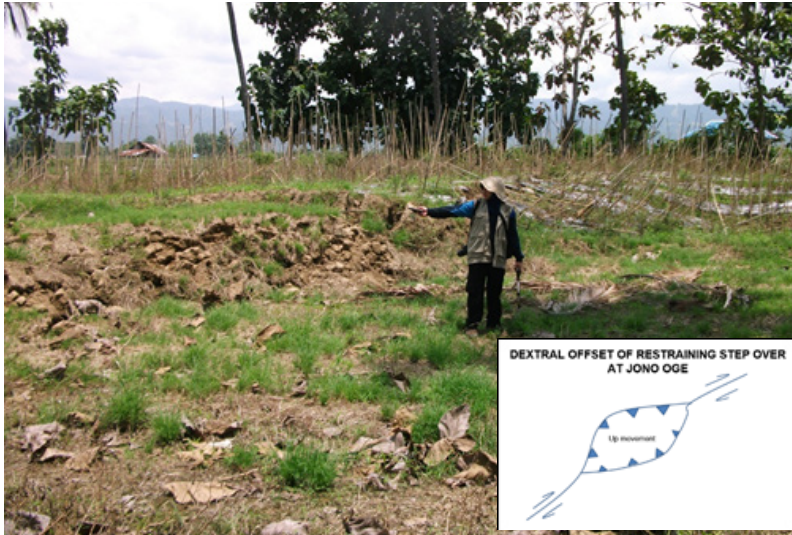
Gambar 6. Pergeseran mengiri (*sinistral offset*) sesar permukaan berkisar 4,6 m hingga 5,8 m akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018 di desa Pawunu, Kecamatan Dolo Barat, Kabupaten Sigi.



Gambar 7. Pergeseran mengiri (*sinistral offset*) sebesar 515 cm di Jalan Cemara Indah, Donggala Kodi, Kota Palu.



Gambar 8. Pergeseran mengiri (*sinistral offset*) sebesar 246 cm di dekat mata air daerah Marawola, Kabupaten Sigi. Terlihat pada jalan bagian kanan telah diurug.



Gambar 9. Gejala *restraining step over* dicirikan adanya tanah terangkat (*up*) dengan pergeseran menganan di daerah Jono Oge.

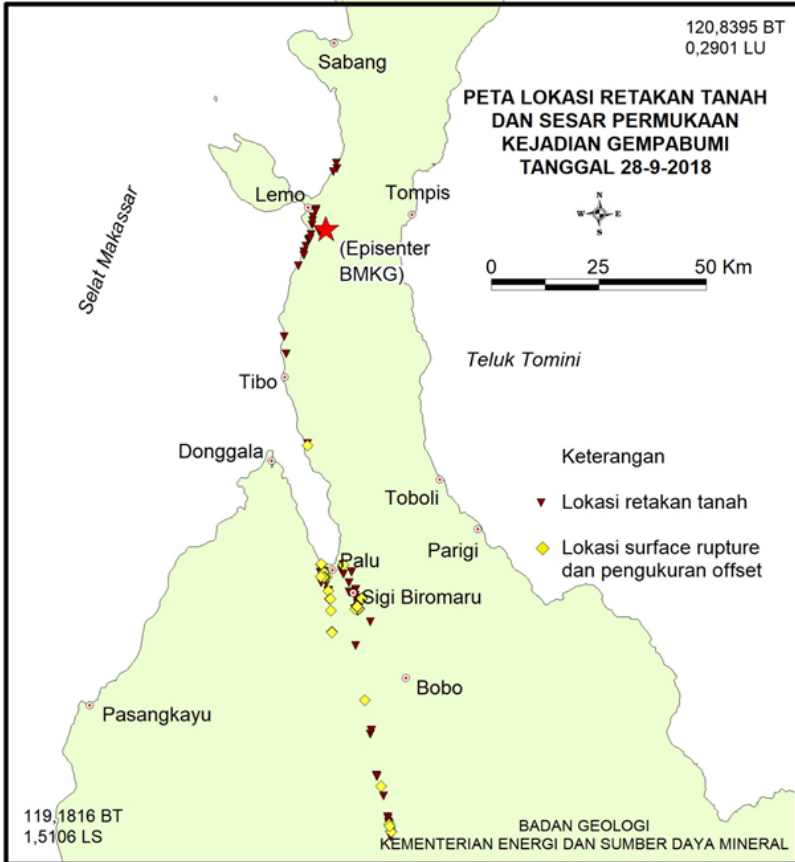
Dengan demikian, berdasarkan uraian dampak gempabumi pada 28 September 2018 di atas, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: *Pertama*, kejadian gempabumi tersebut mengakibatkan adanya sesar permukaan sebagai jalur sesar aktif Palu Koro yang tersebar memanjang mulai dari Teluk Palu ke selatan hingga daerah Sigi. Panjang sesar yang bergerak dari lokasi pusat gempabumi hingga lokasi terdampak diperkirakan sekitar 155 km dengan lebar zona sesar sekitar 40 Km.

*Kedua*, pergeseran yang ditemukan dominan pergeseran horizontal berarah mengiri dengan nilai bervariasi antara 2 cm (di daerah Sigi Biromaru) hingga 580 cm (di Desa Pawunu, Kecamatan Dolo Barat, Kabupaten Sigi). *Ketiga*, gempabumi tersebut telah menggerakkan tiga segmen, yaitu segmen Donggala Utara, Palu dan Sulaki. *Keempat*, jalur sesar permukaan telah mengakibatkan kerusakan bangunan,





Gambar 10. Sesar permukaan berbentuk merengong mengakibatkan kerusakan rumah penduduk di desa Bolapapu, Kulawi, Kabupaten Sigi. Besarnya pergeseran mengiri di lokasi ini 35 cm.



Gambar 11. Peta retakan tanah akibat gempa bumi tanggal 28 September 2018 dan lokasi pengukuran pergeseran tanah.

sehingga direkomendasikan untuk dijasikan jalur hijau sepanjang jalur dan zona sesar.

*\*Supartoyo, Athanasius Cipta, Amalfi Omang, Akhmad Solikhin, Pandu Adiminarno bekerja di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, KESDM.*

# **Anomali Perilaku Gelombang Tsunami**

**Oleh**

**Athanasius Cipta, Amalfi Omang, Supartoyo,  
Pandu A. Minarno, Akhmad Solikhin, Fadli N. Falah,  
dan Rustan Efendi**

*“Tsunami tidak lazim terjadi secara spontan mengikuti gempa bumi dengan tinggi genangan maksimum mencapai 6 meter yang tercatat di dekat muara Sungai Palu”*

Sesar mendatar yang melmanjang mulai dari Kecamatan Kulawi di selatan, melintasi Kota Palu hingga Desa Tambu di utara, tiba-tiba bergerak dan menyebabkan anomali tsunami pada 28 September 2018. Gelombang tsunami melanda Kota Palu di dasar Teluk Palu dengan tinggi rendaman maksimum 6 m. Beberapa saksi mata menyaksikan fenomena gelombang tsunami yang tidak lazim.

Survei pascatsunami dilakukan oleh Tim Badan Geologi pada 4-6 Oktober 2018 di sepanjang pantai Palu-Donggala. Survei diarahkan untuk memahami perilaku tsunami dan kerusakan akibat tsunami, serta kemungkinan sumber tsunami lainnya di samping gempa bumi. Parameter-parameter tsunami seperti tinggi tsunami, tinggi rendaman dan jarak *run-up* dikumpulkan selama survei, ditambah dengan keterangan saksi mata.

## **Sebaran Tinggi Rendaman Tsunami**

Tinggi rendaman adalah tinggi air diukur dari tanah ke ketinggian tanda air (*watermark*) di dinding, debris atau ketinggian goresan pada batang pohonan (Gambar 1). Kedalaman tersebut diukur pada titik terdekat ke garis pantai, dan kalau memungkinkan diukur juga pada sejumlah titik sejauh puluhan meter dari garis pantai. Distribusi kedalaman aliran tsunami disajikan pada Tabel 1. Di dasar Teluk Palu, sepanjang Pantai Talise, daerah wisata Kota Palu, tinggi

rendaman berkisar antara 1,67 hingga 5,55 m. Jarak genangan (*inundation*) maksimum, ukuran jarak dari garis pantai ke ujung landaan air di darat pada dasar teluk sekitar 500 m di sepanjang Sungai Palu (no. 2 dan 3 pada Tabel 1), dan di Talise (no. 1 dan 14 pada Tabel 1) jarak genangan maksimumnya adalah 200 m.

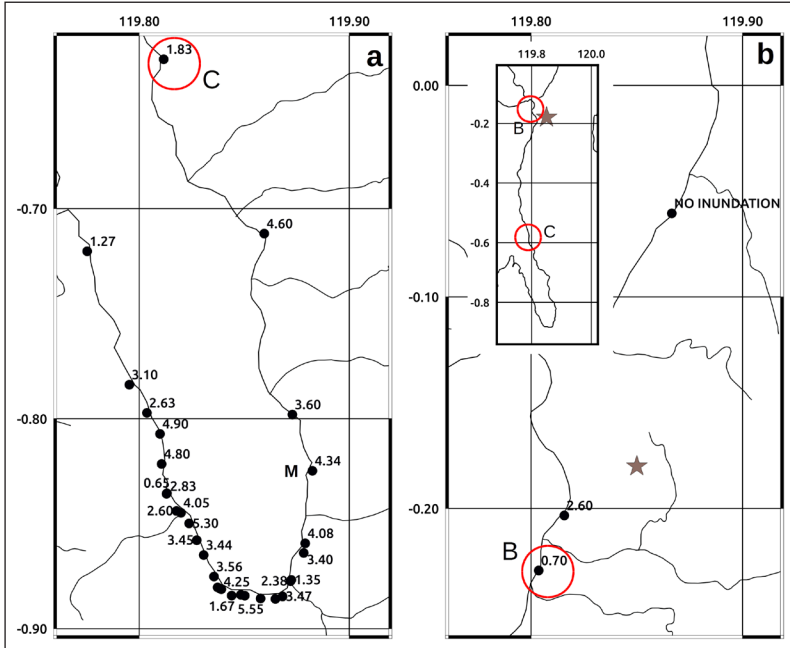
Di pantai barat Teluk Palu, tinggi rendaman bervariasi dari 0,65 m di Buluri hingga 4,90 m di Watusampu. Kedalaman aliran yang terukur di dekat pantai terbilang tinggi, tetapi karena topografinya curam, jarak genangannya terbatas puluhan meter, kecuali di Buluri, Kecamatan Ulujadi (no. 26 pada Tabel 1) yang jarak genangannya mencapai 100 m.

Kedalaman alirannya di pantai timur Teluk Palu berada di kisaran 1,83 m hingga 4,60 m. Karena topografinya datar, Pelabuhan Mamboro (ditandai dengan M pada Gambar 2a) rusak parah diterjang tsunami. Kapal berukuran sedang terdampar di pantai dan truk-truk beroda 16 terguling dan hanyut sejauh 50 m, pohon-pohon besar tumbang, tersapu dan menerjang ruko sejauh 100 m dari garis pantai. Di Mamboro, tinggi rendaman mencapai 4,34 dengan jarak genangan maksimumnya 210 m.



Gambar 1. Tanda air di dinding (Lero, no.9 pada tabel 1), batang tergores (Buluri, no. 29 pada Tabel 1) dan debris (Palu IV Bridge, no. 3 pada Tabel 1) menjadi penanda kedalaman aliran tsunami.





Gambar 2. Sebaran tinggi rendaman tsunami terukur di (a) Teluk Palu dan utara Donggala (b), titik hitam adalah lokasi pengukuran yang diikuti oleh angka yang menunjukkan tinggi rendaman terukur. Di sepanjang garis pantai mulai dari utara C ke selatan B, tidak ada jejak tsunami yang teramati. Mamboro (M dalam Gambar 2a) rusak berat akibat tsunami, tinggi rendaman mencapai 4,34 m dan jarak genangannya sejauh 210 m.

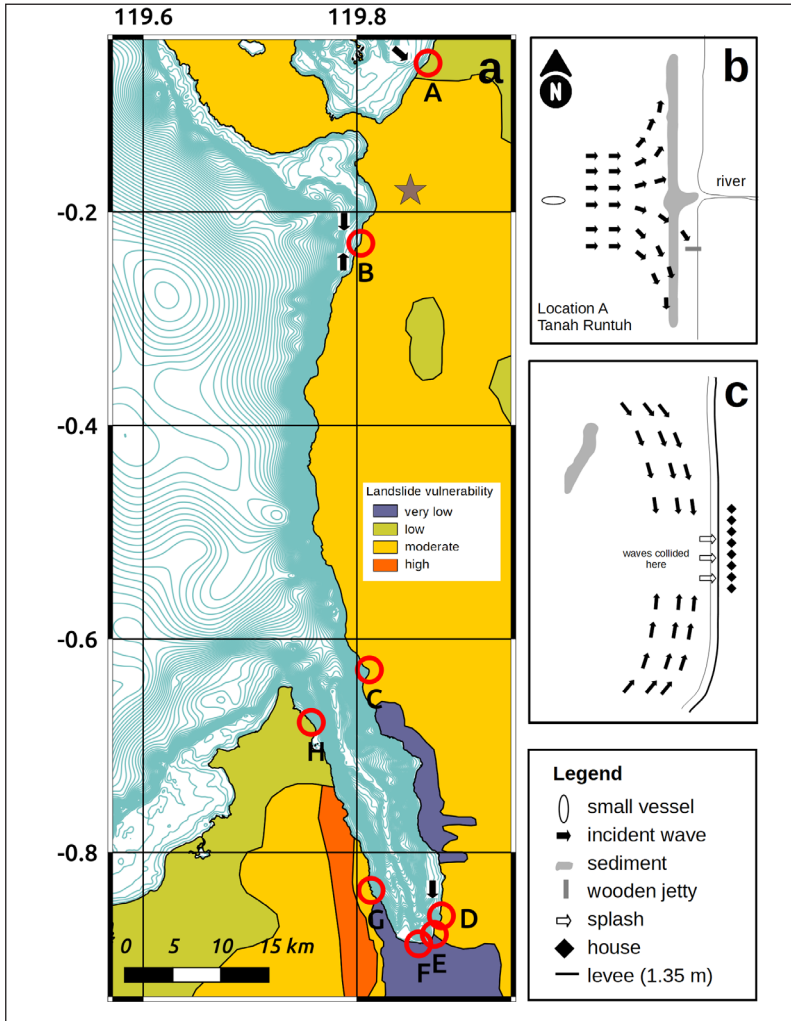
Anehnya, di utara C dan selatan B (Gambar 2a, 2b), jejak genangan tidak teramati, tetapi saksi mata melihat gelombang tinggi mendekati desa tetapi gelombangnya tidak melanda pantai. Tsunami teramati dan menggenangi daratan lagi di Tanjung Padang (lingkaran merah B pada Gambar 3). Situasi serupa juga teramati oleh nelayan di Tanah Runtu (lingkaran merah A pada Gambar 3).

## Perilaku Gelombang Tsunami

Di Dusun Tanah Runtuh (lingkaran merah A), saksi mata, seorang nelayan di pantai, mengamati gelombang cukup tinggi yang menyebar secara frontal ke pantai, sehingga dia tidak dapat melihat daratan dari posisinya. Saat gelombang kian mendekati dusunnya, gelombang tersebut pecah menjadi dua massa air, kemudian berbalik arah ke utara dan selatan. Gelombang tersebut lalu merambat ke selatan, menghantam dermaga kayu. Karena gelombang menyebar ke utara, dusun tersebut aman, tidak tergenang.

Di Tanjung Padang (lingkaran merah B), seorang nelayan di atas kapal mengamati 2 gelombang datang dari selatan dan utara sebelum bertabrakan di lepas pantai pemukiman nelayan. Sebagian besar gelombang yang bertabrakan tersebut kemudian terpisah ke selatan dan utara dan hanya gelombang *periferal* yang menerjang ke daratan serta menyapu sekitar 50 rumah nelayan. Karena sesar bergerak lebih jauh ke timur dari lokasi ini, munculnya gelombang dari utara dapat menunjukkan longsoran di selatan Semenanjung Maimbaya yang memicu tsunami. Di sisi lain, gelombang dari selatan mungkin dipicu oleh pergerakan sesar yang melintasi teluk.

Pemilik hotel di Tondo (lingkaran merah D) mengamati gelombang yang datang dari utara. Gelombang tersebut menyebar ke selatan dan saat menabrak lereng yang lebih tinggi gelombangnya memantul ke utara hotel, kafe, dan perumahan. Misalnya, di sana ada dua titik pengamatan di mana gelombang datang dari utara, meski sumbernya mungkin berbeda. Pada titik B, ada memiliki kemungkinan besar bahwa longsoran mungkin memicu gelombang tsunami karena sesar permukaan di daratan. Namun, pada titik D, gelombang tsunami mungkin dipicu oleh gempabumi atau longsoran bawah laut.



Gambar 3 Lokasi gelombang tsunami yang memiliki perilaku menarik ditumpang-susun dengan peta kerentanan gerakan tanah disajikan pada a, sedangkan b dan c menunjukkan peta situasi A (Tanah Runtuh) dan B (Tanjung Padang). Peta kerentanan gerakan tanah diambil dari Badan Geologi (*Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Pulau Sulawesi*, 2009) sementara batimetrimya diambil dari Badan Informasi Geospasial (BATNAS\_115E-120E\_05S-000\_MSL, [http://tides.big.go.id/DEMNAS/ Batnas.php](http://tides.big.go.id/DEMNAS/Batnas.php), 2018).

Tabel 1. Distribusi kedalaman aliran tsunami terukur di Palu dan Donggala

No	Garis Bujur	Garis Lintang	Kedalaman Aliran (m)	Lokasi_1	Lokasi_2	Tanggal	Waktu Setempat
1	119.87239	-0.8767	1.35	SMK 7 Palu	Talise, Palu	02-10-2019	02:29:00 PM
2	119.86483	-0.88578	5.30	Palu IV Bridge	Palu	04-10-2019	11:58:00 AM
3	119.85776	-0.88556	5.55	Palu IV Bridge	Palu	04-10-2019	01:15:00 PM
4	119.87830	-0.86390	3.40	Kp. Nelayan	Mantikulore	05-10-2018	09:07:00 AM
5	119.87901	-0.85931	4.08	Wina Beach H.	Tondo Bawah	05-10-2018	
6	119.88242	-0.82478	4.34	Mamboro	North Utara	05-10-2018	
7	119.87290	-0.79800	3.60	Mamboro	North Utara	05-10-2018	
8	119.85951	-0.71188	4.60	Pantoloan	Tawaeli	05-10-2018	
9	119.81165	-0.62891	1.830	Desa Lero	Donggala	05-10-2018	
10	119.78924	-0.56996	No Inund.	Tobou	Sindue	05-10-2018	
11	119.86651	-0.06048	No Inund.	Tanah Runtuh	Balaesang	06-10-2018	
12	119.81572	-0.20328	2.60	Desa Tompe	Balaesang	06-10-2018	
13	119.80361	-0.22927	0.70	Tanjungpadang	Balaesang	06-10-2018	
14	119.87201	-0.87730	2.38	Pantai Talise	East Palu	07-10-2018	09:23:00 AM
15	119.86824	-0.88457	3.47	Pantai Talise	East Palu	07-10-2018	09:58:00 AM

16	119,83732	-0,88028	4,36	Jl. Cumi-cumi	West Palu	07-10-2018	11:15:00 AM
17	119,83862	-0,88096	4,25	Jl. Cumi-cumi	West Palu	07-10-2018	11:47:00 AM
18	119,83909	-0,88113	3,35	Jl. Cumi-cumi	West Palu	07-10-2018	12:00:00 PM
19	119,84399	-0,88419	1,67	IAIN, Lere	West Palu	07-10-2018	12:18:00 PM
20	119,84837	-0,88379	3,17	Grand Duta	West Palu	07-10-2018	12:35:00 PM
21	119,83559	-0,87511	3,56	Silae, Ulujadi	Palu	07-10-2018	01:45:00 PM
22	119,83066	-0,86488	3,44	Puenjula	Palu	07-10-2018	02:16:00 PM
23	119,82739	-0,85782	3,45	Tipo, Ulujadi	Palu	07-10-2018	02:38:00 PM
24	119,82375	-0,84982	5,30	Buluri, Ulujadi	Palu	07-10-2018	03:07:00 PM
25	119,81988	-0,84477	4,05	Buluri, Ulujadi	Palu	07-10-2018	03:50:00 PM
26	119,81772	-0,84390	2,60	Buluri, Ulujadi	Palu	08-10-2018	10:48:00 AM
27	119,81300	-0,83573	0,65	Buluri, Ulujadi	Palu	08-10-2018	11:27:00 AM
28	119,81316	-0,83548	2,83	Buluri, Ulujadi	Palu	08-10-2018	11:59:00 AM
29	119,81066	-0,82154	4,80	Marine C. Base	Watusampu	08-10-2018	12:32:00 PM
30	119,80989	-0,80722	4,90		Watusampu	08-10-2018	01:15:00 PM
31	119,80365	-0,79720	2,63	Lolioge	Watusampu	08-10-2018	01:59:00 PM
32	119,79529	-0,78381	3,10	Loli Saluran	Watusampu	08-10-2018	02:23:00 PM
33	119,77522	-0,72028	1,27	Loli Dondo	Watusampu	08-10-2018	03:02:00 PM
34	119,85024	-0,88423	2,40	Mercure, Lere	West Palu	09-10-2018	10:05:00 AM

Dusun Lero dalam lingkaran merah C mengalami penurunan muka tanah setinggi 50 cm demikian juga di Talise (E), Jembatan Kuning (F), Buluri (G) dan Kota Donggala (H). Di dekat F dan G, para penyintas juga mengamati bahwa air laut melanda tepat setelah gempabumi dan setelah beberapa menit diikuti gelombang tinggi.

Dengan demikian, sebaran tinggi rendaman di sepanjang pantai Kota Palu dan Donggala utara menunjukkan longsoran dapat terjadi di kedua sisi Teluk Palu dan daerah pesisir di dekat pusat gempabumi. Longsoran tersebut memicu tsunami lokal. Di dekat mulut teluk, pada titik C dan H (Gambar 3a) tinggi rendaman agak rendah bila dibandingkan dengan yang ada di dalam teluk. Mungkin di situlah sumber tsunami. Sumber tersebut bisa berupa longsoran atau sesar naik yang menghubungkan bagian selatan dengan bagian utara dari sesar permukaan. Bila hanya gempabumi yang dianggap sebagai penggerak tsunami, sesar gesernya menggerakkan daratan ke atas serta mendorong air menjauh dari dasar teluk, menciptakan gelombang pertama negatif di Kota Palu dan selama beberapa saat, gelombang positif tersebar kembali ke darat. Karena batimetri teluk, terjadilah gelombang tsunami positif yang tinggi.

*\*Athanasius Cipta, Amalfi Omang, Supartoyo, Pandu A. Minarno, Akhmad Solikhin, Fadli N. Falah bekerja bekerja di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Rustan Efendi bekerja di Fakultas MIPA, Universitas Tadulako, Palu*



# Ancaman Gerakan Tanah dan Banjir Bandang

Oleh

**Sumaryono, Yohandi K, Yunara D.T, Iqbal E. P,  
Imam Santosa, Anjar H. W, Syatrin**



*“Pasca gempa bumi Palu, ancaman berikutnya jika musim hujan adalah longsor dan banjir bandang”*

Penelitian dan dokumentasi tentang longsor yang dipicu gempa bumi telah banyak dilakukan. Misalnya di Cina yaitu sejak tahun 1789 (D.K. Keefer, *“Investigating Landslides Caused By Earthquakes: A Historical Review”*, 2002). Longsor yang dipicu oleh gempa bumi mempunyai karakteristik tertentu dan berjumlah banyak dari skala kecil sampai besar serta tersebar secara luas sehingga menghasilkan kerusakan dan dampak yang luar biasa (J. Zhang dan F. Su, *“The Characteristics of Landslides Induced by the Wenchuan Earthquake Based on High Spatial Resolution Remote Sensing Images”*, 2013).

Berdasarkan W. Heath dan B.S. Saroso (*“Natural Slope Problems Related to Roads in Java Indonesia”*, 1988), Varnes (1996) menyatakan bahwa kejadian longsor atau gerakan tanah (longsor) sangat dikontrol oleh geomorfologi dan kelerengan, kondisi geologi tanah dan batuan, tata guna lahan, kondisi geohidrologi. Sementara Keefer (*“Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event”*, 2000) menyatakan bahwa parameter geoteknik seperti sudut gesekan dalam dan kohesi tidak dapat menjelaskan distribusi dan densitas gerakan tanah.

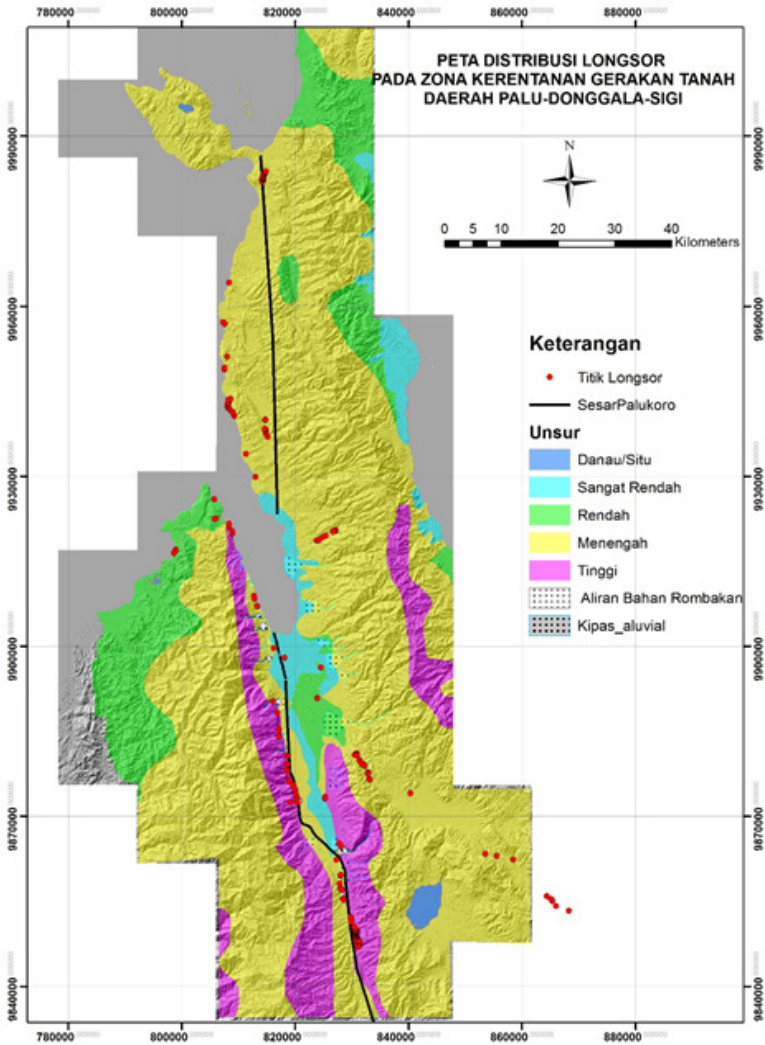
Longsor yang dipicu oleh gempa bumi lebih berkorelasi dengan karakteristik geologi, geologi teknik dan geomorfologi. A. Welsh dan T. Davies (*“Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards,”* 2010) menyatakan geomorfologi pada bentang alam kipas aluvial rentan untuk terlanda aliran bahan rombakan, sehingga harus diidentifikasi dengan baik parameter *catchment* area, geomorfologi dan sistem informasi geografi dengan menggunakan DEM.

Sementara R.E. Giraud (*Guidelines for the Geologic Evaluation of the Debris Flow Hazards on Alluvial Fans in Utah*, 2005) menyatakan bahwa pemetaan geologi sangat penting untuk mengidentifikasi dan menggambarkan area aktif dari kipas aluvial. Pemetaan aliran *debris* dan endapan lainnya umumnya berfokus pada bentang alam; tingkat, jenis, karakter, dan umur endapan geologi, khususnya periode aliran bahan rombakan; dan stratigrafi hubungan antar endapan *debris*.

K.X. Whipple dan T. Dunne (*The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California*, 1992), J.E. Costa (*Physical geomorphology of debris flows*, 1984), R. Hereford dkk (*Tributary debris fans and the late Holocene alluvial chronology of the Colorado River, eastern Grand Canyon, Arizona*, 1996), memberikan contoh dan saran untuk memetakan endapan aluvial-fan.

Survei geomorfologi, sedimentologi, dan stratigrafi hubungan pada pemetaan endapan kipas aluvial dapat memberikan gambaran tentang kejadian dan periode aliran bahan rombakan pada kipas aluvial tersebut, volume, perilaku, dan bahaya aliran bahan rombakan di area kipas proksimal, medial, dan distal.

Maho Nakano, dkk (*Geomorphological and geological features of collapsing landslide induced by the 2009 Padang Earthquake*, 2015), Wahdyudi D. Sumaryono dkk, (*Control Morphology to the Landslide induced by Eartquake; Case Study padang Pariaman, Sumatra*, 2015), menyatakan bahwa kondisi geologi dan geomorfologi sangat berperan pada longsoran yang dipicu oleh gempa bumi Sumatera Barat pada tahun 2009.



Gambar 1. Zona Kerentanan Gerakan Tanah daerah Palu dan sekitarnya (PVMBG, 2009)

## Jenis Gerakan Tanah Dipicu Gempabumi

Adapun geomorfologi Palu, Donggala dan Sigi terletak di sepanjang Lembah Palu yang dilewati Sesar Palu Koro. Sesar ini membentang dari Teluk Palu ke arah tenggara dan merupakan sesar aktif, pernah menyebabkan serangkaian gempabumi pada tahun 1907, 1909, 1937, 1968 dan 2012 (Kompas, 2018, Kusumawardhani H. Marjiyono, dkk, “Struktur Geologi Bawah Permukaan Dangkal Berdasarkan Interpretasi Data Geolistrik Studi Kasus Sesar Palu Koro,” 2013).

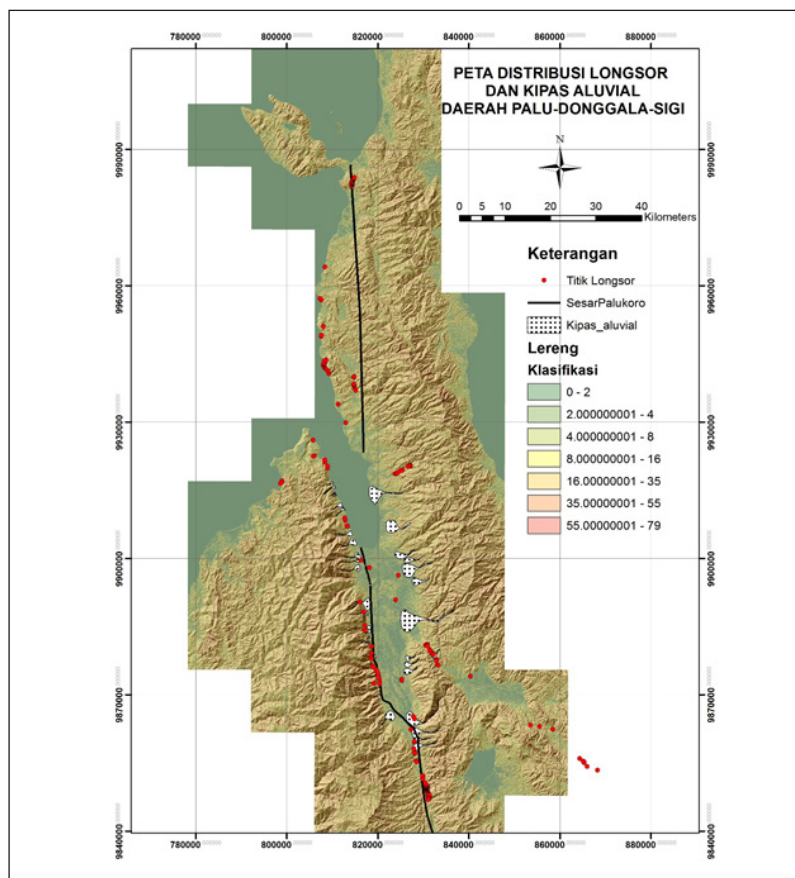
Gempabumi 28 September 2018 yang bersumber dari aktivitas zona Sesar Palu Koro menyebabkan terjadinya bencana ikutan seperti likuifaksi, tsunami, dan longsor. Hasil identifikasi lapangan kejadian longsor terjadi sebanyak 146 longsor dan kombinasi *rockfall*/jatuhan batu dan longsor. Kombinasi longsor dan jatuhan batu banyak terjadi di bagian utara di daerah Donggala karena daerah ini berdekatan dengan sumber gempabumi. Pada umumnya kejadian gerakan tanah sebagian besar terletak pada Zona Kerentanan Gerakan Tanah Menengah dan Tinggi serta berdekatan dengan sesar Palu Koro (Gambar 1).

Sedangkan banyak kejadian longsor terjadi di bagian selatan di daerah Dolo Selatan dan Kulawi Kabupaten Sigi. Pasca gempabumi ancaman berikutnya jika musim hujan adalah longsor dan banjir bandang (aliran bahan rombakan).

Berdasarkan survei lapangan menunjukkan bahwa kejadian longsor sangat banyak terjadi di bagian selatan daerah Dolo Selatan, Kulawi Kabupaten Sigi, serta bagian utara di Kabupaten Donggala di daerah Sirenja berdekatan dengan sumber gempabumi. Sedangkan pada bagian selatan longsor banyak terjadi di sepanjang Sesar Palu Koro dan menunjukkan bahwa kehadiran Sesar Palu Koro sangat mengontrol terjadinya

gerakan tanah.

Dari interpretasi DEM IFSAR resolusi 7 m terlihat bahwa di Lembah Palu banyak ditemukan morfologi kipas aluvial. Bentuk morfologi kipas aluvial ini menunjukkan bahwa potensi banjir bandang di daerah ini sangat tinggi. Jenis gerakan tanah yang terjadi akibat gempa bumi ini adalah jatuhnya batu,



Gambar 2 Sebaran longsor dan kipas alluvial di Sepanjang Sesar Palu Koro

longsor, retakan dan nendatan dan potensi aliran bahan rombakan karena banyaknya longsor yang terjadi di bukit.

## Longsor dan Aliran Bahan Rombakan

Gerakan tanah jenis longsor salah satunya terjadi di Desa Poi, Kecamatan Dolo Selatan, Kabupaten Sigi, berupa longsor (*slide*) dengan dimensi besar pada lereng perbukitan dan mengakibatkan terbentuknya tumpukan material dan menutup alur air sebelah barat permukiman Desa Poi. Tumpukan materialnya memiliki lebar 340 meter, panjangnya 950 m, kondisi menggantung serta berpotensi menjadi aliran bahan rombakan jika dipicu oleh hujan (Gambar 3 dan 4).



Gambar 3. Hasil pengambilan gambar dengan drone di lokasi longsor dan potensi banjir bandang desa Poi, Kecamatan Dolo Selatan



Gambar 4. Kenampakan tubuh longsoran (kiri). Kondisi Material bahan rombakan di lapangan (kanan) (sumber foto : Kepala Desa Poi, Dolo Selatan).

Longsoran ini terjadi pada perbukitan dengan kemiringan lereng sangat terjal pada ketinggian 950 mdpl dengan gerakan relatif barat daya – timur laut pada arah N 45<sup>0</sup>-50<sup>0</sup>E. Menurut masyarakat setempat, banjir bandang pernah terjadi pada tahun 1992 dan 2007. Tidak ada catatan korban jiwa, tetapi rumah penduduk terendam banjir dan lumpur.

Selain itu, dijumpai juga retakan-retakan dan nendatan pada jalur menuju lokasi potensi aliran bahan rombakan. Retakan ini berada di sebelah barat permukiman Desa Poi dengan lebar antara 5 cm sampai mencapai 30 cm dan ketinggian nendatan mencapai 1 m.

Oleh karena itu, masyarakat khawatir akan terjadi aliran bahan rombakan yang melanda permukiman. Dan memang sekitar 200 KK di Desa Poi Kecamatan Dolo Selatan terancam





Gambar 5 Longsoran akibat gempa di sepanjang jalan di Desa Sambo dan Wisolo, kec. Dolo Selatan, Sigi.



Gambar 6. Longsoran yang memutus akses jalan objek wisata Danau Lindu dan sekitarnya di Desa Salua, Kec. Kulawi serta mengisolir Kec. Kulawi.





Gambar 7 Longsor di perbukitan yang menjadi hulu Sungai Salua. Material longsor yang masuk ke sungai berkembang menjadi aliran bahan rombakan.



Gambar 8 Dampak aliran bahan rombakan/ banjir bandang yang melanda Desa Salua, Kec. Kulawi.

jika material longsor tersebut berkembang menjadi aliran bahan rombakan dan melanda permukiman.

Sementara itu di Daerah Dolo Selatan dan Kulawi banyak dijumpai longsor pada bukit dan dihilu sungai, akibatnya jika terjadi hujan deras dan lama berpotensi tinggi terjadi aliran banjir bandang terutama pada sungai-sungai yang hulunya banyak mengalami longsor tersebut (Gambar 5, 6 dan 7). Kejadian banjir bandang sudah terjadi di Desa Salua, Kecamatan Kulawi dan Desa Bangga, Kecamatan Dolo Selatan (Gambar 8 dan 9).

Selain itu, daerah kipas aluvial di daerah Dolo Selatan dan Kulawi perlu diwaspadai potensi terjadi aliran banjir bandang, mengingat beda tinggi yang terlalu drastis dan mekanisme aliran yang sangat cepat dan dalam waktu singkat berbeda dengan aliran sungai pada umumnya.



Gambar 9. Kejadian Banjir Bandang di Desa Bangga, Kecamatan Dolo Selatan Sigi pada 16 November 2018 (<https://tacigi.lelemuku.com/2018/11/danrem-132tadulako-tinjau-banjir.html>)

## Jatuhan Batu dan Longsoran

Jatuhan batu dan longsoran umumnya terjadi pada konglomerat dan batupasir, setempat batulempung karbonatan Formasi Pakuli dan Batugamping koral, breksi koral, napal (Gambar 10). Longsor dan jatuhan batu ini banyak terjadi pada ruas jalan Palu – Toli-Toli di dekat sumber gempa bumi.

Dampak bencana gerakan tanah ini adalah 6 (enam) orang meninggal karena mobil tertimbun longsor (Gambar 11). Jalur jalan Palu – Sirenja – Toli-toli jika hujan rawan dan tertimbun longsor serta potensi longsor susulan masih tinggi.



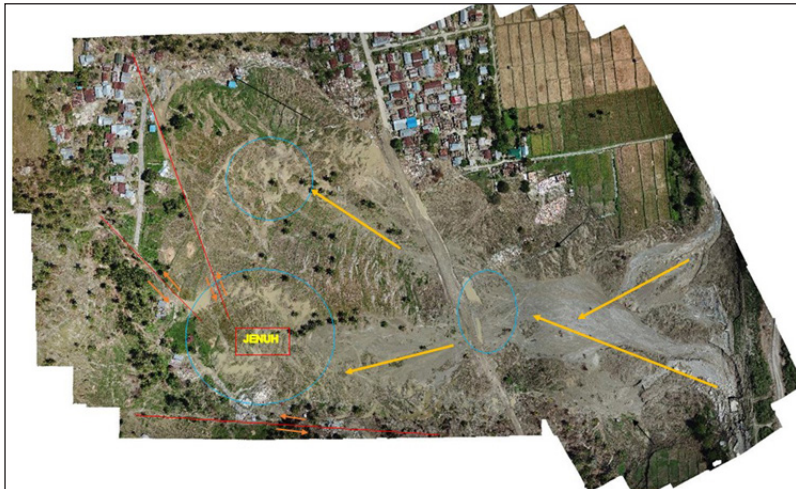
Gambar 10. Potensi longsor susulan dan jatuhan batu yang membahayakan pengguna jalan pada ruas jalan Palu – Toli-Toli



Gambar 11. Mobil yang tertimbun material longsor serta jatuhan batu yang menyebabkan enam orang meninggal dunia

## Kombinasi Likuifaksi, Getaran Gempa dan Gerakan Tanah

Pada daerah likuifaksi yang masif di Balaroa terlihat kombinasi antara guncangan gempabumi, likuifaksi dan gerakan tanah. Kenampakan seperti mahkota longsor/gawir di bagian atas, serta menunjukkan gerakan tanah yang berjenjang seperti progradasi, hal ini kemungkinan gempabumi memicu likuifaksi kemudian terjadi gerakan tanah disamping dikontrol oleh sesar-sesar yang ada di Balaroa.



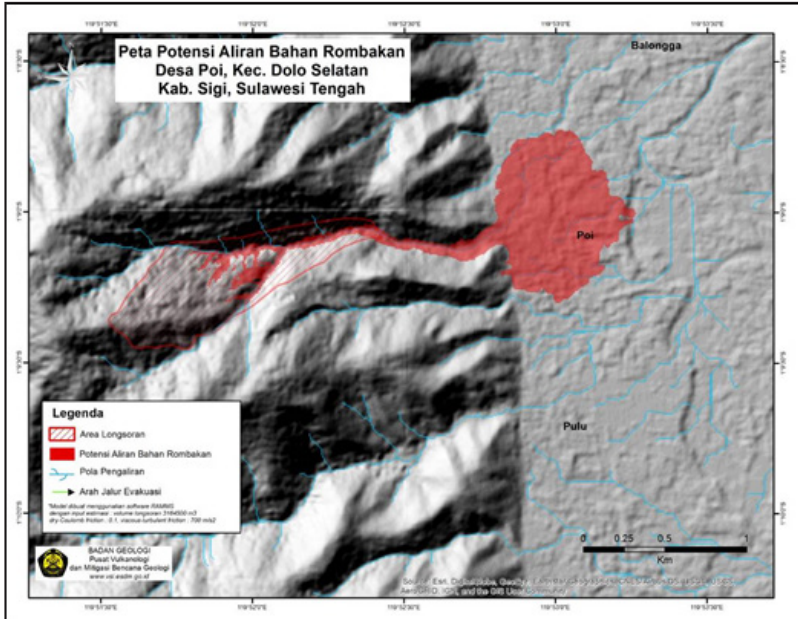
Gambar 12 Interpretasi mekanisme pergerakan debris flow berdasarkan foto udara yang diambil menggunakan drone di Desa Sibalaya Selatan, Kecamatan Tanambulava, Kabupaten Sigi

Likuifaksi terjadi Kota Palu (Balaroa, Petobo), Kabupaten Sigi (Jono Oge dan Sibalaya). Daerah likuifaksi juga di Petobo dan Sibalaya berkembang menjadi aliran (Gambar 12). Hal ini karena longsor juga terjadi pada tanggul sehingga likuifaksi menjadi lebih masif.



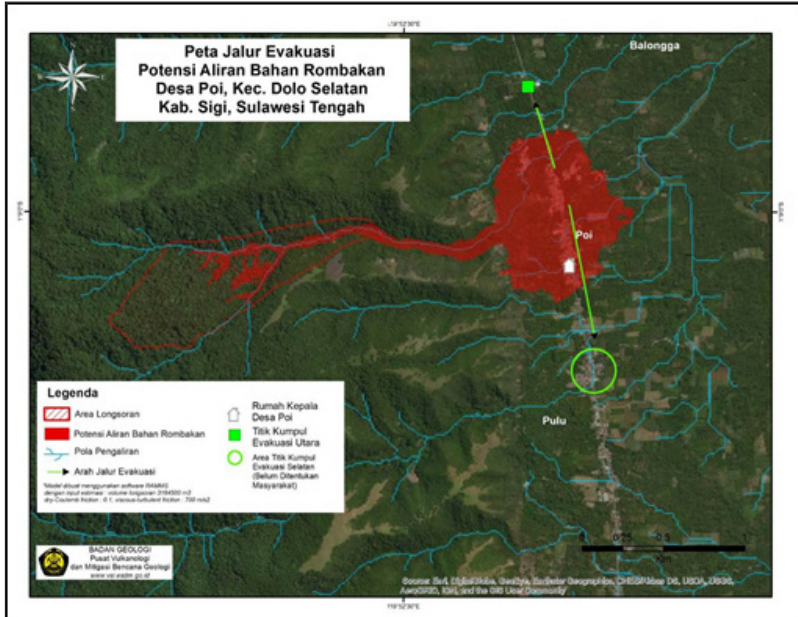
# Hasil Pemodelan Banjir Bandang

Hasil pemodelan banjir bandang dengan menggunakan RAMMS, estimasi volume material longsor dihitung atas dasar luas longsor dan ketebalan rata-rata material longsor berkisar 3164500 m<sup>3</sup>, dengan *dry couloum friction* berkisar 0.1 dan *viscous turbulent friction* 700 m/s<sup>2</sup>.



Gambar 13. Peta Hasil Pemodelan Banjir Bandang dengan menggunakan RAMMS Desa Poi, Kec. Dolo Selatan, Kab. Sigi Overlay dengan Hillshade DEM

Hasil pemodelan tersebut menunjukkan bahwa pemukiman di Desa Poi, berpotensi terdampak aliran banjir bandang jika curah hujan tinggi (Gambar 13 dan 14). Hasil pemodelan tersebut telah disosialisasikan ke masyarakat dan BNPB sebagai langkah antisipasi jika terjadi banjir bandang sebagai upaya pengurangan risiko bencana (Gambar 15).



Gambar 14. Peta Jalur Evakuasi Desa Poi, Kec. Dolo Selatan, Kab. Sigi

Dengan demikian, secara keseluruhan, pasca gempa bumi Palu potensi bencana susulan longsor dan banjir bandang jika dipicu hujan masih tinggi. Hal ini karena masih banyak potensi longsor yang masih menggantung di lereng, hulu sungai dan retakan-retakan jika terisi oleh air akan mengakibatkan potensi longsor susulan. Dampaknya jika hujan deras material longsor tersebut akan turun. Longsoran-longsorannya di bagian hulu bisa berkembang menjadi aliran bahan rombakan.

Berdasarkan analisis morfologi banyak ditemukan kipas aluvial, tetapi tingkat aktif tidaknya kipas aluvial ini perlu diteliti lebih lanjut. Keberadaan kipas aluvial ini perlu dilakukan antisipasi mengingat potensi aliran bahan rombakan yang tinggi pada kipas aluvial apalagi peringatan di daerah kipas



Gambar 15. Suasana Sosialisasi Potensi Bencana Banjir Bandang bersama Sekretaris Daerah Kab. Sigi, BNPB, BPBD Kab. Sigi, BMKG Palu, Kepolisian, TNI, dan aparat pemerintahan Desa Poi.

aluvial menjadi permasalahan tersendiri mengingat durasi dan waktunya sangat cepat.

Berdasarkan hasil kajian geologi mengingat ancaman yang ada saat ini ada beberapa saran yang dapat diajukan. *Pertama*, pengguna jalan harap hati-hati dan waspada terutama pada saat dan setelah hujan karena masih berpotensi longsor susulan terutama pada jalur Palu – Toli Toli.

*Kedua*, material longsor yang berdekatan dengan jalan atau lalu lintas dam masih menggantung sebaiknya diturunkan. *Ketiga*, dilakukan penguatan lereng (*rock* atau *soil trap*) agar material longsor tidak berdampak langsung ke badan jalan. *Keempat*, segera dilakukan normalisasi aliran pada alur yang tertutup material longsor untuk menghindari terjadinya jebolnya material longsor secara tiba-tiba. Namun, dengan memperhatikan keselamatan jiwa dan kondisi cuaca.

*Kelima*, monitoring yang melibatkan warga dan aparat pemerintah setempat untuk mengamati perkembangan material longsor dan retakan. *Keenam*, koordinasi dengan BMKG terutama prediksi cuaca ke depan di sekitar lokasi

penumpukan material longsoran. *Ketujuh*, membuat lokasi pengungsian dan titik kumpul yang menjauh dari potensi aliran bahan rombakan. Titik kumpul dan jalur evakuasi yang paling aman adalah mengarah ke selatan dari Desa Poi atau menuju Desa Pulu pada lokasi yang lebih tinggi dan jauh dari alur atau mulut lembah.

*Kedelapan*, jika cuaca mendung dan akan turun hujan, agar masyarakat mengungsi ke tempat pengungsian. Karena selain tumpukan material akibat longsoran, ditemukan juga retakan. Retakan tersebut segera ditutup dan dipadatkan untuk mengurangi meresapnya air ke dalam retakan. *Kesembilan*, meningkatkan sosialisasi kepada masyarakat untuk dapat lebih mengenal tanda-tanda awal gerakan tanah dan banjir bandang, seperti terjadinya retakan, perubahan warna dan volume air pada alur air atau mata air, munculnya mata air baru, dan getaran-getaran yang sifatnya lokal.

*Kesepuluh*, masyarakat dihimbau agar selalu mengikuti arahan pemerintah dalam menghadapi ancaman bencana gerakan tanah dan banjir bandang (aliran bahan rombakan).

*\*Sumaryono, Yohandi K,  
Yunara D.T, Iqbal E. Putra,  
Imam Santosa, Anjar H, Syatrin  
bekerja di Pusat Vulkanologi  
dan Mitigasi Bencana Geologi*





# Menyelidiki Potensi Likuifaksi

Oleh

**Risna Widyaningrum  
Taufiq Wira Buana  
Ginda Hasibuan**

*“Daerah bermuka air tanah dangkal dan berpotensi terjadinya likuifaksi berada pada wilayah Ujuna, Besusu, Palupi, Sunju, Binangga, Sibeli, Langaleso, Kalukubula, Petobo dan Jonpoye”.*

Likuifaksi merupakan gejala peluluhan pasir lepas yang bercampur dengan air akibat guncangan gempa di mana gaya pemicu melebihi gaya yang dimiliki litologi setempat dalam menahan guncangan. Hal ini bisa menyebabkan beberapa kejadian seperti penurunan cepat (*quick settlement*), pondasi bangunan menjadi miring (*tilting*) atau penurunan sebagian (*differential settlement*), dan mengeringnya air sumur yang tergantikan oleh material nonkohesif. Dalam konteks penyelidikan potensi likuifaksi di daerah Palu dan sekitarnya diperlukan upaya membuat mikrozonasi potensi likuifaksi dan memperkirakan akibat likuifaksi terhadap infrastruktur.

Dari sudut pandang kebumihan, bentang alam Kota Palu dapat dibagi menjadi dua satuan, yaitu morfologi dataran dan morfologi perbukitan. Morfologi datarannya berupa topografi tidak teratur, lemah, merupakan wilayah dengan banjir musiman, dasar sungai umumnya meninggi akibat sedimentasi fluvial. Morfologi ini disusun oleh material utama berupa aluvial sungai dan pantai dengan bentukan morfologi berupa dataran dan kemiringan lereng 0-5 %. Wilayah tengah Kota Palu didominasi oleh satuan geomorfologi ini.

Sementara itu, morfologi perbukitannya berupa morfologi bergelombang lemah sampai bergelombang kuat. Wilayah kipas aluvial (*aluvial fan*) termasuk dalam satuan morfologi ini. Bentuk morfologinya berupa perbukitan ber relief halus dengan kemiringan lereng 5-15 %. Di wilayah Palu morfologi

ini meluas di wilayah Palu Timur, Palu Utara, membatasi antara wilayah morfologi dataran dengan morfologi pegunungan.

Berdasarkan *Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Skala 1:250.000* (Rab Sukamto, dkk, 1973) daerah penyelidikan terdiri dari 2 (dua) Formasi batuan, yaitu Aluvium dan endapan pantai (Qap) dan Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms).

Aluvium dan endapan pantai (Qap) terdiri dari kerikil, pasir, lumpur, dan batugamping koral. Terbentuk dalam lingkungan sungai, delta, dan laut dangkal merupakan sedimen termuda di daerah ini. Endapan itu boleh jadi seluruhnya berumur Holosen. Di daerah dekat Labea dan Tombo terumbu koral membentuk bukit-bukit rendah. Kondisi batuan pada Formasi ini umumnya berupa material yang belum mengalami kompaksi.

Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms), batuan ini terdapat pada ketinggian lebih rendah pada sisi-sisi kedua pematang, menindih secara tidak selaras Formasi Tinombo dan Kompleks batuan metamorf, mengandung rombakan yang berasal dari formasi-formasi lebih tua dan terdiri dari konglomerat, batupasir, batulumpur, batugamping koral, dan napal yang semuanya hanya mengeras lemah. Di dekat Kompleks batuan metamorf pada bagian barat pematang timur endapan itu terutama terdiri dari bongkah-bongkah kasar dan agaknya diendapkan di dekat sesar. Batuan-batuan itu ke arah laut beralih-alih jadi Sebatuan klastika berbutir lebih halus.

Di dekat Donggala sebelah utara Enu dan sebelah barat Labea batuanannya terutama terdiri dari batugamping dan napal mengandung *Operculina sp*, *Cycloclypeus sp*, *Rotalia sp*, *Orbulina universa*, *Amphistegina sp*, *Miliolidae*, *Globigerina*, Foraminifera pasiran, ganggang gampingan, *pelesipoda*, dan *gastropoda*. Sebuah contoh yang diambil dari tenggara Laebago

selain fosil-fosil tersebut mengandung *Miogypsina sp* dan *Lepidocyclina sp* yang menunjukkan umur Pliosen – Plistosen (Rab Sukamto dkk, 1973)

Berdasarkan hasil analisis geologi teknik, maka daerah penyelidikan dibagi menjadi 2 satuan geologi teknik, yaitu satuan Aluvium dan endapan pantai (Qap) dan Satuan Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms)

Satuan Aluvium dan endapan pantai (Qap). Pada daerah yang dibentuk oleh endapan aluvium, lapisan tanah umumnya terdiri dari pasir di bagian atas, lanau di bagian tengah dan lempung di bagian bawah. Pasir berwarna abu-abu, lepas, pemilahan jelek, porositas baik, permeabilitas baik dengan ketebalan 1 – 7,2 m, lanau dijumpai di bawah pasir berwarna coklat – abu-abu, lunak – teguh, plastisitas sedang, dengan ketebalan 0,2 – 0,7 m, sedangkan lempung berwarna coklat – coklat tua, lunak – teguh, plastisitas tinggi dengan tebal bervariasi antara 0,1 – 2,7 m. Kedalaman muka air tanah berkisar antara 0,5 – 16 m di bawah muka tanah.

Tekanan konus pada lapisan pasir berkisar antara 9,73 – 133 kg/cm<sup>2</sup>, tebal 0,1 – 7,2 m, lanau memiliki nilai tekanan konus 17 – 22 kg/cm<sup>2</sup>, dan lempung nilai tekanan konusnya 5 – 12 kg/cm<sup>2</sup>.

Hasil analisa laboratorium mekanika tanah dari contoh pasir memiliki berat jenis  $G_s = 2,682 - 2,770$ , berat isi  $\gamma_t = 1,494 - 1,868$  g/cm<sup>3</sup>, kadar air natural  $w_n = 4,78 - 18,99$  %, grup simbol SW, SM, SC, SP, kohesi  $c = 0,000 - 0,100$  kg/cm<sup>2</sup>, sudut geser dalam  $\phi = 22,90 - 39,38^\circ$ . Nilai daya dukung yang diijinkan pada Formasi ini berkisar antara 10,958 – 60,767 ton/m<sup>2</sup>.

Hasil analisa laboratorium mekanika tanah dari contoh lanau memiliki berat jenis  $G_s = 2,697 - 2,773$ , berat isi  $\gamma_t =$



1,578 - 1,902 g/cm<sup>3</sup>, kadar air natural  $w_n = 4,34 - 36,71$  %, grup simbol ML, MH, kohesi  $c = 0,000 - 0,152$  kg/cm<sup>2</sup>, sudut geser dalam  $\phi = 21,94 - 40,03^\circ$ . Nilai daya dukung yang diijinkan pada Formasi ini berkisar antara 7,717 - 18,493 ton/m<sup>2</sup>.

Hasil analisa laboratorium mekanika tanah dari contoh lempung memiliki berat jenis  $G_s = 2,687 - 2,777$ , berat isi  $\gamma_t = 1,500 - 1,950$  g/cm<sup>3</sup>, kadar air natural  $w_n = 9,98 - 27,79$  %, grup simbol CL, kohesi  $c = 0,044 - 0,173$  kg/cm<sup>2</sup>, sudut geser dalam  $\phi = 21,94 - 28,47^\circ$ . Nilai daya dukung yang diijinkan pada Formasi ini berkisar antara 9,944 - 18,744 ton/m<sup>2</sup>.

Satuan Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms). Tanah pelapukan pada Formasi ini umumnya berupa pasir berwarna abu-abu, lepas, pemilahan baik, porositas baik, permeabilitas baik dengan ketebalan 3,5 m. Kedalaman muka air tanah umumnya dalam, yaitu 16 m di bawah muka tanah. Berdasarkan uji sondir nilai tekanan konus 8,87 - 133 kg/cm<sup>2</sup>.

Hasil analisa laboratorium mekanika tanah dari contoh lempung endapan aluvial antara lain berat jenis  $G_s = 2,716$ , berat isi  $\gamma_t = 1,535$  g/cm<sup>3</sup>, kadar air natural  $w_n = 6,19$  %, grup simbol SW, kohesi  $c = 0,000$  kg/cm<sup>2</sup>, sudut geser dalam  $\phi = 40,03^\circ$ . Nilai daya dukung yang diijinkan pada Formasi ini adalah kurang dari 58,6708 ton/m<sup>2</sup>.

## **Indeks potensi Likuifaksi, Prediksi penurunan dan Perpindahan Lateral**

Indeks potensi likuifaksi (LPI) yang mengacu pada formula T. Iwasaki (*"Soil Liquefaction Studies in Japan: State of The Arts"*, 1986) yang menyebutkan likuifaksi akan terjadi hingga kedalaman 20 meter di bawah permukaan tanah. Indeks potensi likuifaksi merupakan integrasi dari fungsi faktor

keamanan dan kedalaman litologi yang terlikuifaksi.

$$LPI = \int_0^D W(z) dz$$

Jika faktor keamanan ( $F_L$ ) < 1 maka  $F = 1 - F_L$  dan jika  $F_L > 1$  maka  $F = 0$ . Menurut Iwasaki (1986), klasifikasi LPI terhadap resiko potensi likuifaksi adalah sebagai berikut:

Tabel 5.1 Nilai LPI daerah penyelidikan berdasarkan klasifikasi Iwasaki (1986)

LPI	Potensi Likuifaksi
LPI = 0	Sangat Rendah
LPI < 5	Rendah
5 < LPI < 15	Tinggi
LPI > 15	Sangat Tinggi

Perhitungan probabilitas di daerah penyelidikan merupakan hasil dari PGA maksimum dengan periode ulang 50 tahun. Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa potensi likuifaksi rendah cenderung terletak di bagian barat laut dan selatan daerah penyelidikan, potensi tinggi cenderung melingkupi sebagian besar daerah penyelidikan sedangkan potensi sangat tinggi terletak di bagian utara dan tengah daerah penyelidikan. Peta potensi likuifaksi pada saat nilai PGA 1 g dan 1,2 g.

Salah satu efek likuifaksi pada bangunan konstruksi adalah penurunan dan perpindahan lateral tanah. Proses penurunannya terdapat sembilan tipe sebagaimana digambarkan pada gambar 4-4 oleh Zhang drr, 1998 dalam R.B. Seed dan kawan-kawan (*“Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Respond Evaluation,”* 2001) sedangkan perpindahan lateral memiliki tiga tipe (Seed, 2001) seperti disajikan pada gambar



Tabel 5.2. Nilai LPI dan probabilitas 50 tahun tiap lokasi pengujian sondir

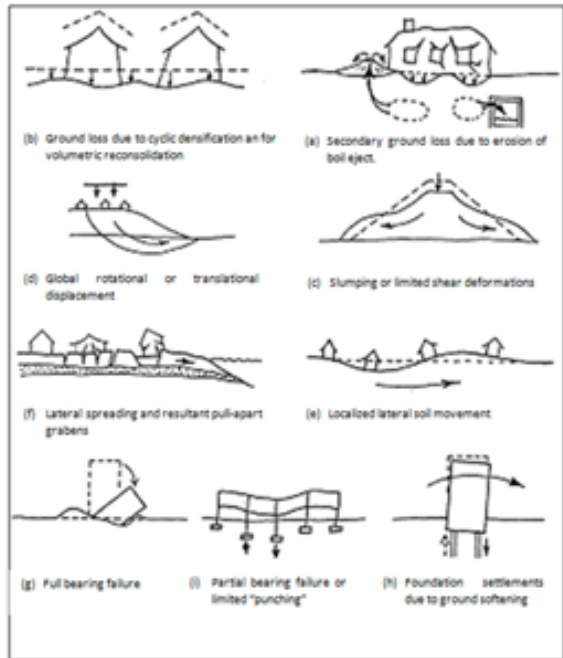
Kode	Lokasi	X	Y	PGA			
				LPI	Probabilitas (%)	LPI	Probabilitas (%)
				1 g		1,2 g	
S-01	Kalukubula	119° 53' 08,9"	00° 57' 20,6"	25,22	91,72	26,11	93,09
S-02	Lolu	119° 54' 58,2"	00° 57' 17,00"	4,46	10,72	5,26	12,51
S-03	Besusu	119° 52' 51,6"	00° 53' 13,3"	4,96	11,81	5,74	13,69
S-04	Talise	119° 53' 54,9"	00° 52' 54,9"	13,32	45,31	14,16	49,87
S-05	Birobuli	119° 53' 52,7"	00° 54' 39,8"	31,14	97,58	32,94	98,35
S-06	Tatura	119° 52' 18,3"	00° 54' 56,9"	18,14	70,3	19,86	75,51
S-07	Besusu Tengah	119° 52' 17,8"	00° 53' 20,1"	3,37	8,64	4,65	11,11
S-08	Kalukubula	119° 57' 17,4"	00° 57' 17,4"	4,14	10,06	4,47	10,74
S-09	Dolo, Kotarinau	119° 52' 41,3"	00° 58' 46,7"	3,94	9,68	4,44	10,68
S-10	Kotapulu	119° 52' 19,6"	00° 59' 44,7"	0,61	4,93	0,81	5,14
S-11	Baliase	119° 51' 55,6"	00° 56' 32,5"	10,3	29,99	11,43	35,42
S-12	Sunju	119° 52' 31,2"	00° 57' 02,2"	13,2	44,88	15,63	57,81
S-13	Bayaoge	119° 51' 14,7"	00° 54' 32,9"	7,48	18,81	8,62	22,91
S-14	Tatura	119° 52' 42,6"	00° 54' 47,8"	2,82	7,75	2,97	7,99
S-15	Lolu Selatan	119° 54' 09,7"	00° 52' 15,9"	2,82	7,75	2,97	7,99
S-16	Besusu Barat	119° 51' 50,8"	00° 53' 37,5"	3,97	9,73	4,55	10,9
S-17	Tatura	119° 52' 54,4"	00° 55' 29,1"	25,05	91,45	26,51	93,62
S-18	Birobuli	119° 54' 07,6"	00° 55' 10,7"	29,33	96,45	30,99	97,5
S-19	Talise	119° 52' 15,7"	00° 52' 56,8"	13,74	47,6	14,68	52,69
S-20	Lolu	119° 52' 52,7"	00° 53' 53,5"	18,86	73,5	20,04	78,2
S-21	Tanamodindi	119° 53' 26,8"	00° 53' 55,7"	5,3	12,61	5,92	14,16
S-22	Birobuli Utara	119° 53' 36,0"	00° 55' 17,5"	3,19	8,34	3,49	8,83
S-23	Lasoani	119° 54' 20,7"	00° 54' 10,6"	12,61	41,52	14,12	49,64
S-24	Kawatuna	119° 55' 07,9"	00° 54' 56,0"	22,75	86,62	24,54	90,52
S-25	Kalukubula	119° 53' 19,3"	00° 56' 21,4"	15,48	57,01	16,19	60,77
S-26	Petobo	119° 54' 05,0"	00° 56' 24,5"	13,5	46,27	14,3	50,65
S-27	Kamoji	119° 51' 20,9"	00° 53' 43,6"	1,99	6,53	2,39	7,11
S-28	Lere	119° 51' 33,5"	00° 53' 25,1"	18,84	73,4	20,39	79,47
S-29	Tatura	119° 53' 19,4"	00° 55' 43,2"	19,41	75,75	20,33	79,27
S-30	Birobuli Selatan	119° 53' 45,4"	00° 55' 49,6"	21,21	82,22	22,53	86,05

dibawah ini

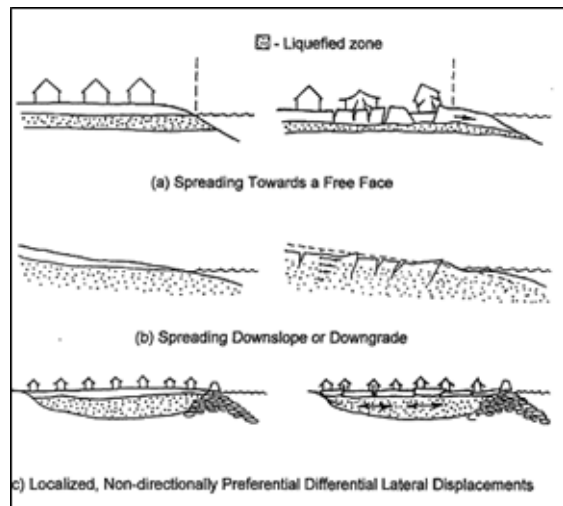
Menurut G. Zhang dan kawan-kawan (*“Estimating Liquefaction-induced Lateral Displacement Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test”*, 2004), analisis dalam prediksi perpindahan lateral terdapat tiga tahapan, yaitu menentukan lapisan yang terlikuifaksi yang dalam hal ini menggunakan data sondir; menentukan nilai indeks perpindahan lateral (LDI); dan menentukan perpindahan lateral (LD).

Hasil perhitungan penurunan dan perpindahan lateral pada kondisi PGA 1 g dan 1,2 g disajikan pada tabel 3 sedangkan peta sebarannya dapat dilihat pada lampiran 8.

Gambar 2. Tipe penurunan akibat likuifaksi  
Zhang drr, 1998  
dalam Seed, (2001)



Gambar 3. Tipe perpindahan lateral akibat likuifaksi  
(Seed, 2001)



Tabel 5.3. Nilai penurunan dan perpindahan lateral tiap lokasi pengujian sondir

Kode	Lokasi	X	Y	1 g		1,2 g	
				Penurunan (cm)	Perpindahan (cm)	Penurunan (cm)	Perpindahan (cm)
PGA							
S-01	Kalukubula	119° 53' 08,9"	00° 57' 20,6"	9,99	32,18	9,99	32,18
S-02	Lolu	119° 54' 58,2"	00° 57' 17,00"	1,39	12,36	1,46	14,81
S-03	Besusu	119° 52' 51,6"	00° 53' 13,3"	1,66	9,25	1,7	10,6
S-04	Talise	119° 53' 54,9"	00° 52' 54,9"	2,38	10,71	2,38	10,71
S-05	Birobuli	119° 53' 52,7"	00° 54' 39,8"	2,97	17,74	2,97	18,01
S-06	Tatura	119° 52' 18,3"	00° 54' 56,9"	2,02	6,89	2,14	7,33
S-07	Besusu Tengah	119° 52' 17,8"	00° 53' 20,1"	1,38	9,01	1,59	9,74
S-08	Kalukubula	119° 57' 17,4"	00° 57' 17,4"	0	0	0	0
S-09	Dolo, Kotarinau	119° 52' 41,3"	00° 58' 46,7"	0	0	0	0
S-10	Kotapulu	119° 52' 19,6"	00° 59' 44,7"	0	0	0	0
S-11	Baliase	119° 51' 55,6"	00° 56' 32,5"	1,07	8,18	1,12	8,62
S-12	Sunju	119° 52' 31,2"	00° 57' 02,2"	2,33	13,81	2,5	17,26
S-13	Bayaoge	119° 51' 14,7"	00° 54' 32,9"	0,59	7,2	0,72	10,29
S-14	Tatura	119° 52' 42,6"	00° 54' 47,8"	0,92	6,82	0,92	6,82
S-15	Lolu Selatan	119° 54' 09,7"	00° 52' 15,9"	0,92	6,82	0,92	6,82
S-16	Besusu Barat	119° 51' 50,8"	00° 53' 37,5"	0,96	3,99	1,05	4,21
S-17	Tatura	119° 52' 54,4"	00° 55' 29,1"	2,04	11,87	2,04	11,87
S-18	Birobuli	119° 54' 07,6"	00° 55' 10,7"	2,47	9,09	2,48	9,09
S-19	Talise	119° 52' 15,7"	00° 52' 56,8"	0,94	1,82	0,94	1,82
S-20	Lolu	119° 52' 52,7"	00° 53' 53,5"	1,65	5,46	1,65	5,46
S-21	Tanamodindi	119° 53' 26,8"	00° 53' 55,7"	0,46	0	0,46	0
S-22	Birobuli Utara	119° 53' 36,0"	00° 55' 17,5"	0	0	0	0
S-23	Lasoani	119° 54' 20,7"	00° 54' 10,6"	1,16	9,27	1,26	10,06
S-24	Kawatuna	119° 55' 07,9"	00° 54' 56,0"	2,33	20,47	2,34	20,47
S-25	Kalukubula	119° 53' 19,3"	00° 56' 21,4"	0	0	0	0
S-26	Petobo	119° 54' 05,0"	00° 56' 24,5"	0,75	6,82	0,75	6,82
S-27	Kamoji	119° 51' 20,9"	00° 53' 43,6"	0,12	0,53	0,16	1,71
S-28	Lere	119° 51' 33,5"	00° 53' 25,1"	1,55	7,78	1,55	7,78
S-29	Tatura	119° 53' 19,4"	00° 55' 43,2"	0,41	0	0,41	0
S-30	Birobuli Selatan	119° 53' 45,4"	00° 55' 49,6"	0,49	2,36	0,54	3,53

## Potensi Likuifaksi terhadap Tata Guna Lahan

Hasil perhitungan LPI, penurunan tanah dan perpindahan lateral secara kuantitatif menghasilkan 3 kategori potensi likuifaksi setelah dilakukan interpolasi Kriging. Kategori tersebut dibedakan berdasarkan klasifikasi Iwasaki (1986) yang menggunakan nilai LPI sebagai acuan, yaitu:

### Potensi sangat tinggi

Probabilitas untuk periode ulang 50 tahun adalah sebesar lebih dari 54,44% yang terdapat pada lokasi S-01 (Kalukubula), S-05 (Birobuli), S-06 (Tatura), S-12 (Sunju), S-17 (Tatura), S-20 (Lolu), S-24 (Kawatuna), S-25 (Kalukubula), S-28 (Lere), S-29

(Tatura), S-30 (Birobuli Selatan) yang berpotensi mengalami penurunan tanah lebih dari 5 cm dan perpindahan lateral lebih dari 15 cm.

## **Potensi tinggi**

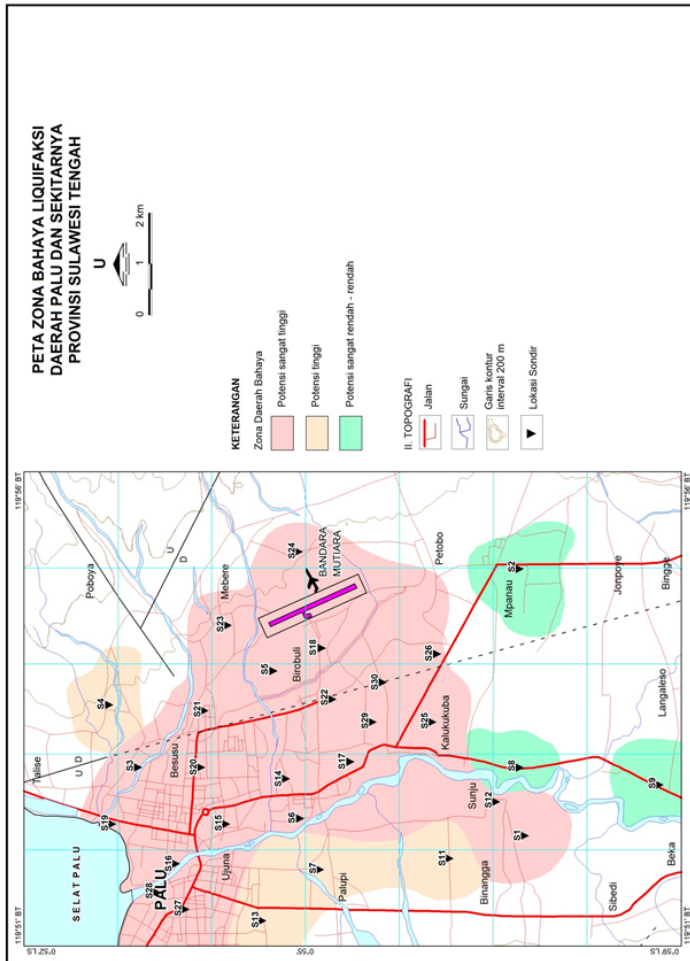
Probabilitas untuk periode ulang 50 tahun adalah sebesar 11,90% - 54,44% yang terdapat pada lokasi S-02 (Lolu), S-03 (Besusu), S-04 (Talise), S-13 (Bayaoge), S-19 (Talise), S-21 (Tanamodindi), S-23 (Lasoani), S-26 (Petobo), yang berpotensi mengalami penurunan tanah kurang dari 5 cm dan perpindahan lateral lebih dari 10 cm.

## **Potensi sangat rendah – rendah**

Probabilitas untuk periode ulang 50 tahun adalah sebesar kurang dari 11,90% yang terdapat pada lokasi S-07 (Besusu Tengah), S-08 (Kalukubula), S-09 (Dolo Kotarinau), S-10 (Kotapulu), S-11 (Baliase), S-14 (Tatura), S-15 (Lolu Selatan), S-16 (Besusu Barat), S-18 (Birobuli), S-22 (Birobuli Utara), S-27 (Kamoji) yang berpotensi mengalami penurunan tanah kurang dari 5 cm dan perpindahan lateral lebih dari 10 cm.

Dengan demikian, potensi likuifaksi di daerah penyelidikan secara kualitatif maupun kuantitatif menunjukkan sebagian besar berpotensi tinggi dengan nilai indeks potensi likuifaksi (LPI) antara 5 hingga 15. Dan likuifaksi akan menjadi masalah jika terjadi pada kawasan budidaya seperti area pemukiman, prasarana fisik dan industri. Masalah tersebut adalah efek penurunan dan perpindahan lateral tanah yang mengenai konstruksi bangunan fisik seperti tanah pondasi pada pemukiman, industri, jembatan dan sebagainya yang menurunkan tingkat kestabilannya.

Berdasarkan hasil tumpang susun antara peta tata guna lahan dengan kontur nilai LPI. Area pemukiman yang perlu diperhatikan adalah permukiman yang dilewati oleh kontur nilai LPI lebih dari 5 sebagaimana terlihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4. Peta tumpang susun antara peta tata guna lahan dengan kontur nilai LPI

Sebagai kesimpulannya, lapisan tanah daerah penyelidikan terdiri dari pasir di bagian atas, lanau di bagian tengah dan lempung di bagian bawah. Pasir berwarna abu-abu, lepas, pemilahan jelek, porositas baik, permeabilitas baik dengan ketebalan 1 – 7,2 m, lanau dijumpai di bawah pasir berwarna coklat – abu-abu, lunak – teguh, plastisitas sedang, dengan ketebalan 0,2 – 0,7 m, sedangkan lempung berwarna coklat – coklat tua, lunak – teguh, plastisitas tinggi dengan tebal bervariasi antara 0,1 – 2,7 m. Kedalaman muka air tanah berkisar antara 0,5 – 16 m di bawah muka tanah.

Kemudian dari hasil pengamatan muka air tanah dapat diketahui bahwa daerah penyelidikan yang mempunyai muka air tanah dangkal ( $< 12$  m) dan berpotensi terhadap terdinya likuifaksi berada pada wilayah Ujuna, Besusu, Palupi, Sunju, Binangga, Sibeli, Langaleso, Kalukubula, Petobo dan Jonpoye. Daerah penyelidikan sebagian besar memiliki potensi sangat tinggi terhadap likuifaksi, hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai indeks potensi likuifaksi (LPI) yang menunjukkan kisaran nilai  $> 15$ . Oleh karena itu, penataan ruang terhadap kawasan pemukiman, industri dan bangunan vital lainnya sebaiknya ditempatkan pada area yang memiliki indeks potensi likuifaksi (LPI)  $< 5$ .

*\*Risna Widyaningrum,  
Taufiq Wira Buana, Ginda Hasibuan  
bekerja di Pusat Air Tanah  
dan Geologi Tata Lingkungan.*



# **Mekanisme Bencana di Balaroa dan Petobo**

**Oleh**

**Taufiq Wira Buana, Wawan Hermawan,  
Wiyono, Ryan Nur Rahdiana**



*“Pengukuran mekanisme bencana yang lebih rinci perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan dapat digunakan sebagai dasar dalam memperkirakan potensi yang bisa saja terjadi lagi di Kota Palu dan Sigi”*

## **Balaroa**

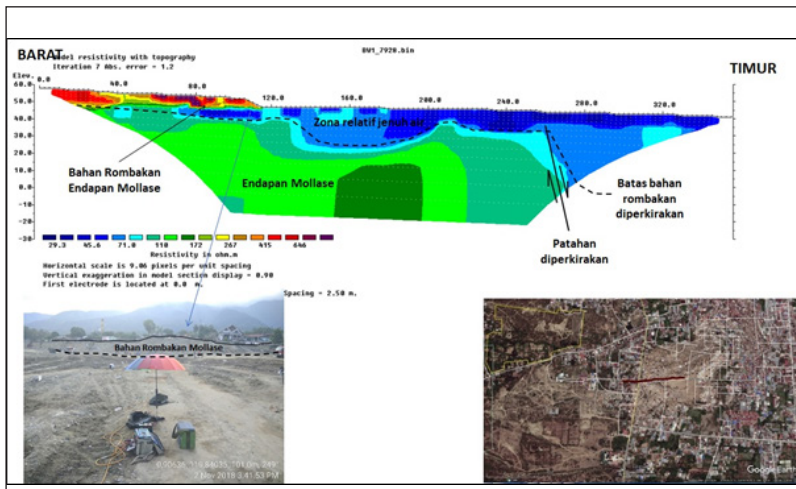
Balaroa merupakan bagian kipas aluvial yang tersusun atas bahan rombakan granit/granodiorit. Sedangkan pada bagian kaki lereng (*toe*) di atas bahan rombakan terdapat endapan rawa yang diperkirakan bagian dari *sag ponds* dan berbatasan langsung dengan patahan Palu Koro. Vegetasi khas endapan rawa ini adalah kelapa dan sagu yang melampar mengikuti arah sesar Palu Koro.

Berdasarkan data geolistrik (Gambar 1), bagian bawah diperkirakan sebagai endapan Mollase yang kemudian pada bagian atasnya terendapkan bahan rombakan granit/granodiorit akibat poses pembentukan kipas aluvial. Pada bagian ini, terdapat batas imajiner yang menunjukkan cekungan seperti bekas saluran-saluran (*channel*) ketika bahan rombakan tersebut terendapkan yang mengarah relatif ke arah timur laut dan memiliki kondisi relatif jenuh air. Semakin ke hilir, diperkirakan terdapat blok yang relatif turun akibat patahan dan terjadi penebalan material bahan rombakan di sekitar bidang patahan tersebut.

Bahan rombakan granit/granodiorit berupa material pasir kasar hingga kerikil dengan fragmen berupa granit berukuran hingga bongkah, belum padu (*unconsolidated material*), posisi fragmen acak dan terkesan mengambang pada matriknya, densitas sangat padat, secara visual memiliki kuat geser yang

cukup baik. Endapan rawa pada bagian atas terdiri dari lanau berwarna hitam dengan sedikit perselingan sisipan pasir halus, sangat lunak – lunak, plastisitas rendah. Ketebalan endapan rawa pada bagian hulu yang kontak dengan bahan rombakan dapat mencapai 6 m. Pada bagian bawah lanau hitam ini adalah pasir berwarna abu-abu, densitas renggang sampai medium, berbutir halus –sedang.

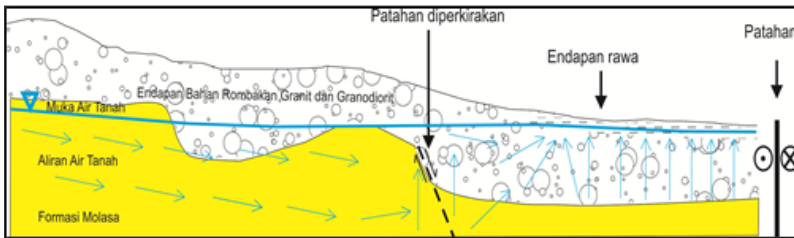
Muka air tanah di sekitar mahkota gerakan tanah sekitar lebih dari 13 m di bawah muka tanah sedangkan pada batas dengan endapan rawa sekitar 6 m di bawah muka tanah. Air tanah yang berbatasan dengan endapan rawa diperkirakan berada pada zona akuifer tertekan. Pada lokasi ini air bersifat artesis (Gambar 2) sehingga mulai titik ini terdapat tekanan air pori yang relatif tinggi hingga pada bagian kaki lereng di perumahan Balaroa yang hanya sekitar 1,5 m di bawah muka tanah. Gambaran kondisi awal daerah Balaroa dapat dilihat pada penampang Gambar 3.



Gambar 1 . Interpretasi hasil geolistrik di Balaroa



Gambar 2 . Sumber air artesis pada sumur pantek di kedalaman 6 m di bawah muka tanah

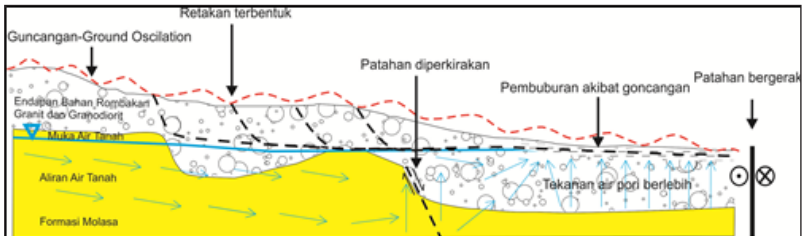


Gambar 3. Penampang kondisi awal Balara

Pada saat terjadi gempa bumi di Balara terdapat beberapa tahapan. *Pertama*, tahap awal terjadinya gerakan tanah diawali getaran yang kuat dari sumber gempa sesar Palu Koro pada bagian kaki lereng. *Kedua*, terjadi guncangan (*ground oscilation*) yang menyebabkan terbentuknya retakan-retakan permukaan. Pada waktu bersamaan, tekanan air pori yang pada awalnya sudah tinggi menyebabkan proses likuifaksi pada material pasir dan diperkirakan terjadi juga pada material yang berperilaku seperti sifat material pasir “sand

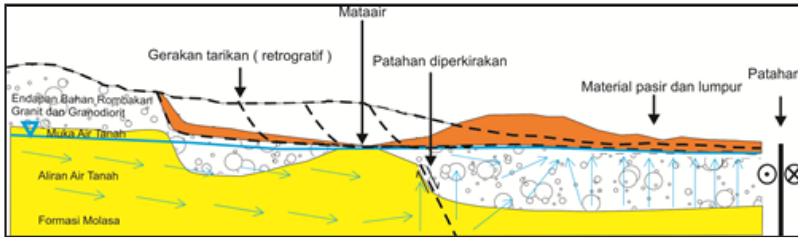
like” yaitu pada material lanau plastisitas rendah. Tekanan air pori berlebih akan mendorong material pasir dan lanau ke permukaan melalui retakan-retakan permukaan tersebut sehingga kestabilan lereng menjadi kritis.

*Ketiga*, kestabilan lereng akan terus turun hingga terjadi gerakan tanah yang diawali Bergeraknya material pada kaki lereng yang kemudian menarik bagian hulunya bahkan dapat menarik hingga bahan rombakan sejauh sekitar 1 km pada jeda waktu sangat singkat. Gambaran kondisi ketika terjadinya gempa bumi dapat dilihat pada penampang Gambar 4.



Gambar 4. Penampang ketika terjadi gempa bumi

Kemudian saat terjadi gerakan tanah yang dipicu oleh gempa bumi dan terjadi dalam jeda waktu yang singkat terjadi melalui proses sebagai berikut: Pertama, proses pergerakan material cenderung bersifat tarikan (retrogresif) dengan mekanisme rotasi dan translasi (Gambar 5). Arah gerakan tanah berdasarkan data geolistrik (Gambar 1) dikontrol oleh model morfologi litologi yang resisten. Sebagian besar gerakan tanah bergerak menuju timur laut secara rotasional kemudian berbelok ke arah selatan karena mengikuti pola cekungan atau saluran (*channel*) sungai purba. Adapun sebagian kecil blok di bagian timur berpindah secara translasi ke arah selatan karena pada bagian ini berada di luar saluran (*channel*) sungai purba.



Gambar 5. Penampang ketika terjadi gerakan tanah

*Kedua*, dampak gerakan tanah ini tidak hanya pada Balaroo tapi telah terjadi nendatan terutama pada bagian selatan lokasi hingga menuju jalan padanjakaya dengan arah gerakan tanah relatif menuju patahan Palu Koro.

## Petobo

Morfologi awal Petobo merupakan daerah landaian dengan kemiringan lereng sekitar  $3^{\circ}$  –  $4^{\circ}$  di sekitar bagian hulu sekitar saluran irigasi dan semakin landai ke arah hilir sekitar  $2^{\circ}$  –  $3^{\circ}$ . Litologi pada bagian hulu diperkirakan merupakan endapan aluvial yang belum padu dan mudah dihancurkan dengan tangan biasa. Endapan ini tersusun atas perselingan antara kerakal pasiran, pasir lanauan, dan pasir kerikilan sedangkan pada bagian atas berupa lanau pasiran (Gambar 6).

Lanau pasiran pada bagian atas berwarna coklat kehitaman, plastisitas rendah, konsistensi kaku sedangkan material pasir berukuran halus. Kerakal pasiran berwarna campuran abu-abu dan putih, densitas sangat padat, matrik berupa pasir kerikilan, terkesan ada struktur imbrikasi, fragmen berupa campuran batuan metasedimen dan kuarsit berbentuk relatif menyudut. Pasir lanauan berwarna abu-abu, densitas relatif renggang (*loose*), ukuran butir pasir halus sampai sedang



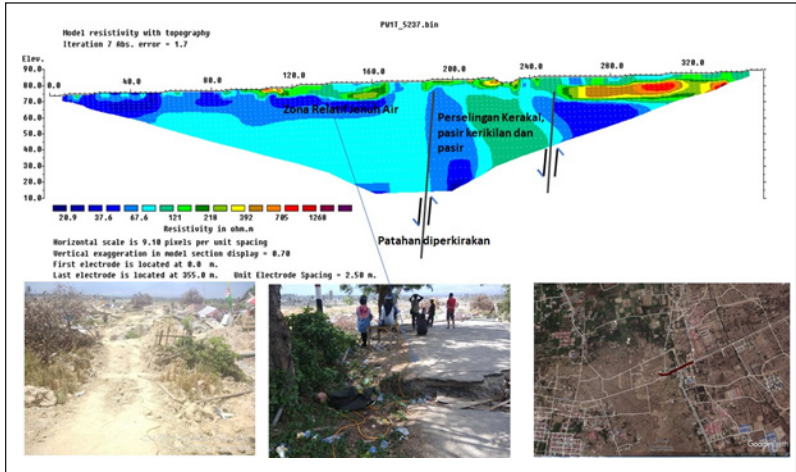
Gambar 6. Singkapan di sekitar tanggul irigasi

dan menghalus ke atas, beberapa terlihat laminasi pararel. Pasir kerikilan berwarna abu-abu, densitas medium sampai padat, fragmen kerikil dari batuan metasedimen dan kuarsit berbentuk menyudut.

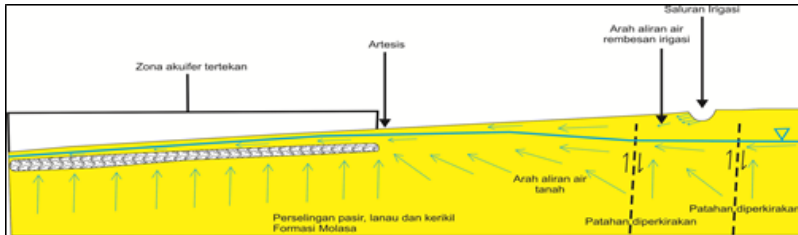
Kondisi air tanah di Petobo diperkirakan ada dua bagian yaitu sebagai bagian imbuhan (*recharge*) di bagian hulu dan bagian lepasan (*discharge*) di bagian hilir. Pada bagian imbuhan, muka air tanah dalam kondisi tunak (*steady state*) berada di kedalaman sekitar 60 m menurut informasi dari sumur pemboran di bagian hulu saluran irigasi. Berdasarkan data geolistrik (Gambar 7), dugaan patahan yang berada di sekitar lokasi Petobo menyebabkan air tanah terkonsentrasi pada lokasi tertentu dan dengan debit relatif tinggi. Selain itu, sumber air tanah yang lain diperkirakan berasal dari rembesan saluran irigasi. Informasi penduduk menyebitkan bahwa saluran irigasi sudah ada sekitar tahun 1978 dan hal ini diperkirakan proses infiltrasi sudah berlangsung sekitar 40 tahun.

Pada bagian dekat saluran irigasi di lokasi bencana Petobo, kedalaman muka air tanah dapat mencapai sekitar 12 m-15 m di bawah muka tanah dan diperkirakan akibat dominasi pengaruh dari rembesan irigasi. Pada bagian tengah lokasi bencana di Petobo, muka air tanah dapat mencapai 6 m di bawah muka tanah dan bersifat artesis berdasarkan data sumur penduduk. Pada bagian tengah diperkirakan sumber airtanah yang dominan adalah air tanah melalui retakan/patahan dibandingkan rembesan dari saluran irigasi bahkan semakin ke arah hilir muka air tanahnya mencapai ketinggian 1- 2 m di bawah muka tanah. Berdasarkan data tersebut maka gambaran awal dari kondisi awal Petobo seperti diilustrasikan pada Gambar 8.





Gambar 7. Interpretasi hasil geolistrik di Petobo



Gambar 8. Kondisi Awal Petobo

Pada saat gempa bumi seperti pada penampang (Gambar 9) yang terjadi adalah urutan tahapan sebagai berikut: *Pertama*, energi guncangan ketika terjadi perambatan gelombang menyebabkan tekanan air pori yang semula sudah tinggi menjadi tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*). Tekanan air pori berlebih ini mendesak dan merusak ikatan antar butiran pasir. Saat itu likuifaksi sudah terjadi pada bagian dalam dengan arah horisontal maupun vertikal.



*Kedua*, pada saat yang sama proses *ground oscilation* menciptakan retakan-retakan hingga menembus pada permukaan tanah. Kondisi ini memungkinkan air keluar bersama material pasir yang berasal dari tekanan air pori berlebih sehingga likuifaksi terjadi menuju permukaan tanah melalui retakan-retakan dan atau bidang lemah lainnya. *Ketiga*, lereng dalam keadaan kritis

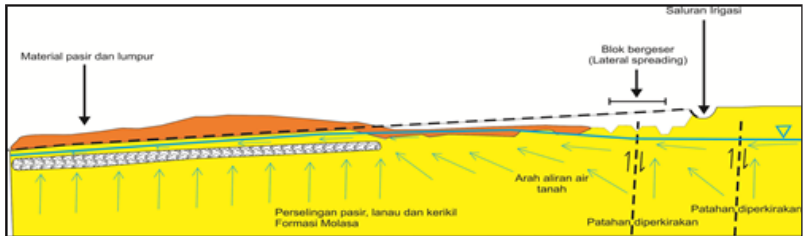


Gambar 9. Kondisi ketika terjadi gempa bumi

Setelah terjadinya gempa bumi dan atau bersamaan dengan itu keadaan tanah di bawah permukaan menjadi tidak stabil dan terjadi *lateral spreading*. Gambaran kondisi daerah Petobo, saat terjadinya *lateral spreading* dapat dilihat pada penampang Gambar 10.

Urutan kejadiannya dapat diterangkan sebagai berikut: *Pertama*, selang beberapa detik di akhir gempa bumi, lereng yang kritis menjadi tidak stabil dan terjadi pencaran lateral (*lateral spreading*) dengan pergerakan relatif horisontal ke bagian hilir yang relatif datar. Model pergerakan dominan meluncur dengan segmen/blok luncuran tergantung spasi antar retakan. Blok luncuran tersebut terkesan seperti bentukan tinggian (*horst*) dan rendahan (*graben*) seperti pada Gambar 11.

Kedua, kesan sembulan pada bagian hilir diperkirakan bukan karena bentuk *basement* tapi cenderung mengikuti morfologi permukaan yang berundulasi ketika *ground oscillation* sebagaimana dijumpai pada bagian samping dari bagian hilir lokasi bencana (Gambar 12)



Gambar 10. Sesaat ketika usai gempa bumi



Gambar 11. Bentukon tinggi dan rendahan akibat *lateral spreading* di dekat bagian mahkota

Dengan demikian, peristiwa pencaran lateral (*lateral spreading*) di lokasi Petobo diperkirakan merupakan satu kesatuan proses dan waktu yang sama dengan yang terjadi di Jonoooge dan Sibalaya. Mekanisme prosesnya diperkirakan juga



Gambar 12. Undulasi (tanah bergelombang) yang terjadi di sekitar bagian kaki (Toe) Petobo

memiliki tahapan yang sama. Dalam praktiknya, pada kajian konsep mekanisme ini lebih banyak menggunakan data-data secara visual dan beberapa data bawah permukaan. Ke depannya, beberapa pengukuran rinci perlu dilakukan guna memperoleh hasil yang lebih akurat dan dapat digunakan sebagai dasar dalam memperkirakan potensi yang dapat terjadi di Kota Palu dan Sigi di masa mendatang.

*\*Taufiq Wira Buana, Wawan Hermawan, Wiyono, Ryan Nur Rahdiana  
bekerja di Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan.*



# **PENATAAN RUANG BERBASIS BENCANA GEOLOGI**



# Mikrozonasi untuk Kota Palu

Oleh

**Soehaimi, Sri Hidayati  
dan Haunan Afif**

*“Peta mikrozonasi kerentanan bencana gempabumi merupakan dasar panduan mitigasi risiko bahaya gempabumi dalam penataan ruang Kota Palu”*

Kota Palu terletak di dalam wilayah benturan tiga lempeng tektonik aktif. Akibat benturan tersebut kota ini dan sekitarnya sering dilanda gempabumi merusak seperti terjadi pada 1938,1968, 1985, 2006, 2012 dan 2018.

Kondisi geologi menunjukkan kota ini dan sekitarnya ditutupi beberapa satuan batuan dari tua ke muda yakni batuan metamorfik dan batuan intrusi, endapan kolovium tua dan muda, endapan sungai Palu tua dan muda serta endapan muda alur Sungai Palu. Setiap unit batuan di daerah ini memiliki respon dinamika terhadap getaran gempabumi yang berbeda antara satu dengan lainnya.

Oleh karena itu, pemetaan dan penelitian potensi bencana gempabumi dengan menggunakan metodologi mikrotremor adalah solusi yang praktis dalam membuat peta mikrozonasi potensi bencana gempabumi, yang dapat digunakan sebagai data dasar dan informasi dalam perencanaan tata ruang kota berbasis potensi bencana gempabumi secara umum.

Mikrozonasi intensitas guncangan gempabumi untuk kawasan perkotaan dengan menggunakan metodologi mikrotremor telah dilakukan sebagai proyek percontohan untuk pertama kalinya di Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, dalam kerja sama teknis antara Badan Geologi dengan Georisk Project, BGR Jerman, pada tahun 2013.

## Konsep Dasar Mikrozonasi

Intensitas guncangan tanah (*ground shaking*) selama suatu kejadian gempa pada lokasi (*site*) tertentu tidak saja bergantung kepada besaran dan jarak pusat gempa, melainkan juga secara kuat dipengaruhi oleh kondisi geologi setempat. Di dekat permukaan, lapisan sedimen (endapan) dapat memperkuat gelombang seismik dan mengakibatkan guncangan yang lebih kuat jika dibandingkan dengan batuan keras di bawahnya.

Tujuan dari kajian mikrozonasi seismik adalah untuk membuat zona-zona berdasarkan perbedaan intensitas guncangan yang mungkin terjadi dengan menggunakan data kondisi tanah setempat. Data kondisi tanah tersebut dapat diperoleh dari berbagai metode seperti pengeboran, investigasi atau catatan gempa. Konsep mikrozonasi yang digunakan dalam kajian ini didasarkan kepada penggunaan data yang diperoleh dari survei mikrotremor.

Dua parameter paling penting yang menentukan reaksi di permukaan lapisan batuan yang lunak untuk guncangan tanah adalah ketebalan lapisan dan struktur kecepatan gelombang geser (*shear-wave velocity, Vs*). Kombinasi dari teknik mikrotremor (*single-station and array*) memungkinkan untuk memperkirakan kedua parameter tersebut. Reaksi untuk guncangan biasanya dinyatakan dengan bantuan fungsi perpindahan gelombang geser mendatar (*SH-transfer*). Fungsi ini menunjukkan suatu penguatan relatif dari guncangan sebagai fungsi dari frekuensi guncangan untuk struktur bawah permukaan tertentu (ketebalan lapisan dan kecepatan *Vs*).

Adapun penguatan yang disebabkan oleh lapisan tanah bergantung kepada frekuensi. Selain untuk memperkirakan seberapa besar kerusakan atas bangunan buatan manusia yang disebabkan oleh suatu guncangan gempa pada suatu lokasi



tertentu, peneliti juga harus memperhatikan tiga komponen berikut: (1) frekuensi spektrum gempa pada lokasi batuan keras (sumber spektrum); (2) ketergantungan frekuensi penguatan bawah tanah (efek setempat); dan (3) ketergantungan reaksi frekuensi bangunan terhadap guncangan.

Teknik mikrotremor dapat menyediakan informasi untuk komponen (2), yakni fungsi perpindahan gelombang geser mendatar (*SH-transfer function*). Peta mikrozonasi yang telah disusun sesuai dengan konsep yang digunakan dalam kajian ini tidak dapat memberikan informasi yang spesifik berkenaan dengan komponen (1) atau komponen (3), namun, dapat memberikan nilai relatif bahaya terkait dengan komponen (2).

Peta mikrozonasi memperlihatkan tingkat potensi bahaya untuk setiap lokasi (*site*) di daerah kajian sebagai nilai tunggal, bukan suatu rentang nilai. Dengan demikian, diperlukan penurunan suatu nilai penguatan rata-rata dari penguatan tertentu yang bergantung pada frekuensi. Dalam kaitan ini, komponen (1) dan komponen (3) juga dipertimbangkan.

Informasi berkenaan dengan ketiga komponen tersebut dapat diperoleh dari Kode Bangunan Indonesia, Standar Nasional Indonesia (SNI) 1727 (2012), dalam bentuk kelas lokasi dan rancangan respon spektrum (*design response spectra*). Dalam SNI tersebut, bentuk dan rancangan respon spektrum ditentukan berdasarkan kelas lokasi (*site class*), dan kelas lokasi ditentukan berdasarkan kecepatan gelombang geser pada 30 meter tanah bagian atas ( $V_{s30}$ ). Yang terakhir ini ( $V_{s30}$ ) dapat diperoleh dari data hasil survei mikrotremor.

Dalam konsep yang diuraikan di sini, SNI untuk rancangan respon spektrum digunakan sebagai fungsi pembobot untuk fungsi pemindah gelombang geser mendatar (*SH-transfer function*) sebelum nilai penguatan ditentukan. Di sinilah,

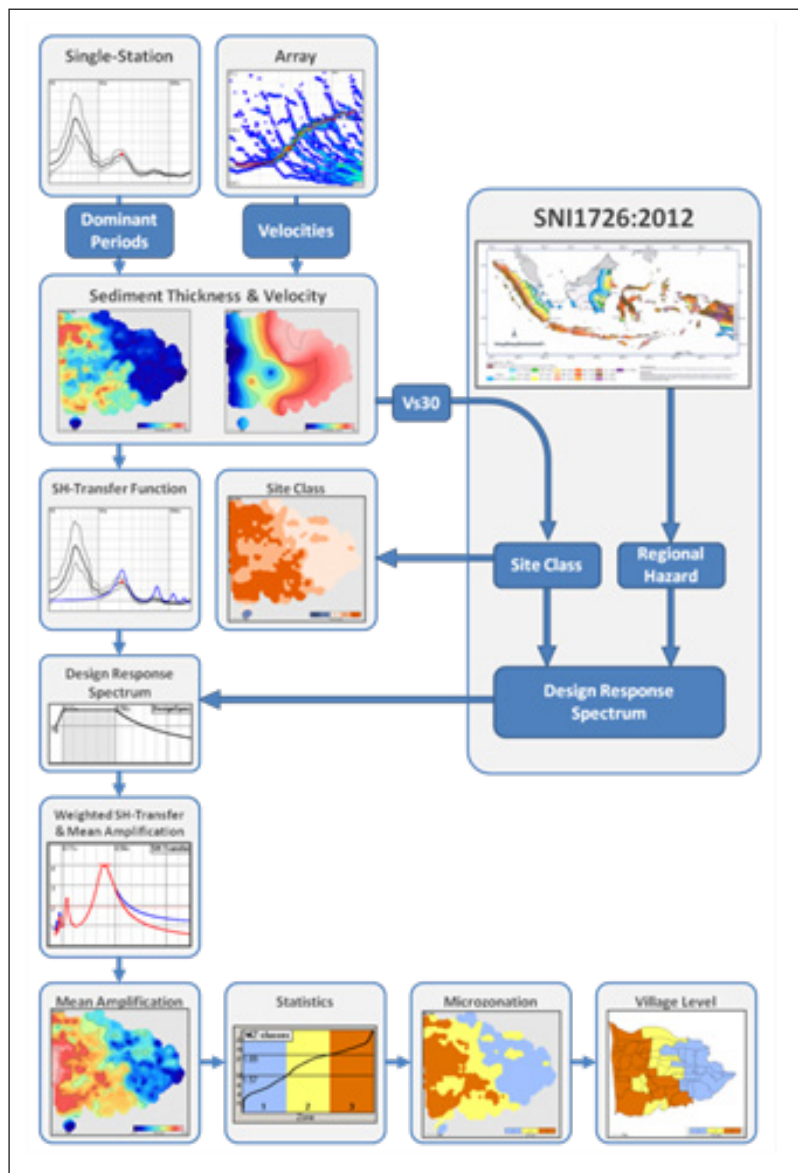
rancangan respon spektrum yang ditentukan oleh ahli teknik sipil (bangunan) sebagai standar untuk rancangan bangunan dan menentukan terapannya ke dalam peta mikrozonasi.

Alat mikrotremor memberikan informasi tentang struktur kecepatan dan ketebalan sedimen, sehingga  $V_{s30}$  dapat diperoleh. Juga, fungsi pemindahan gelombang geser mendatar dapat dihitung dari hasil pembacaan mikrotremor. Nilai  $V_{s30}$  selanjutnya digunakan untuk menentukan kelas lokasi sesuai SNI. Bersama-sama dengan nilai bahaya kegempaan secara umum yang diperoleh dari SNI untuk daerah penelitian, sehingga informasi kelas lokasi memungkinkan untuk perhitungan rancangan respon spektrum untuk setiap lokasi berdasarkan SNI.

Rancangan respon spektrum selanjutnya digunakan untuk membuat fungsi perpindah gelombang geser mendatar (*SH-transfer function*) sehingga dapat dihitung nilai penguatan rata-rata untuk setiap lokasi. Peta mikrozonasi disusun berdasarkan nilai penguatan rata-rata tersebut. Keseluruhan dari nilai-nilai tersebut dianalisis secara statistik dengan tujuan untuk membuat tiga kelas bahaya relatif, yaitu sebagaimana diwakili oleh warna biru, kuning, dan merah. Masing masing kelas tersebut menempati sekitar sepertiga dari keseluruhan luas daerah penyelidikan di Kota Palu. Sebagai langkah akhir, suatu rata-rata nilai zona dapat diperoleh untuk setiap satuan wilayah terkecil (Kecamatan) di Kota Palu. Secara keseluruhan uraian konsep tersebut diatas dapat digambarkan di bawah ini.

## **Pemetaan Mikrozonasi**

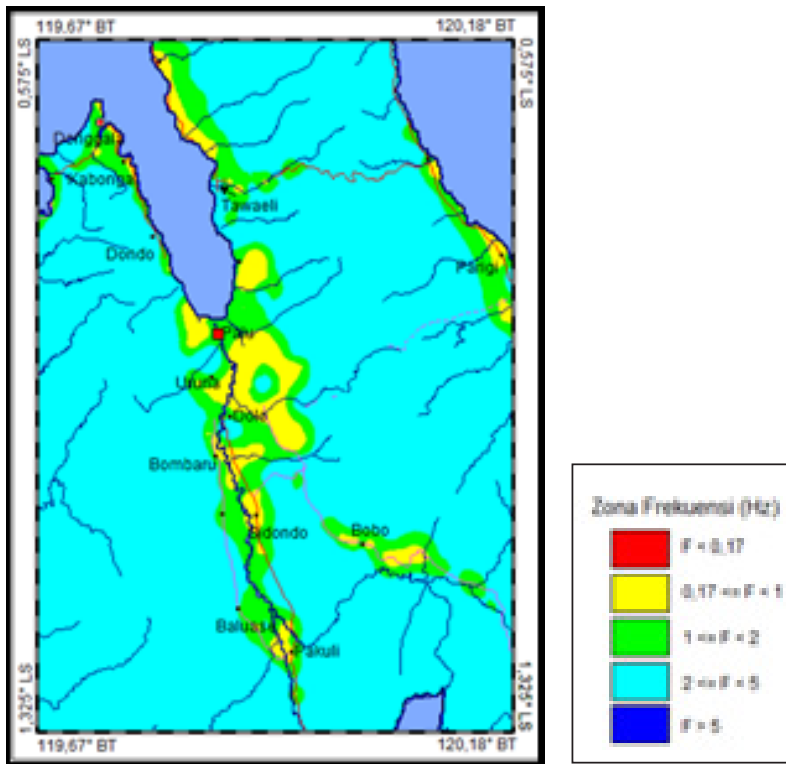
Peta mikrozonasi dapat dimanfaatkan oleh perencana kota dalam pengembangan kota yang peka terhadap bahaya guncangan gempa. Peta tersebut menguraikan potensi



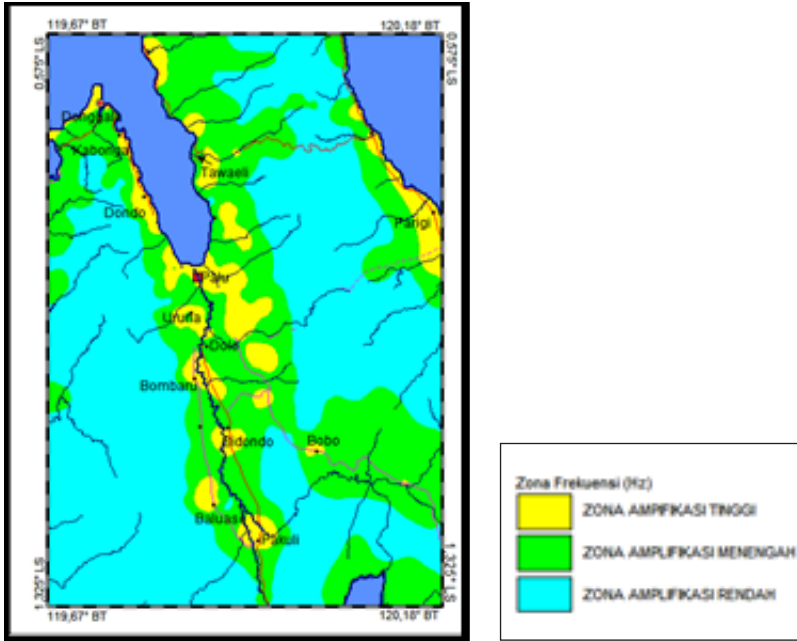
Gambar 1. Konsep dasar mikrozonasi

relatif dari zona bahaya gempa (*seismic hazard*) pada tingkat perkotaan dan membantu untuk mengenali bagian-bagian dari kota yang kemungkinan mengalami intensitas guncangan yang rendah (warna biru) dibanding bagian lainnya (kuning dan merah) yang memiliki intensitas guncangan yang lebih tinggi selama gempa terjadi.

Peta mikrozonasi juga mengandung informasi geoteknik yang relevan untuk kebutuhan ahli teknik sipil, seperti tebal sedimen, kelas lokasi, penguatan di lokasi dan frekuensi yang



Gambar 2. Peta zona frekwensi dominan berdasarkan analisis mikrotremor (PVMBG, 2011).



Gambar 3. Peta zona amplifikasi berdasarkan analisis mikrotremor (PVMBG,2011)

dominan. Ini semua akan membantu untuk memperkirakan kondisi bawah tanah dalam fase perencanaan dari kegiatan membuat bangunan. Akhirnya, peta mikrozonasi seharusnya juga mengandung rekomendasi untuk prioritas pengembangan kota dan evaluasi ulang serta penyesuaian kembali (*retro-fitting*) untuk bangunan yang ada, dengan mempertimbangkan tingkat bahaya relatif akibat gempa.

Pemetaan dan penelitian mikrozonasi bahaya gempa di Kota Palu telah dilakukan dengan menggunakan metode mikrotremor. Tujuan akhirnya adalah mengurangi risiko gempa. Berdasarkan metode tersebut, Kota Palu memiliki 3 peta dasar mikrozonasi, yaitu peta frekuensi dominan, dan peta

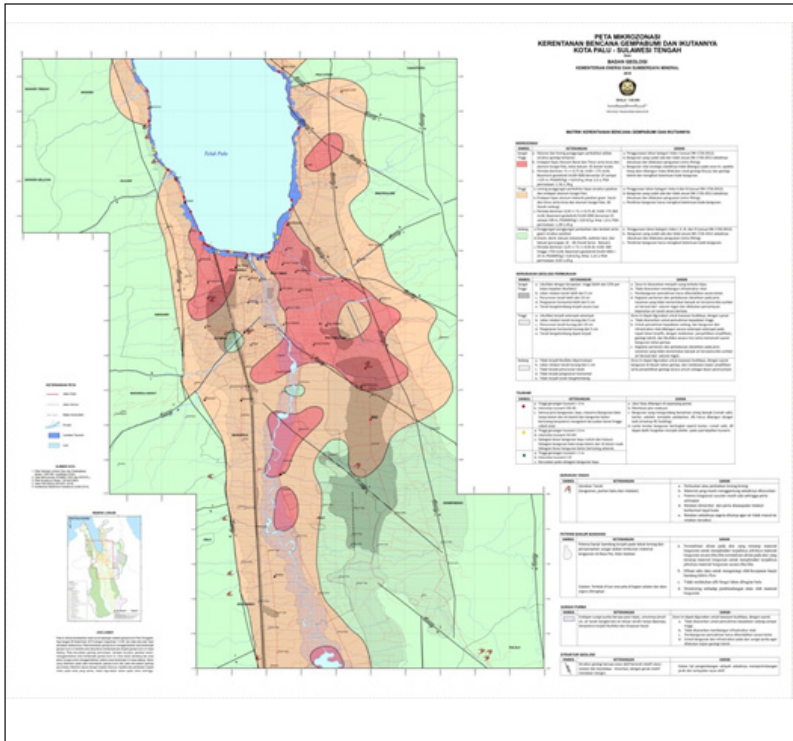
klasifikasi amplifikasi dan peta kecepatan rambat gelombang geser rata-rata ( $V_s30$ ). Peta dasar mikrozonasi tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2,3 dan 4.

Penelitian, evaluasi, dan analisis terhadap peta dasar mikrozonasi ini menghasilkan Potensi Bahaya Guncangan Tanah Akibat Gempa (*Potential Earthquake Ground Shaking Hazard*) atau yang biasa disebut mikrozonasi untuk Kota Palu. Berdasarkan peta-peta tersebut, kota ini dapat dibagi menjadi tiga zonasi, yaitu amplifikasi sangat tinggi (1), tinggi (2), dan sedang (3).

Amplifikasi ini memperlihatkan indeks potensi bahaya guncangan tanah akibat gempa untuk kota tersebut. Ini berarti peta mikrozonasi ditujukan untuk dapat digunakan sebagai alat perencanaan, di mana kode bangunan (*building code*) harus tetap diterapkan selama pembangunan suatu proyek bangunan. Dengan demikian, peta mikrozonasi dapat digunakan oleh perencana di pemerintahan kota, khususnya dalam kajian ini untuk Kota Palu dalam pengembangan kota yang peka terhadap bahaya gempa.

Namun, peta mikrozonasi tidak dapat menggantikan kode bangunan nasional untuk Indonesia. Standar yang ada pada *SNI 1726:2012* telah memberikan informasi yang rinci untuk ahli teknik sipil, termasuk di dalamnya instruksi untuk uji (tanah) dasar bangunan. Seluruh aktivitas utama pembangunan di Indonesia harus mengikuti standar tersebut. Peta mikrozonasi kerentanan bencana gempabumi Kota Palu (Badan Geologi,2018), dapat dilihat dalam Gambar 4.

Dengan demikian, dari pemetaan dan penelitian mikrozonasi potensi bahaya gempa di Kota Palu dapat disimpulkan adanya Zona 1, Zona 2 dan Zona 3. Zona 1 adalah zona yang tidak diizinkan dibangunnya fasilitas penting di



Gambar 4. Peta mikrozonasi kerentanan bencana gempa bumi dan ikutannya Kota Palu (Badan Geologi, 2018)

dalamnya. Pada Zona 1 perlu dilakukan evaluasi ulang atas fasilitas bangunan yang ada. Demikian pula, penyesuaian ulang (*retro-fitting*) fasilitas bangunan, studi geologi khusus, penyelidikan lokasi (*site investigation*), dan rancangan khusus fondasi, perlu dilakukan pada Zona 1 ini.

Pada Zona 2 perlu dilakukan pemeriksaan kekuatan bangunan (kategorisasi risiko) dan penyesuaian ulang perlu dipertimbangkan. Adapun pada Zona 3 dapat ditempatkan

struktur kategori risiko tinggi yang telah direncanakan. Pengembangan kota juga direkomendasikan dapat dilakukan di zona ini.

Untuk keseluruhan zona dapat diprioritaskan pembangunan pada zona bahaya rendah, juga diprioritaskan relokasi dan penyesuaian ulang fasilitas bangunan pada zona bahaya tinggi, serta pemberlakuan dan penerapan regulasi kode bangunan yang mempertimbangkan dengan baik ancaman bahaya gelombang gempa bumi.

*\*A. Soehaimi bekerja di Pusat Survei Geologi,  
Sri Hidayati dan Haunan Afif bekerja di Pusat Vulkanologi  
dan Mitigasi Bencana Geologi*





# **Pemanfaatan Ruang Berbasis Geologi**

**Oleh**

**Andiani, Dita Arif Yuwana, Eep R. Firdaus,  
Andrikni W. K. M., Kurniah, Taufiq W. B.**

*“Ke depannya, pembangunan Kota Palu dan sekitarnya harus memperhitungkan dengan cermat kemungkinan keterulangan bencana demi keselamatan warga dan risiko generasi penerus”*

Kota Palu berada pada kawasan dataran Lembah Palu dan Teluk Palu. Kota yang luasnya mencapai 395,06 km<sup>2</sup> ini secara geografis terletak antara 0°36” - 0°56” Lintang Selatan dan 119°45” - 121°1” Bujur Timur dan tepat berada di bawah garis Khatulistiwa dengan ketinggian 0 - 700 mdpl. Karena terletak di bagian utara khatulistiwa, Kota Palu menjadi salah satu kota tropis terkering di Indonesia dengan curah hujan kurang dari 1.000 mm per tahun. Seluas 376,68 km<sup>2</sup> (95,34%) wilayah kota ini berada pada ketinggian 100 - 500 mdpl dan hanya 18,38 km<sup>2</sup> (46,66%) terletak di dataran yang lebih rendah dengan Sungai Palu membelah di tengah kota. Penduduknya pada tahun 2017 sebanyak 379.593 jiwa (*Palu Dalam Angka 2018*).

Berdasarkan adminisitrasinya, Kota Palu memiliki berbatasan dengan Kabupaten Donggala di utara, dengan Kabupaten Sigi di selatan, dengan Kabupaten Donggala dan Sigi di sebelah barat, dan dengan Kabupaten Parigi Moutong dan Donggala di sebelah timur. Adapun Kabupaten Donggala



Gambar 1. Dataran teluk dan lembah Palu

mempunyai luas sebesar 4275,08 km<sup>2</sup> dan berpenduduk sebanyak 301.757 jiwa pada tahun 2016, sedangkan Kabupaten Sigi luas wilayahnya mencapai 5.196 km<sup>2</sup> dan berpenduduk 229.474 jiwa.

## **Pengembangan Kota Palu**

Kegiatan ekonomi di Kota Palu terdiri dari pertanian, peternakan, kehutanan, industri pertambangan, industri pengolahan, listrik dan gas, perdagangan, angkutan pergudangan, keuangan dan asuransi serta jasa kemasyarakatan sosial. Berdasarkan Peraturan Daerah Kota Palu Nomor 16 Tahun 2011 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Palu Tahun 2010 – 2030, rencana struktur ruang wilayah kota meliputi Rencana Struktur Sistem Pusat Pelayanan Kegiatan Kota.

Sistem pusat pelayanan kegiatan Kota Palu diarahkan berjenjang sesuai dengan bentuk dasar kota sebagai kota teluk, yang meliputi: *Pertama*, Pusat Pelayanan Kota. Di sini rencana pengembangan sistem pusat pelayanan Kota Palu ditetapkan pada kawasan pusat pengembangan kegiatan perdagangan regional, jasa, transportasi dan pemerintahan yang mencakup pada wilayah Kecamatan Palu Barat, Kecamatan Palu Selatan, dan Kecamatan Palu Timur.

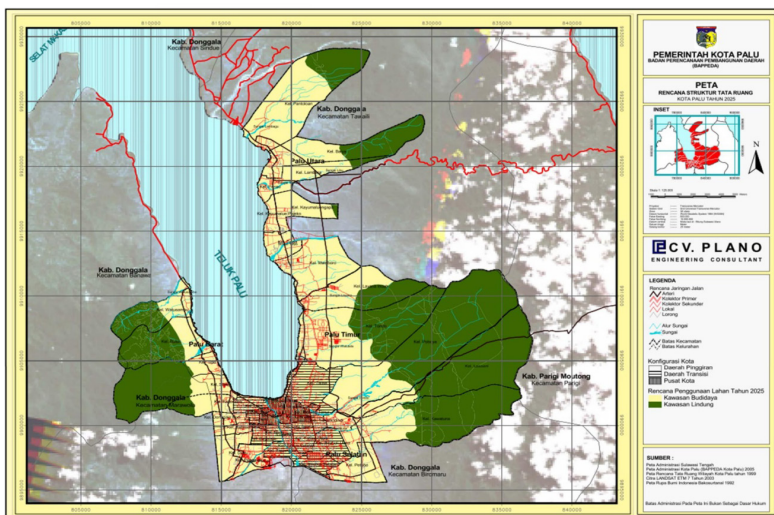
*Kedua*, Sub Pusat Pelayanan Kota. Rencana pengembangan sistem sub pusat pelayanan Kota Palu meliputi kawasan dengan fungsi perkantoran pemerintahan, perdagangan jasa dan pelayanan sosial serta budaya yang tersebar di 4 (empat) kecamatan, yaitu Kecamatan Palu Utara, Kecamatan Palu Timur, Kecamatan Palu Selatan, dan Kecamatan Palu Barat.

*Ketiga*, Pusat Lingkungan. Pusat lingkungan Kota Palu



Gambar 2. Wilayah pemukiman terdampak gempa bumi dan likuefaksi

meliputi kawasan dengan fungsi perkantoran pemerintahan, pendidikan, perdagangan jasa dengan skala lingkungan, pelayanan sosial dan budaya dan perumahan yang tersebar di setiap kelurahan.



Gambar 3. Peta Struktur Tata Ruang Kota Palu

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 31 Tahun 2014 tentang Kawasan Ekonomi Khusus Palu ini ditetapkan dengan luas 1500 ha yang terletak dalam wilayah Kecamatan Tawaeli, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Kawasan Ekonomi Khusus Palu memiliki batas sebagai berikut: Sebelah utara dengan Kelurahan Pantoloan Boya, Kecamatan Tawaeli, Kota Palu. Kemudian sebelah timur dengan Desa Wombo, Kecamatan Tanantovea, Kabupaten Donggala dan Kelurahan Baiya dan Kelurahan Lambara, Kecamatan Tawaeli, Kota Palu. Selanjutnya di sebelah selatan dengan Kelurahan Lambara, Kecamatan Tawaeli, Kota Palu. Dan terakhir di sebelah barat dengan Kelurahan Pantoloan dan Kelurahan Baiya, Kecamatan Tawaeli, Kota Palu.

Kawasan Ekonomi Khusus Palu terdiri atas (a) Zona Industri; (b) Zona Logistik; dan (c) Zona Pengolahan Ekspor. Rencana strategis pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus Palu berpedoman pada Masterplan Kawasan Industri Palu. Strategi pengembangan KEK Kota Palu, dibagi dalam tiga bagian strategi yaitu:

*Pertama*, strategi umum yang terdiri dari Pembangunan Infrastruktur, Status Lahan dan Tata Ruang Wilayah, Strategi Penguatan SDM, Pembangunan Kelembagaan, Pembangunan Sistem Informasi KEK dan Investasi, Pembangunan Jejaringan Kerja. *Kedua*, strategi khusus berupa strategi pengembangan komoditas unggulan terdiri dari penguatan *supply chain*, pengembangan produk hilir (hilirisasi). Dan ketiga, strategi fungsional yang terdiri dari pemasaran, operasional dan finansial/keuangan.

Berbagai persiapan agar Kota Palu ditetapkan sebagai kawasan ekonomi khusus telah dilakukan, yaitu berupa penyediaan lahan seluas 1.520 hektare di Kecamatan Palu Utara,



Gambar 4. Kawasan Pelabuhan Pantoloan terdampak gempa bumi dan tsunami

yang meliputi Kelurahan Pantoloan, Baiya, dan Lambara. Lahan tersebut dibagi menjadi kawasan industri seluas 700 hektare, kawasan perumahan (500 hektare), kawasan pendidikan dan penelitian (100 hektare), kawasan komersial (100 hektare), daerah olahraga (50 hektare), kawasan pergudangan (50 hektare), kawasan perkebunan dan taman (20 hektare).

## Kajian Geologi Lingkungan

Geologi lingkungan merupakan media dalam penerapan informasi geologi melalui penataan ruang dalam rangka pengembangan wilayah dan pengelolaan lingkungan, yaitu memberikan informasi tentang karakteristik lingkungan geologi suatu lokasi/wilayah berdasarkan keterpaduan dari aspek sumber daya geologi sebagai faktor pendukung dan aspek bencana geologi sebagai faktor kendala. Selanjutnya hasil



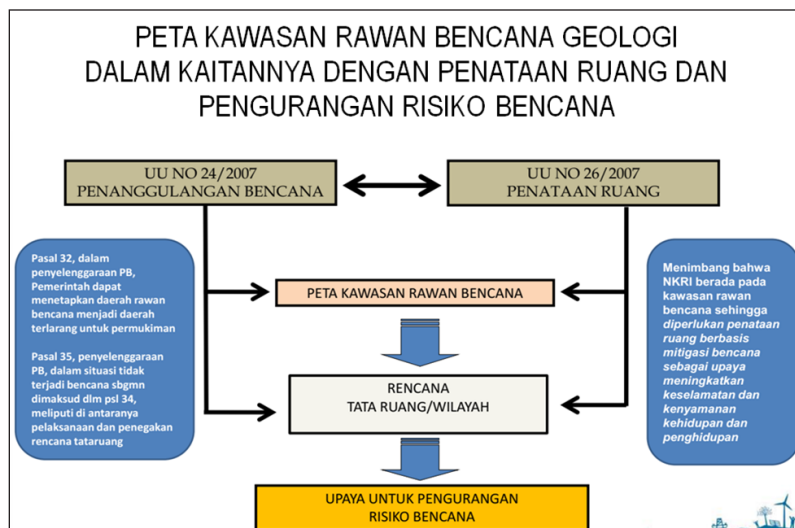




sudah ada maupun yang akan disusun terutama berguna untuk: memberi gambaran secara garis besar rekomendasi dalam penggunaan lahan ditinjau dari geologi lingkungan dan sebagai bahan penyusunan RTRW kabupaten/kota maupun bagi RTRW kecamatan; dan memberi gambaran mengenai faktor pendukung dan kendala geologi lingkungan bagi pembangunan wilayah dan pengelolaan lingkungan secara keseluruhan.

Penyusunan informasi geologi lingkungan dilakukan dengan menggabungkan informasi dari peta tematik geologi maupun peta nongeologi. Informasi geologi lingkungan dapat membantu mengatasi permasalahan lingkungan dan upaya pengelolannya melalui rekomendasi penggunaan lahan dan juga menyediakan alternatif pemecahan permasalahannya.

Dalam konteks kajian geologi lingkungan Kota Palu dan



Gambar 6. Dasar hukum penyusunan peta kawasan rawan bencana geologi

sekitarnya, maka tujuan perencanaan tata ruang sebelum bencana ditujukan untuk mewujudkan ruang Kota Palu sebagai kota teluk berwawasan lingkungan yang berbasis pada jasa, perdagangan, dan industri, yang didasari kearifan dan keunggulan lokal bagi pembangunan berkelanjutan.

Sementara tujuan perencanaan setelah terjadinya bencana adalah salah satunya adalah menghindari membangun kembali fungsi hunian dan pusat kegiatan di beberapa lokasi rawan bencana. Lokasi rawan tersebut antara lain zona sempadan pantai dan wilayah terjadinya likuifaksi masif, seperti di Balaroa dan Petobo. Untuk hunian dan gedung di sekitar pantai harus dibangun dengan jarak 100 meter dari zona sempadan pantai dikarenakan bahaya dan risiko tsunami. Pembangunan baru di kawasan pesisir teluk dibatasi pada bangunan tinggi yang mampu menahan getaran gempa dan bisa menjadi tempat evakuasi ketika tsunami melanda. Untuk kawasan rawan likuifaksi, dilakukan pembatasan intensitas pemanfaatan ruang.

## **Kriteria penilaian**

Penyusunan Peta Geologi Tata Lingkungan untuk Penataan Ruang Palu, Donggala dan Sigi merupakan penggabungan data-data hasil pemetaan geologi permukaan dan penyelidikan geofisika serta referensi data sekunder dari penelitian terdahulu sehingga menghasilkan beberapa kriteria penilaian zonasi rawan bencana. Adapun kriteria penilaian tersebut adalah sebagai berikut: Geomorfologi, geologi dan kelas batuan, periode dominan/kecepatan gempa, likuifaksi pada tanah permukaan, kerusakan geologi permukaan, potensi gerakan tanah, dan kerusakan akibat tsunami.

## **Rekomendasi**

Setelah menentukan kriteria penilaian kawasan rawan bencana maka tahapan selanjutnya adalah menentukan rekomendasi berupa saran teknis sebagai upaya yang seharusnya dilakukan sebelum melakukan penataan ruang dan wilayah di masa mendatang. Penjelasan saran teknis serta wilayah yang direkomendasikan seperti di bawah ini:

### **Relatif tidak leluasa (merah)**

Tidak diperbolehkan adanya fisik terbangun (permukiman, fasos, fasum) dan infrastuktur. Pada kawasan terdampak likuifaksi berat dan diduga masih banyak korban tertimbun, seperti di Petobo dan Balaroa, harus bebas hunian dan bangunan, ditetapkan sebagai RTH. Kawasan sebaiknya dikembangkan menjadi taman eduwisata geologi (*geology park*) terkait kebencanaan gempa dan likuifaksi.

### **Relatif kurang leluasa (oranye)**

- Kegiatan pembangunan prasarana dan sarana terbatas
- Kegiatan pembangunan RTH dan kegiatan lain menunjang fungsi lindung
- Permukiman perdesaan, perumahan berkepadatan (KDB dan KLB) rendah
- Peruntukan ruang sesuai dengan RTRW/RRTR, sebagai kawasan pengendalian tinggi (highcontrol)

Kawasan pesisir pantai yang diterjang tsunami menjadi dasar pemetaan landaan tsunami dan batas kawasan bebas hunian dan bangunan, serta dijadikan ruang terbuka hijau (RTH) hutan mangrove dan taman. RTH berfungsi mencegah abrasi, meredam tsunami, memulihkan ekosistem pantai, habitat satwa liar, serta menjadi kawasan eko(logis)- edu(kasi)-wisata.

Tabel 1. Kriteria Kawasan Rawan Bencana (KRB)

KRB	KRITERIA	KODE	SARAN	KETERANGAN
RELATIF TIDAK LELIASA	a. Dataran dan lereng punggungan perbukitan alkitab struktur geologi terbanan.	M1	Kawasan Ruang terbuka hijau setelah dilakukan relokasi pemukiman	Kecamatan: Pala Barat, Uluhaji, Pulu Selatan, Dolo, Sigi Biromaru
	b. Endapan Kipas Aluvium Barat dan Timur serta teras dan aluvium Sungai Palu, kelas batuan:SE (tanah lunak).	M2	Kawasan: 1. Ruang terbuka hijau. 2. Pemukiman yang sudah ada dan pengembangannya harus dikendalikan secara ketat dan tidak disarankan membangun infrastruktur vital 3. Pertanian dan perkebunan untuk jenis tanaman yang tidak memerlukan banyak air.	Kecamatan: Pala Barat, Tatanga, Uluhaji, Marawola, Dolo Barat, Dolo Selatan, Gumbasa, Dolo, Sigi Biromaru, Pulu Selatan, Pulu Timur, Mantikolore
	c. Periode dominan: $T_s > 0,75$ dt; $V_s30 < 175$ m/dt; Basement geoteknik (Vs30=300) bervariasi 25 sampai >125 m; PGA(MCEg) = 0,8 – 0,9g; Amp: 2,2 x; PGA permukaan: 1,76 – 1,98g		Teknis: 1. Rebenan air dari saluran irigasi dan sungai sekitar dapat memicu likuifaksi, sehingga perlu dipantau kejenuhan air tanah secara berkala melalui rekayasa engineering.	
	d. Likuifaksi dengan kecepatan tinggi (lebih dari 25% per lokasi kejadian likuifaksi)	M3	Kawasan: 1. Ruang terbuka hijau. 2. Pemukiman yang sudah ada pengembangannya harus dikendalikan secara ketat.	Kecamatan: Pulu Timur, Mantikolore, Pulu Selatan, Sigi Biromaru, Marawola, Dolo, Tanambulawa, Dolo Selatan, Gumbasa
	e. Lebar retakan tanah lebih dari 5 cm f. Penurunan tanah lebih dari 10 cm g. Pergeseran horizontal lebih dari 5 cm h. Tanah bergelombang terjadi secara luas i. Gerakan tanah tinggi j. Tsunami		Teknis: 1. Bangunan yang ada perlu dievaluasi dan dilakukan penguatan (retro-fitting) 2. Tidak disarankan mendirikan bangunan vital strategis. Apabila tetap akan dibangun maka dilakukan studi geologi khusus dan geologi teknik serta mengikuti ketentuan kode bangunan. 3. Pendirian bangunan dan infrastruktur pada alur sungai perba agar mengikuti hasil kajian geologi teknik.	
	M4	Kawasan: 1. Hutan Lindung, hutan produksi, serta tidak melakukan alih fungsi lahan dibagian hulu. 2. Ruang Terbuka Hijau 3. Pemukiman yang sudah ada pengembangannya harus dikendalikan secara ketat	Kecamatan: Banawa, Uluhaji, Kinowaru, Dolo Barat, Dolo Selatan, Mantikolore, Sigi Biromaru, Tanambulawa, Gumbasa	
		Teknis: 1. Dilakukan normalisasi pada alur yang tertutup material longoran untuk menghindari terjadinya jebolnya material longoran secara tiba-tiba 2. Dibuat sabo dam untuk mengurangi kecepatan banjir bandang/debris flow. 3. Dilakukan monitoring terhadap pembendungan alam oleh material longoran.		
	M5	Kawasan: 1. Ruang terbuka hijau untuk daerah yang terlanda tsunami 2. Pengembangan pelabuhan agar dikendalikan secara ketat	Kecamatan: Banawa, Uluhaji, Pulu Barat, Pulu Timur, Mantikolore, Pulu Utara, Tawaeli	
RELATIF KURANG LELIASA	a. Lereng punggungan perbukitan kipas struktur patahan dan endapan aluvium Sungai Palu.	K1	Kawasan: 1. Pemukiman kepadatan rendah-sedang. 2. Pertanian dan perkebunan diarahkan pada jenis tanaman yang tidak memerlukan banyak air terutama bila sumber air berasal dari saluran irigasi.	Kecamatan: Tatanga, Marawola, Gumbasa, Tanambulawa, Sigi Biromaru, Dolo, Pulu Selatan
	b. Endapan kipas aluvium tektonik patahan gawir barat dan timur serta teras dan aluvium Sungai Palu, SD (tanah sedang).		Teknis: 1. Bangunan infrastruktur vital dapat dibangun secara setempat-setempat pada tapak lokasi terpilih yang mengacu pada hasil penyelidikan rinci amplifikasi, geologi teknik, dan likuifaksi serta memenuhi syarat bangunan tahan gempa	
	c. Periode dominan: $0,50 < T_s < 0,75$ dt; $V_s30: 175-360$ m/dt; Basement geoteknik (Vs30=300) bervariasi 25 sampai 100 m; PGA(MCEg) = 0,8 – 0,9g; Amp: 1,6 x; PGA permukaan: 1,28 – 1,44g.	K2	Kawasan: 1. Pemukiman kepadatan rendah-sedang	Kecamatan: Pulu Barat, Kinowaru, Tatanga, Uluhaji, Marawola, Gumbasa, Dolo, Sigi Biromaru, Pulu Selatan, Mantikolore, Pulu Timur
d. Likuifaksi terjadi setempat-setempat e. Lebar retakan tanah kurang dari 5 cm f. Penurunan tanah kurang dari 10 cm g. Pergeseran horizontal kurang dari 5 cm h. Tanah bergelombang dapat terjadi i. Gerakan tanah Menengah	Teknis: 1. Bangunan yang sudah ada sebaiknya dievaluasi dan dilakukan penguatan (retro-fitting). 2. Dapat dijadikan kawasan budidaya terbangun namun dengan mengikuti ketentuan kode bangunan			
	K3	Kawasan: 1. Pemukiman kepadatan rendah dan dikendalikan pengembangannya serta tidak disarankan membangun infrastruktur vital.	Kecamatan: Pulu Barat, tatanga, Pulu Timur, pulu Selatan, Marawola, Dolo, Dolo Barat, Dolo Selatan, Gumbasa, Tanambulawa, Sigi Biromaru, Mantikolore, Pulu utara, Tawaeli, Kinowaru, Uluhaji, Banawa.	
		Teknis: 1. Untuk bangunan dan infrastruktur vital pada alur sungai perba dan penutupan lereng pada daerah perbukitan harus mengacu hasil kajian geologi teknik.		
RELATIF LELIASA	a. Punggungan-punggungan perbukitan dan lembah, serta gawir struktur patahan.	H	Kawasan: 1. Pada daerah pedataran dapat dikembangkan sebagai daerah kawasan budidaya terbangun 2. Pada daerah perbukitan diarahkan sebagai kawasan hutan.	Kecamatan: Banawa, Uluhaji, Kinowaru, tatanga, Marawola, Dolo Barat, Dolo Selatan, Gumbasa, Tanambulawa, Sigi Biromaru, Dolo, Pulu Selatan, Mantikolore, Pulu Timur, Pulu Barat, Pulu Utara, Tawaeli.
	b. Granit, diorit, batuan metamorfik, sedimen laut, dan batuan gunungapi. SC- SB (Tanah keras – Batuan). c. Periode dominan: $0,25 > T_s > 0,50$ dt; $V_s30: 360$ hingga >750 m/dt; Basement geoteknik (Vs30=300) < 25 m; PGA(MCEg) = 0,8 – 0,9g; Amp: 1,15 x; PGA permukaan: 0,92 – 1,03g. d. Tidak terjadi likuifaksi dipermukaan e. Lebar retakan tanah kurang dari 1 cm f. Tidak terjadi penurunan tanah g. Tidak terjadi pergeseran horizontal h. Tidak terjadi tanah bergelombang i. Gerakan tanah rendah			
KRB	KRITERIA	SARAN		KETERANGAN
JALUR PATAHAN	Berdasarkan hasil pengamatan dilapangan dan data pendugaan geoteknik	1. Sepanjang 0-10m kanan dan kiri bidang patahan hanya dapat dipakai ruang terbuka hijau 2. Pemfaatan lahan pada 10 – 50m kanan dan kiri bidang patahan apabila tetap akan dibangun maka dilakukan studi geologi khusus dan geologi teknik serta mengikuti ketentuan kode bangunan		Patahan memanjang dari utara ke selatan



- Kegiatan industri, perdagangan dan jasa dengan skala kecil atau menengah

Pada kawasan permukiman dan pusat perkotaan, jalan mesti dibangun merangkap sebagai jalur evakuasi bencana lengkap dengan rambu, marka, sirene peringatan dini penerangan bertenaga surya. Jalan dilengkapi juga dengan pembangunan trotoar, saluran air, dan jaringan utilitas terpadu.

Walhasil, pembangunan Kota Palu dan sekitarnya harus memperhitungkan dengan cermat kemungkinan keterulangan bencana terhadap keselamatan warga dan risiko generasi penerus. Pembangunan kotanya jelas harus direncanakan secara matang, sekaligus harus mempertimbangkan kondisi geologis, aspek kebencanaan, kearifan lokal, dan keselarasan dengan alam. Memang perubahan tata ruang mutlak dilakukan, tetapi seyogyanya disesuaikan dengan jejak kebencanaan pada kawasan terdampak parah, peta perkiraan rawan bencana (kondisi geologis terkini), dan penyesuaian rencana tata ruang.

Selain perencanaan tata ruang berbasis geologi, masyarakat juga harus dibekali dengan pengetahuan mengenai bencana itu sendiri berikut cara mitigasi bencana, agar saat terjadi bencana, masyarakat dapat langsung mengetahui dengan tepat langkah-langkah yang harus dilakukan.

*\*Andiani, Dita Arif Yuwana, Eep R. Firdaus,  
Andrikni W K M, Kurniah, Taufiq W B  
bekerja di Pusat Air Tanah  
dan Geologi Tata Lingkungan.*



# EPILOG

Oleh

**OKI OKTARIADI**



## Membumikan Geologi Lingkungan

Kini banyak orang jadi tahu bahwa Kota Palu berada di lingkungan geodinamika yang sangat aktif. Kota ini merupakan batas-batas pertemuan lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Samudra Pasifik yang menunjam terhadap Lempeng Benua Asia. Gerak-gerak lempeng tektonik tersebut mengakibatkan berbagai jenis proses geodinamik seperti gempa bumi, tsunami, letusan gunungapi, gerakan tanah (longsor), dan banjir bandang. Proses tersebut sebenarnya merupakan peristiwa alam yang terjadi secara periodik dalam kurun waktu ratusan bahkan jutaan tahun.

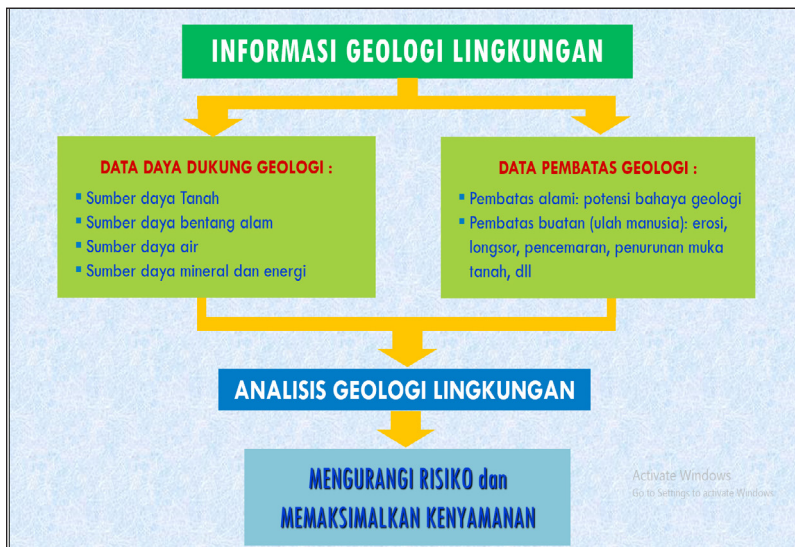
Apabila terjadi dalam kurun waktu dan dalam lingkungan kehidupan manusia, berbagai proses geodinamik itu akan berisiko pada kerugian sosial-psikologi dan kerugian ekonomi yang fatal. Ancaman proses geodinamik ini dikategorikan sebagai bahaya geologi. Namun, apabila benar-benar telah terjadi proses geodinamika yang menimbulkan kerugian sosial ekonomi secara nyata, maka proses geodinamika ini disebut sebagai bencana geologi.

Di balik proses geologi yang telah dan sedang berlangsung ini dihasilkan pula sumber daya geologi, seperti mineral, minyak dan gas bumi, air permukaan dan air tanah, bentang lahan (*landscape*) dan bentuk lahan (*landform*). Semuanya dibutuhkan demi keberlangsungan hayat manusia. Dengan demikian, proses geologi yang menghasilkan sumber daya geologi dan bahaya geologi tersebut, suka tidak suka, merupakan lingkungan geologi tempat hidup manusia sekaligus secara langsung mempengaruhi kondisi dan keberadaan manusia.

# Memahami Geologi Lingkungan

Informasi geologi lingkungan diperlukan sebagai upaya mengurangi risiko, baik dengan cara mengatasi permasalahan akibat eksploitasi sumber daya geologi dan pembangunan konstruksi oleh manusia, ataupun sebaliknya, untuk mengatasi dampak fenomena geologi terhadap kegiatan/kepentingan manusia.

Dengan kajian geologi lingkungan, pemanfaatan berbagai sumber daya geologi dapat dilakukan tanpa melampaui batas-batas daya dukung lingkungan. Dengan kata lain, terwujudnya keseimbangan antara kepentingan pemenuhan kebutuhan manusia dengan kepentingan dalam menjaga kelestarian dan keselamatan lingkungan. Hal ini dapat dicapai juga melalui upaya yang senantiasa mempertimbangkan pencegahan, pengendalian dan meminimalkan dampak negatif dari berbagai kegiatan eksplorasi dan eksploitasi sumber daya



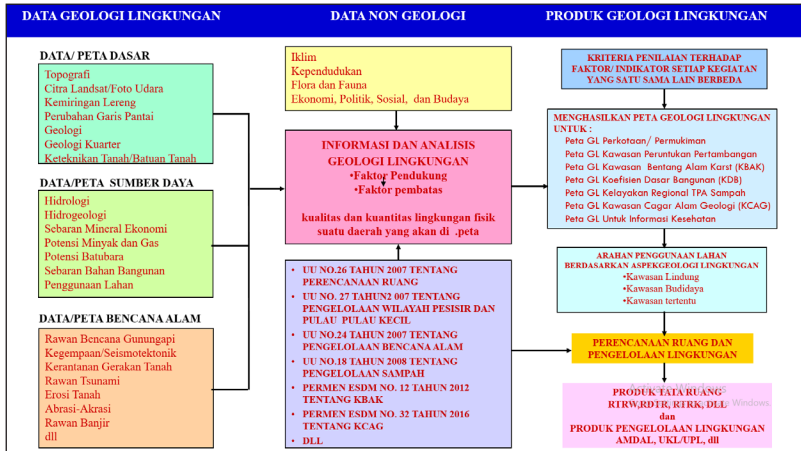
geologi ataupun pembangunan fisik bangunan.

Dalam praktiknya, fokus utama kajian geologi lingkungan adalah observasi, analisis, dan prediksi terhadap aspek “sesumber geologi” dan “bahaya geologi”. Sesumber Geologi adalah produk dari proses yang dapat dimanfaatkan untuk kesejahteraan manusia, sedangkan bahaya geologi adalah proses geodinamika yang mengancam kehidupan manusia, karena berpotensi menimbulkan kerugian sosial-ekonomi dan mengakibatkan kerusakan lingkungan hidup manusia.

Selanjutnya, analisis geologi lingkungan untuk pengembangan wilayah regional didasarkan pada komponen geologi lingkungan yang berkaitan dengan faktor pendukung dan faktor pembatas atau kendala secara fisik dalam suatu pengembangan wilayah. Beberapa komponen geologi lingkungan yang digunakan dalam analisis ini adalah sumber daya geologi (kondisi kelerengan atau topografi, daya dukung tanah dan batuan, dan kondisi keairan/hidrogeologi), kendala geologi (gempabumi, gerakan tanah dan gunungapi), penyisih geologi dan penyisih nongeologi.

Untuk analisis geologi lingkungan perkotaan diperlukan satuan unit analisis yaitu satuan geologi lingkungan sebagai kerangka analisis yang di dalamnya terdapat persamaan karakteristik dari seluruh atau sebagian besar komponen-komponen geologi lingkungan, sehingga akan diketahui gambaran secara umum tentang faktor pendukung dan pembatas/kendala yang ada. Dengan demikian, dapat dilakukan evaluasi terhadap tiap satuan ini guna menilai kelebihannya dalam pengembangan wilayah.

Selain menentukan kawasan permukiman/perkotaan, penyelidikan geologi lingkungan pun berperan dalam berbagai analisis kelayakan lokasi, di antaranya *pertama*, penyelidikan



kelayakan tempat pengolahan akhir (TPA) sampah, seperti yang diamanatkan dalam SNI 03-3241-1994 tentang Cara Pemilihan Lokasi Tempah. Pada SNI tersebut, penentuan lokasi TPA sampah harus sesuai dengan kondisi geologi lingkungan meliputi faktor hidrogeologi, geologi teknik, dan bahaya geologi. *Kedua*, menentukan kawasan bentang alam karst (KBAK) sesuai permen ESDM No. 17 Tahun 2012. *Ketiga*, menentukan kawasan cagar alam geologi (KCAG) sesuai permen ESDM No. 32 Tahun 2016. *Keempat*, menentukan kawasan peruntukan pertambangan (KPP). *Kelima*, menentukan koefisien dasar bangunan (KDB).

## Makna Informasi Geologi Lingkungan

Meningkatnya ketahanan wilayah atau kawasan dapat tercapai jika informasi berbagai unsur geologi lingkungan diintegrasikan dalam rencana tata ruang wilayah dan dijadikan acuan pada saat proses penyusunan tata ruang serta dijadikan alat pengendali pembangunan fisik di wilayah

tersebut. Alat pengendali ini tidak hanya digunakan untuk mengendalikan pembangunan saat ini saja, tetapi digunakan juga sebagai alat untuk mengendalikan pembangunan di masa datang. Oleh karena itu, analisis geologi lingkungan ditujukan untuk memberikan kenyamanan dan keleluasaan penggunaan lahan guna memperkecil dampak negatif yang diakibatkan oleh pengembangan wilayah.

Pernyataan di atas memperjelas peranan geologi lingkungan dalam pengembangan wilayah maupun perencanaan pembangunan infrastruktur. Dalam hal ini, konsep *the present is the key to the future* sangatlah penting untuk selalu menyadarkan para ahli perencanaan wilayah dan lingkungan agar jangan sampai terlena dengan melewati atau bahkan mengabaikan berbagai fenomena geologi yang sangat dinamis, yang makin sering terjadi di sekitar kita akhir-akhir ini, seperti fenomena gempa bumi, longsor, letusan gunungapi, banjir bandang, *mud volcano* (gunungapi lumpur), dan likuifaksi.

Demikian pula para ahli geologi harus terus berkarya dan selalu berupaya mengajak masyarakat untuk bertindak tanpa melampaui batas-batas daya dukung geologi. Dengan demikian, berbagai dampak dari kejadian bencana geologi maupun kemanusiaan dapat dihindari atau dicegah, atau diminimalkan, demi tercapainya proses pembangunan berkelanjutan dan *Millennium Development Goals*.

Uraian di atas pun menegaskan pentingnya peran informasi geologi dalam pengembangan wilayah. Namun, kenyataannya informasi tersebut belum dimanfaatkan secara maksimal. Hal tersebut disebabkan oleh belum tersedianya informasi geologi rinci dan belum dikenalnya bahwa geologi dapat memberikan sumbangan dalam penataan ruang pengembangan wilayah sekaligus pengelolaan lingkungan. Banyak masyarakat yang

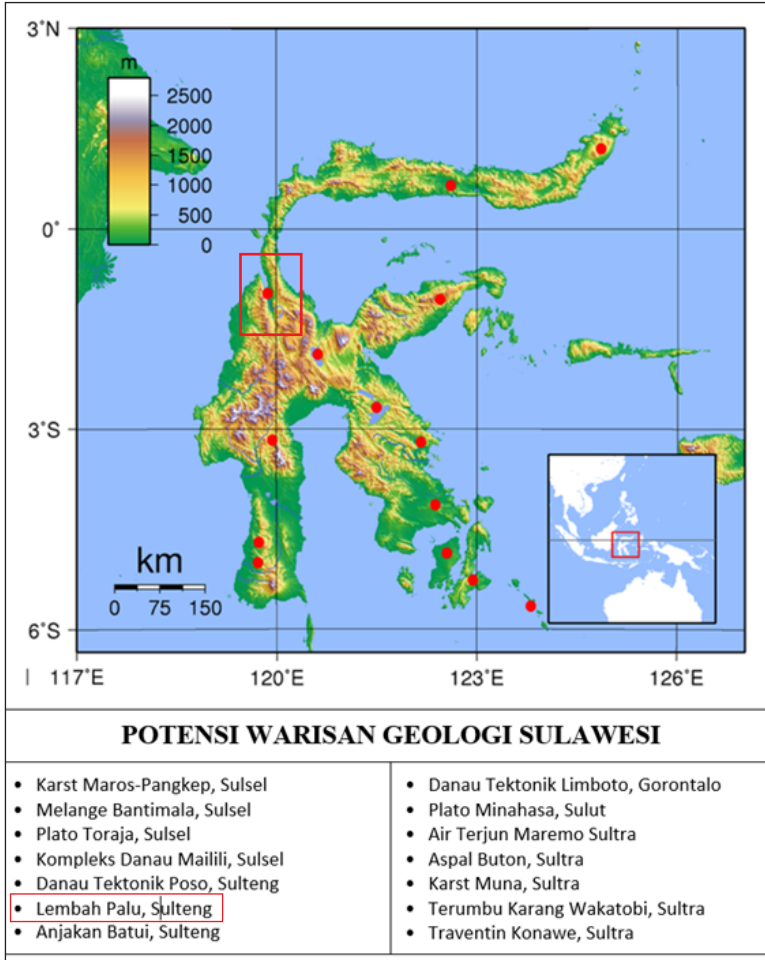


masih beranggapan bahwa geologi hanya berkaitan dengan kegiatan di sektor pertambangan mineral dan hidrokarbon. Adapun informasi geologi lingkungan yang tersedia umumnya belum memasyarakat sehingga informasi geologi hanya dimengerti oleh sesama ahli kebumihan lainnya.

Untuk mengatasi masalah tersebut diperlukan penyediaan data dan informasi kegeologian secara komprehensif dan disebarluaskan (diseminasi) kepada masyarakat. Informasi kegeologiannya harus disajikan dengan sederhana dan dihindari penyajian data yang berlebihan sehingga mudah dimengerti oleh para perencana, ahli-ahli teknik, dan pengambil keputusan.

## **Pengembangan Geopark untuk Palu**

Salah satu bentuk pemanfaatan geologi lingkungan sekaligus penyebarluasan informasi kegeologian adalah



pengembangan konsep geopark atau taman bumi. Sesuai dengan yang dirumuskan oleh lembaga PBB, UNESCO, konsep pengembangan ini menyatukan keragaman geologi (geodiversity), keragaman hayati, dan keragaman budaya demi terciptanya pembangunan yang berkelanjutan.

Hal ini didasarkan kepada kenyataan bahwa pada keragaman geologi yang berlimpah, terdapat komponen-komponen geologi yang memiliki fungsi sebagai jejak rekaman penting sejarah bumi yang dimaknai sebagai situs geologi, baik itu berupa bentang alam, batuan, mineral, fosil, dan tanah, kesemuanya itu adalah bagian integral dari alam. Oleh karena itu, kandungan makna yang penting berupa nilai sejarah yang sangat tinggi, unik, mengagumkan, dan tidak dapat diperbaharui, berpeluang sebagai sebuah warisan geologi (geoheritage) yang perlu dilestarikan keberadaannya. Dengan demikian, keragaman atau komponen geologi yang terdapat di suatu daerah, termasuk, penyebaran dan keberadaannya mewakili evolusi bumi daerah tersebut, termasuk pengaruhnya terhadap konteks kehidupan flora, fauna, serta tatanan sosial masyarakat setempat yang menghasilkan keragaman budaya.

Saat ini pemahaman keragaman geologi (geodiversity), warisan geologi (geoheritage), dan konservasi geologi (geoconservation) mulai mengglobal ketika banyaknya warisan geologi yang semakin terancam oleh perubahan sosial ekonomi ke arah materialisme manusia yang tidak terkendali, menyebabkan terjadinya penghancuran dan hilangnya beberapa warisan geologi. Keadaan ini dipandang suatu kemerosotan yang memprihatinkan seluruh negara di dunia.

Pada praktiknya, geopark adalah pola pengembangan kawasan yang memadukan prinsip atau nilai perlindungan, pendidikan, dan penumbuhan ekonomi lokal, melalui kegiatan wisata alam atau dikenal sebagai geowisata. Untuk menjamin agar ketiga nilai tersebut dapat diterapkan pada suatu kawasan, maka rencana geopark untuk pengembangan kawasan itu harus dapat diintegrasikan ke dalam rencana tata ruang wilayah dan rencana pengelolaan lingkungan, agar pembangunan berkelanjutan untuk memuliakan bumi dan mensejahterakan



masyarakat di sekitarnya bisa terwujud.

Dalam konteks wilayah Palu, sumber daya geologinya yang nyata-nyata terbentuk dari proses geologi yang telah dan sedang berlangsung sejak ratusan juta tahun yang lalu berupa bentang alam, batuan, mineral, dan tanah. Dengan hadirnya sesar aktif Palu-Koro yang berperan membentuk bentang alam seperti pegunungan, perbukitan, lembah/ngarai, air terjun, tersingkapnya keragaman batuan, mineral, tanah dan lainnya tentu menjadi nilai tambah bagi warisan geologi yang dimilikinya, sehingga menjadikan wilayah Palu dan sekitarnya berpeluang besar dikembangkan sebagai perwujudan konsep geopark. Sehingga nantinya, dapat dikembangkan dan ditingkatkan hingga menjadi geopark nasional maupun geopark global.

Sebagai pendukung di wilayah selatan Lembah Palu terdapat Taman Nasional Lore Lindu yang merupakan kawasan lindung seluas 2.290 kilometer persegi berstatus Jaringan Cagar Biosfer Dunia tahun 1982. Taman nasional ini terdapat di Kabupaten Poso dan Kabupaten Sigi, diapit lembah Palu dan lembah Pablo di utara, sungai Lariang dan Lembah Kulawi di barat, Lembah Napu di timur dan juga Lembah Bada di selatan. Orang-orang yang tinggal di sekitar kawasan taman nasional sebagian besar adalah suku Kaili Ledo, Kaili Ija, Kaili Ado, Kaili Moma, Kaili Tohulu, Kaili Da'a, Kulawi, Behoa, Pekurehua dan Bada.

Kekayaan flora dan faunanya sangat berlimpah. Hal ini pun karena berkaitan dengan pertemuan berbagai lempeng tektonik yang memunculkan pembengkokan, deformasi dan pengumpulan lahan sejak pulau ini pertama kali terbentuk. Hasil pembentukan geologi itu, menghasilkan keragaman flora dan faunanya yang unik. Untuk floranya, antara lain ditemukan rotan (*Callamus spp.*), beringin (*Ficus spp.*), leda (*Eucalyptus*

*deglupta*), aren (*Arenga pinnata*), kepayang (*pangium edule*), 88 spesies anggrek, pakis *Asplenium sp.*, *Platynerium sp.*, uru, resin, *Nepenthes sp.*, pinus (*Casuarina sumatrana*), dan wanga (*Figafetta filans*).

Sementara faunanya antara lain ada anoa (*Bubalus depressicomis* dan *Bubalus quarlessi*), babirusa, palanger Sulawesi (*Phalanger celebencis*), tarsius (*Tarsius diana*), monyet Sulawesi (*Macaca tonkeana*), luwak (*Macrogalidia musschenbroeckii*), maleo (*Macrocephalon maleo*), enggang (*Rhyticeros cassidix*), elang Sulawesi (*Spizaetus lanceolatus*), 55 jenis kelelawar, piton (*Python reticulatus*), king cobra (*Ophiophagus hannah*), racer snake (*Elapheieythrura danejansen*), 21 spesies kadal besar dan lainnya.

Sementara, tinggalan keragaman budaya yang menakjubkan di taman nasional ini, antara lain 419 megalit batu besar dari Zaman Batu (3.000 sampai 1.300 SM), dengan rincian sekitar 43 batu ada di Lore Utara, 306 di Lore Tengah, 57 di Lore Selatan dan 13 di Kulawi. Ditambah dengan khazanah keragaman budaya yang dimiliki oleh suku-suku bangsa yang hidup dan berkembang di wilayah Palu dan sekitarnya.

Dengan upaya perwujudan konsep geopark di wilayah Palu dan sekitarnya diharapkan dapat menjaga dan menjamin perlindungan terhadap warisan geologi, hayati dan budaya, sekaligus mengedepankan upaya menyejahterakan masyarakat setempat dengan jalan pengembangan ekonomi yang berkelanjutan. Dengan demikian, maksud tersebut sejajar dengan visi-misi Badan Geologi yang terus berupaya untuk terus mengedepankan upaya geologi untuk turut melindungi sekaligus menyejahterakan masyarakat.

\*Oki Oktariadi, Penyelidik Bumi Utama di Badan Geologi

# Daftar Pustaka

- Allen, T.I. dan D.J. Wald., 2008. “*Short Note: On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30)*”. *BSSA* **99(2A)**, 935-943. doi: 10.1785/0120080255
- Anonim, 2010. “Pengelolaan Kota dan Upaya Pengurangan Resiko Bencana di Kota Palu”. BAPPENAS, Sumber Internet, diunduh November 2012.
- Anonim, 2018. *Kota Palu Dalam Angka 2018*. Badan Pusat Statistik Kota Palu.
- Anonim, 2018. *Laporan penanganan bencana di Palu, Donggala dan Sigi*. Bappenas, Jakarta.
- Anonim, 2011. *Peraturan Daerah Kota Palu Nomor 16 Tahun 2011 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Palu Tahun 2010 – 2030*.
- Anonim, 2014. *Peraturan Pemerintah Nomor 31 Tahun 2014 Tentang Kawasan Ekonomi Khusus Palu*.
- Anonim, 2014. *Penyusunan Buku Putih Sanitasi Kota Palu*. Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) Kota Palu.
- Anonim, 2014. *Profil kawasan Palu dan sekitarnya*. Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- ANONIM, 2011. *Peta Tata Guna Lahan Kota Palu*. BAPPEDA, Palu.
- Arief, S. dan Hidayat, R.S., 1991. *Peta Hidrogeologi Lembar Palu, Sulawesi Tengah, Skala 1:250.000*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Badan Geologi. 2009. *Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Pulau Sulawesi*. Badan Geologi, Bandung.
- Badan Informasi Geospasial (BIG), BATNAS\_115E-120E\_05S-000\_MSL,
- Badan Standardisasi Nasional, 2012. *Tatacara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2012)*.
- Bailey, B. L., R. D. Miller, S. Peterie, J. Ivanov, D. Steeples, and R. Markiewicz., 2013. “Implications of  $V_p/V_s$  ratio on shallow P and S reflection correlation and lithology discrimination”. *SEG Houston 2013*

*Annual Meeting.*

- Bastin S.H., Quigley M.C., dan Basset K., 2015. "Comparison of Liquefaction-induced Land Damage and Geomorphic Variability in Avonside, New Zealand". *6<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Christchurch, New Zealand.
- Bellier, O., Sbrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., dan Pratomo, I., 2001. "High Slip Rate for a Low Seismicity along the Palu Koro Active Fault in Central Sulawesi (Indonesia)". Blackwell Science Ltd., Terra Nova, 13, 463 – 470.
- BMKG., 2018. Data gempa bumi 28 September – 2 Oktober 2018.
- Castagna, J.P., M.L. Batzle, dan R.L. Eastwood, 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks. *Geophysics*, 50(4), 571-581.
- Chiou, B., and R. Youngs, 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra* **30(3)**, 1117-1153
- Cipta, A., Cummins, P., Irsyam, M. dan Hidayati, S., 2018. "Basin resonance and seismic hazard in Jakarta, Indonesia". *Geosciences*, **8(4)**.
- Cipta, A., R. Robiana, J.D. Griffin, N. Horspool, S. Hidayati dan P. Cummins, 2016. A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia. Special Publication: *Geological Society of London*. Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction (editor: Cummins P, dan I. Meilano). **441**, 133-152. <http://doi.org/10.1144/SP441.6>
- Cipta, A dan A. Solikhin., 2011. Pendugaan Kecepatan Gelombang Permukaan (VS30) di Pulau Sulawesi Berdasarkan Klasifikasi Geomorfologi dan Aplikasinya. *Jurnal Gunungapi dan Mitigasi Bencana Geologi* **3(2)**
- Cipta, A, P. Cummins, J. Dettmer, E. Saygin, M. Irsyam, A. Rudyanto and J. Murjaya., 2018. "Seismic velocity structure of the Jakarta Basin, Indonesia, using trans-dimensional Bayesian inversion of horizontal-to-vertical spectral ratios". *Geophys. J. Int.*, **215(1)**, 431-449, doi: 10.1093/gji/ggy289
- Costa, J.E., 1984. Physical geomorphology of debris flows. *Dalam*: Costa, J.E. and Fleisher, P.J., editors, *Developments and applications of geomorphology*. Springer-Verlag, p. 268-317, New York.
- Firmansyah, J. Dan Irsyam, M., 1999. "Development of Seismic hazard map

- for Indonesia”. *Prosiding Konferensi nasional Rekayasa Kegempaan di Indonesia*, ITB, Indonesia.
- G. Zhang, P.K. Robertson, R.W.I. Brachman, 2002. Estimating Liquefaction-induced Ground Settlements from CPT for Level Ground. *Canada Geotech Journal* 39 p.1168 – 1180.
- G. Zhang, P.K. Robertson, R.W.I. Brachman, 2004. “Estimating Liquefaction-induced Lateral Displacement Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, p.861 - 871.
- Geomagz, 2015. Mikrozonasi Bahaya Gempa bumi Kota Mataram. *Majalah Geologi Populer Geomagz*. Sekretariat Badan Geologi, Bandung.
- George, P., 2008. “LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence”. *Journal of Engineering Geology* 96, Elsevier Publications, pp.94 – 104.
- Georisk Project, 2014. *Microzonation Studies using Microtremor*. Manual.
- Giraud, R.E., 2005. *Guidelines for the Geologic Evaluation of the Debris Flow Hazards on Alluvial Fans in Utah*. Utah Geological Survey.
- Hall, R. dan Wilson, M.E.J., 2000. “Neogene sutures in eastern Indonesia”. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 18, hal. 781-808.
- Hamilton, W., 1979. *Tectonic of Indonesia Region*. Geological Survey Professional Paper, United States Government Printing Office, Washington.
- Han, D-h., A. Nur, dan D. Morgan., 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, **51(11)**, 2093-2107.
- Harun, M., Turu, G., Malissa, Z., 2010. Mikrozonasi Seismic dan Analisis Respon Site Pasific Kota Palu, Smartek, Palu.
- Heath, W. dan Saroso, B.S., 1988. “Natural Slope Problems Related to Roads in Java Indonesia”. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. On Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, pp.259-266.
- Hereford, R., Thompson, K.S., Burke, K.J., and Fairley, H.C., 1996, Tributary debris fans and the late Holocene alluvial chronology of the Colorado River, eastern Grand Canyon, Arizona: *Geological Society of America Bulletin*, v. 108, no. 1, p. 3-19.
- Hidayati, S., A. Cipta, A. Omang, R. Robiana, dan J. Griffin., 2013. Earthquake hazard map of Papua, Indonesia. *Proceedings of the Thematic Session*,

- 49th CCOP Annual Session 22-23 October 2013, Sendai, Japan.  
[https://prosesweb.bmkg.go.id/wp-content/uploads/Ulasan-Gempa-DONGGALA\\_28092018\\_rev13102018.pdf](https://prosesweb.bmkg.go.id/wp-content/uploads/Ulasan-Gempa-DONGGALA_28092018_rev13102018.pdf) didownload 13 November 2018  
<http://www.geopsy.org>  
[http://www.risknat.org/projets/sismovalp/CD2/ArticlesPDF/SESAME\\_Deliverable\\_D1110\\_final.pdf](http://www.risknat.org/projets/sismovalp/CD2/ArticlesPDF/SESAME_Deliverable_D1110_final.pdf)  
<http://www.gripweb.org/gripweb/?q=countries-risk-information/documents-publications/guidelines-implementation-hv-spectral-ratio>  
<https://www.pressreader.com/indonesia/kompas/20181002/281496457221340> Sesar Palu Koro  
<https://tacigi.lelemuku.com/2018/11/danrem-132tadulako-tinjau-banjir.html>  
<http://tides.big.go.id/DEMNAS/Batnas.php>, accessed on October 31, 2018  
 Idriss, IM & Boulanger, RW, 2004. "Semi-Empirical Procedures For Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes". *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ICSDEE & 3<sup>rd</sup> ICEGE*, pp 32 – 56.  
 Irsyam M, dkk., 2010. *Peta Zonasi Gempa Indonesia*. Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.  
 Irsyam, M. dkk., 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, Jakarta.  
 Iwasaki, T, 1986. Soil Liquefaction Studies in Japan : State of The Arts, Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Vol. 5 No.1, Computational Mechanics Publications.  
 Jacka M.E. dan Murahidy K.M., 2011. *Observation and characterisation of land damage due to liquefaction and lateral spreading*, Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.  
 JAXA, Earth Observatory of Singapore, Sentinel Asia., 2018. Citra ALOS 2221 (Agustus – 2 Oktober 2018)  
 Keefer, D. K., 2000. *Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event*, Engineering Geology 58(3-4): 231-249  
 Keefer, D.K., 2002. Investigating Landslides Caused By Earthquakes – A

- Historical Review. *Journal of Surveys in Geophysics*, 23, 473-510.
- M. Daryono, 2016. *Paleoseismologi Tropis Indonesia (Dengan Studi Kasus di Sesar Sumatera, Sesar Palu-Koro-Matano dan Sesar Lembang)*. Disertasi, Program Studi Doktor Sain Kebumihan, ITB.
- Marjiyono, Kusumawardhani, H, Soehaemi, A., 2013. Struktur Geologi Bawah Permukaan Dangkal Berdasarkan Interpretasi Data Geolistrik Studi Kasus Sesar Palu Koro. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, Vol 23 No 1, Bandung.
- Murtolodan Hasan B.S., 1994. *Peta Geomorfologi Lembar Palu dan Sekitarnya Sulawesi Tengah*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Nakamura, Y., 1989. "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface". *Quarterly Report of RTRI*. 30, (1). 25-33.
- Nakano Maho, Chigira M, Chounsian Lim, and Sumaryono, 2015. "Geomorphological and geological features of collapsing landslide induced by the 2009 Padang Earthquake". *10th Asian Regional Conference of IAEG*.
- NEIC, USG., 2012. *Earthquake catalogue 1970 -2012*.
- NEIC, USGS, 2018. *Earthquake Catalogue*.
- Piya, B.K, 2004. *Generation of Geological database for the Liquefaction hazard assessment in Kathmandu valley*. Tesis, ITC, Netherlands.
- Pusat Studi Gempa Nasional, 2017. *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*, ISBN 978-602-5489-01-3, Puslitbang Perumahan dan Permukiman, Balitbang Kementerian PUPR, Jakarta.
- PVMBG, 2009. *Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Sulawesi Tengah*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- PVMBG, 2011. *Laporan Amplifikasi Kota Palu*, laporan intern, 23 h, tidak diterbitkan. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Robertson, P.K., dan Wride, C.E., 1998. "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test". *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (3), pp. 442-459.
- Robiana, R., Athanasius, C., Solikhin, A., Griffin, J., Horspol, N., 2012. *Peta kawasan rawan bencana gempabumi daerah Sulawesi Tengah*.

- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Robinson, D., T. Dhu and J. Schneider, 2006. "Practical Probabilistic Seismic Risk Analysis: A Demonstration of Capability". *Seismological Research Letters*, 77(4), 453-459.
- Ruchyat, S. dan Boetje, R.D., 1989. *Survei Potensi Air Tanah Daerah Palu, Sulawesi Tengah*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Schneider, JA & Mayne PW, 1999. "Soil Liquefaction Response in Mid-America Evaluated by Seismic Piezocone Tests". Geosystem Program Civil & Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332.
- Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., 2001. "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Respon Evaluation". *Proc. 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor Professor W.D. Liam Finn*, San Diego.
- Silver, E.A., McCaffrey, R. Joyodiwiryoy, Y. and Stevens, S., 1983. "Ophiolite emplacement by collision between the Sula Platform and the Sulawesi Island Arc, Indonesia". *J. Geoph. Res.*, 88B: 9419-9435.
- Simandjuntak, T.O., 1986. *Sedimentology and Tectonic of the Collision Complex in the East Arm of Sulawesi, Indonesia*. Disertasi University of London (unpubl), 374 h.
- Simandjuntak, T.O., Surono, and Supandjono, J.B., 1993. *Peta Geologi Lembar Poso, Sulawesi, Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Simandjuntak, T.O., Surono, dan Supandjono, J.B., 1997. *Peta Geologi Lembar Poso, Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Soehaimi A., Firdaus M., dan Effendi I., 2000. *Peta Zonasi Kerentanan Bencana Gempabumi Daerah Palu dan Sekitarnya*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Soehaimi A, Marjiyono and Wahyono H., 2013. *Peta Seismotektonik Daerah Palu dan Sekitarnya, Sulawesi Tengah, Skala 1 : 150.000*. Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Soekamto, RAB., Sumadirdja, H., Suptandar, T., Hardjoprawiro, S., dan



- Sudana, D., 1973. *Peta Geologi Lembar Palu, Skala 1 : 250.000, Sulawesi*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Soekamto, RAB., 1975. *Peta Geologi Indonesia Lembar Ujung Pandang, Skala 1 : 1.000.000*. Direktorat Geologi, Bandung.
- Sri Widiyantoro, Nugraha, A.D., Ridwan, M., Zulfakriza, Supendi, P., Rosalia, S., 2018. Lessons Learned dari Gempa Lombok dan Sulawesi Tengah: Implikasi untuk Jawa Barat, Aula Timur ITB, 23 Oktober 2018.
- Sriyati, 2010. *Kondisi Seismisitas dan dampaknya untuk Kota Palu*. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Palu.
- Suryaman, Danaryanto, Hadi S., dan Suroto, 1995. *Potensi Air Tanah Cekungan Palu, Sulawesi Tengah*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Sukamto, R, dkk., 1973. *Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Sukamto, R., Sumadirdja, H., Suptandar, T., Hardjoprawiro, S., Sudana, S., 1994. *Peta Geologi Lembar Palu, Sulawesi, Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Sukamto, R., 1975b. "The structure of Sulawesi in the Light of Plate Tectonics". Paper presented in Regional Conference of Geology and Mineral Resources, Southeast Asia, Jakarta
- Sukamto, R. dan Simandjuntak, T.O., 1983. "Tectonic relationship between geologic provinces of Western Sulawesi, Eastern Sulawesi and Banggai-Sula in the light of sedimentological aspects". *Indonesian Geological Research and Development Centre Bulletin*, 7, h.1-12.
- Sukido, Sukarna D, Sutisna, K., 1993. *Peta Geologi Lembar Pasangkayu, Sulawesi, Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Supendi, P dr., 2018. Dalam: Lessons Learned dari Gempa Lombok dan Sulawesi Tengah: Implikasi untuk Jawa Barat, Aula Timur ITB, 23 Oktober 2018.
- Surono, and Hartono, U., 2013. *Geologi Sulawesi*. LIPI Press, 3-6.
- Surono, 1996a. Asal mintakat mintakat benua di bagian timur Sulawesi. Suatu tinjauan berdasarkan stratigrafi, sedimentology, dan paleomagnetik. *Kumpulan makalah seminar nasional, Peran Sumberdaya Geologi Dalam PJP II*. Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, 123 - 138.

- Surono, 1996b. "Stratigraphy review of the Southeast Sulawesi, eastern Indonesia". *Proceedings Indonesia Association of Geologists (IAGI) Annual Convention*.
- Sumaryono, Wahyudi, D., Muslim D., Sulaksana N., Wafid, A. N., Yunara, D, T. Hidayati, S., 2015. "Control Morphology to the Landslide induced by Eartquake: Case Study padang Pariaman, Sumatra". *10th Asian Regional Conference of IAEG*.
- Supartoyo, Surono, dan Putranto, E.T., 2014. *Katalog Gempabumi Merusak Indonesia Tahun 1612 – 2014 (Edisi Kelima)*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Tarabusi, G. dan Caputo, R., 2016. The use of HVSR measurements for investigating buried tectonic structures: the Mirandola anticline, Northern Italy, as a case study, *Int. J. Earth Sci.*, **106(1)**, 341–353.
- Todd, D. K. (1980). *Groundwater Hydrology 2<sup>nd</sup> Edition*. John Wiley & Sons, New York.
- UBC. 2003. Uniform Building Code. *International Conference of Building Officials*. Willier, California
- Uebayashi, H., 2003. "Extrapolation of Irregular Subsurface Structures Using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Long-Period Microtremors". *Bull. Seism. Soc. Am.* **93(2)**, 570-582.
- USGS, 2006. *Sesimicity Map of Indonesia*. www.USGS.gov, diakses tanggal 1 November 2012.
- Wakamatsu, K. M., M. Matsuoka and K. Hasegawa, 2006. "GIS-Based Nationwide Hazard Zoning Using The Japan Engineering Geomorphologic Classification Map". *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering* , Paper No. 849.
- Wald, D.J., T.I. Allen, 2007. *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ( $V_s^{30}$ ) and Amplification Around the Globe*. USGS Open-File Report **2007-1357**.
- Welsh, A dan Davies, T., 2010. "Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards". *Landslides* DOI 10.1007/s10346-010-0238-4, Springer-Verlag
- Whipple, K.X., and Dunne, T., 1992. "The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California". *Geological Society of America Bulletin*, v. 104, no. 7, p. 887-900.

- Wiegel, R. L. 1970. *Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 22, 209
- Wirabuana T., Sugalang., 2011. Penyelidikan Geologi Teknik Potensi Likuifaksi Bengkulu, Provinsi Sumatera Selatan. Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Bandung.
- World Institute for Disaster Risk Management, Inc., 2004. *Seismic Microzonation for Municipalities*. Manual. [www.DRMonline.net](http://www.DRMonline.net)
- Zeffitni, 2013. Potensi Air Tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Palu Berdasarkan Satuan Hidromorfologi dan Hidrogeologi. *Jurnal Geografi* Vol 11 No. 22, 97-106
- Zhang, J. dan Su, F., 2011. "The Characteristics of Landslides Induced by the Wenchuan Earthquake Based on High Spatial Resolution Remote Sensing Images". *Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides*, Kiryu, Japan, November 7-9 2012; Ugai, K., Yagi, H., Wakai, A., Eds.; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2013; 331-339.

# Senarai Kata

**Air:** semua air yang terdapat pada, di atas atau di bawah permukaan tanah, termasuk air laut yang berada di darat.

**Air Permukaan:** Air yang terdapat pada permukaan tanah

**Air Tanah:** Air yang terdapat di dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah

**Akuifer:** lapisan batuan jenuh Air Tanah yang dapat menyimpan dan meneruskan Air Tanah dalam jumlah cukup dan ekonomis.

**Akuifer Tertekan:** Akuifer yang dibatasi di bagian atas dan bawahnya oleh lapisan kedap air.

**Akuifer Tidak Tertekan:** Akuifer yang dibatasi di bagian atasnya oleh muka Air Tanah bebas dan di bagian bawahnya oleh lapisan kedap air.

**Ancaman bencana:** suatu kejadian atau peristiwa yang bisa menimbulkan bencana.

**Atmosfer:** suatu tekanan, disingkat atm, setara dengan tekanan udara pada permukaan laut di muka bumi. Tekanan di planet dan benda-benda lain diukur dalam perkalian atau pecahan dari satuan dasar ini. Dalam satuan sistem internasional, tekanan pada umumnya diukur dengan nilai paskal, disingkat Pa; 1 atm = 101.300 paskal.

**Banjir:** peristiwa terbenamnya daratan (yang biasanya kering) karena volume air yang meningkat

**Barang tambang:** mineral/bahan yang terkandung di dalam bumi dan dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia.

**Batuan:** himpunan mineral sejenis atau tidak sejenis yang satu dan lainnya terikat, baik berbentuk gembur maupun padat.

**Bencana:** peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor nonalam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

**Bencana alam:** bencana yang diakibatkan oleh peristiwa atau serangkaian peristiwa yang disebabkan oleh alam antara lain berupa gempa bumi,

tsunami, gunung meletus, banjir, kekeringan, angin topan, dan tanah longsor.

**Bencana nonalam:** bencana yang diakibatkan oleh peristiwa atau rangkaian peristiwa nonalam yang antara lain berupa gagal teknologi, gagal modernisasi, epidemi, dan wabah penyakit.

**Bentang Alam:** suatu unit yang dikategorikan berdasarkan kesamaan karakteristik genesa utama, relief, iklim, dan karakteristik batuanannya.

**Biosfer:** semua makhluk hidup serta bagian bumi tempat hunian makhluk hidup, yaitu bagian bawah atmosfer, bagian paling atas litosfer, dan seluruh bagian hidrosfer.

**Cagar Alam Geologi:** objek geologi yang terbentuk secara alami dan karena keunikannya memerlukan upaya perlindungan.

**Cekungan Air Tanah:** suatu wilayah yang dibatasi oleh batas hidrogeologik, tempat semua kejadian hidrogeologik seperti proses pengimbuhan, pengaliran, dan pelepasan Air Tanah berlangsung.

**Continental drift:** pergeseran horizontal benua yang menyebabkan perubahan letak satu benua terhadap benua yang lain.

**Continental shelf:** bagian benua yang tergenang laut, merupakan dasar laut yang dalamnya kurang dari 200 m dan reliefnya hampir datar berbatasan dengan *slope*.

**Danau:** cekungan luas di daratan, tempat penampungan air daerah sekitarnya.

**Danau buatan:** danau yang dibuat oleh manusia.

**Danau karst:** terjadi karena larutnya batuan kapur sehingga membentuk cekungan. Cekungan yang bentuknya membulat disebut *doline*.

**Dataran rendah:** dataran yang memiliki ketinggian tidak lebih dari 200 m dari permukaan air laut.

**Dataran tinggi:** kawasan di antara dataran rendah dan pegunungan.

**Daya Air:** potensi yang terkandung dalam Air dan/atau pada Sumber Air yang dapat memberikan manfaat atau kerugian bagi kehidupan dan penghidupan manusia serta lingkungannya.

**Daerah Imbuhan Air Tanah:** daerah resapan air yang mampu menambah Air Tanah secara alamiah pada Cekungan Air Tanah.

**Daerah Lepas Air Tanah:** daerah keluaran Air Tanah yang berlangsung secara alamiah pada Cekungan Air Tanah.

- Daya Tarik Wisata:** segala sesuatu yang memiliki keunikan, keindahan, dan nilai yang berupa keanekaragaman kekayaan alam, budaya, dan hasil buatan manusia yang menjadi sasaran atau tujuan kunjungan wisatawan.
- Destinasi Pariwisata:** kawasan geografis yang berada dalam satu atau lebih wilayah administratif yang di dalamnya terdapat daya tarik wisata, fasilitas umum, aksesibilitas, serta masyarakat yang saling terkait dan melengkapi terwujudnya kepariwisataan.
- Daerah Aliran Sungai:** keseluruhan wilayah yang airnya bermuara pada sungai induk (sungai utama) bersama dengan anak-anak sungainya.
- Delta:** tanah endapan berbentuk segitiga yang berkaitan dengan muara sungai.
- Ekologi:** ilmu tentang hubungan timbal balik antara makhluk hidup dan lingkungannya.
- Endogen:** gaya dari dalam bumi.
- Eksogen:** gaya dari luar bumi.
- Episentrum:** titik pada permukaan bumi yang terletak tegak lurus di atas pusat gempa yang ada di dalam bumi.
- Erosi:** pengikisan batuan dan tanah oleh suatu gerakan alam (air, es, angin, air laut).
- Episentral:** jarak antara sumber gempa dan stasiun pengamat gempa.
- Episentrum:** titik atau garis di permukaan bumi sebagai tempat gelombang gempa dirambatkan ke wilayah di sekitarnya.
- Ekstrusi:** proses peresapan magma melalui lapisan litosfer sampai ke permukaan bumi.
- Episentrum:** titik di permukaan bumi tepat di atas hiposentrum tempat gelombang permukaan mulai dirambatkan.
- Formasi geologi:** susunan batuan yang mempunyai keseragaman ciri-ciri geologis yang nyata, baik terdiri dari satu macam jenis batuan, maupun perulangan dari dua jenis batuan atau lebih yang terletak di permukaan bumi atau di bawah permukaan.
- Garis bujur:** garis yang menghubungkan Kutub Utara dan Kutub Selatan.
- Garis lintang:** garis yang sejajar dengan ekuator.
- Gempa:** bergetarnya lapisan litosfer dan permukaan Bumi karena sebab-sebab tertentu.

**Gerakan tanah:** proses pelepasan dan pemindahan massa batuan secara alami dari satu tempat ke tempat lain oleh suatu tenaga yang bergerak di atas permukaan bumi.

**Graben:** bagian yang turun di daerah patahan berdampingan dengan *horst*.

**Gempabumi:** pelepasan energi secara tiba-tiba yang diteruskan melalui bumi ke segala arah dalam bentuk gelombang-gelombang seismik.

**Geosfer:** lapisan kulit bumi.

**Geografis:** sistem yang bertugas mengumpulkan, mengatur, mengelola, menyimpan sampai menyajikan data (informasi) yang berkaitan dengan geografi.

**Geologi:** ilmu bumi khusus mengenai batu-batuan.

**Geomorfologi:** ilmu yang mempelajari bentuk-bentuk bumi.

**Gosong:** timbunan pasir di muara sungai atau di tepi laut.

**Geopark:** kawasan yang memiliki keunikan keragaman geologi (*geodiversity*) bernilai warisan geologi (*geoheritage*) yang dilindungi secara nasional maupun internasional yang berisikan sejumlah peninggalan bersejarah penting, langka atau memiliki penampakan yang indah.

**Geosite:** tempat bentukan geologi unik berada dan tempat melihat pemandangan bentukan bentang alam (geomorfologi) alam serta dilengkapi dengan panel yang menjelaskan proses pembentukannya.

**Geowisata:** kunjungan ke kawasan keunikan formasi geologi untuk tujuan rekreasi pasif dan aktif, mengagumi keindahan alam, apresiasi dan pembelajaran.

**Hiposentrum:** titik atau garis dalam litosfer yang menjadi tempat terjadinya gempa.

**Hidrograf:** grafik yang menggambarkan hubungan antara kedudukan muka Air Tanah dan waktu.

**Hidrologi:** ilmu tentang air di bawah tanah, keterdapatannya, peredaran dan sebarannya, persifatan kimia dan fisiknya, reaksi dengan lingkungan termasuk hubungannya dengan makhluk hidup.

**Hidosfer:** bagian bumi yang berupa air dalam bentuk cair dan zat-zat lain yang larut di dalamnya.

**Hiposentrum:** pusat gempa di bawah permukaan bumi.

**Iklim:** rata-rata kondisi cuaca tahunan dan meliputi wilayah yang luas.

**Intrusi:** batuan beku yang terbentuk karena peresapan magma ke dalam

lapisan litosfer memotong atau menyisip di antara lapisan atmosfer itu, di antaranya dikes, sills (keping intrusi), apofisa, dan lakolit.

**Infiltrasi:** proses peresapan air melalui lapisan-lapisan tanah.

**Karst:** bentang alam yang terbentuk akibat pelarutan air pada batu gamping dan/atau dolomit.

**Kawasan Bentang Alam Karst:** Karst yang menunjukkan bentuk eksokarst dan endokarst tertentu.

**Kawasan Cagar Alam Geologi:** wilayah yang ditetapkan dengan fungsi utama untuk melindungi Cagar Alam Geologi.

**Kawasan Rawan Bencana Gunung Api:** kawasan yang pernah terlanda atau diidentifikasi berpotensi terancam bahaya erupsi gunung api baik secara langsung maupun tidak langsung.

**Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi:** daerah yang memiliki potensi terhadap ancaman bahaya gempa bumi.

**Kawasan Rawan Bencana Tsunami:** daerah yang memiliki potensi terhadap ancaman bahaya tsunami.

**Kawasan strategis pariwisata:** kawasan yang memiliki fungsi utama pariwisata atau memiliki potensi untuk pengembangan pariwisata yang mempunyai pengaruh penting dalam satu atau lebih aspek, seperti pertumbuhan ekonomi, sosial dan budaya, daya dukung lingkungan hidup, serta pertahanan dan keamanan.

**Keadaan Darurat Bencana:** suatu keadaan yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan sekelompok orang/masyarakat yang memerlukan tindakan penanganan segera dan memadai.

**Kesiapsiagaan:** serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk mengantisipasi bencana melalui pengorganisasian serta melalui langkah yang tepat guna dan berdaya guna.

**Konservasi Air Tanah:** upaya memelihara keberadaan serta keberlanjutan keadaan, sifat, dan fungsi Air Tanah agar senantiasa tersedia dalam kuantitas dan kualitas yang memadai untuk memenuhi kebutuhan makhluk hidup, baik pada waktu sekarang maupun yang akan datang.

**Kondisi Air Tanah:** keadaan Air Tanah pada suatu saat yang mencakup kuantitas dan kualitas Air Tanah dalam suatu sistem Akuifer.

**Korban bencana:** orang atau kelompok orang yang menderita atau meninggal dunia akibat bencana.



**Kualitas Air Tanah:** sifat fisika, kandungan kimia, serta kandungan bakteri Air Tanah.

**Lanau:** kepingan atau butiran batu yang lebih kecil dari pasir halus tetapi lebih besar dari lempung.

**Laut:** kumpulan air asin yang memisahkan benua atau pulau yang satu dengan benua atau pulau yang lain.

**Lembah:** bentuk muka bumi yang mencekung biasanya dikelilingi gunung atau pegunungan.

**Lereng:** daerah yang permukaan tanahnya miring.

**Letak:** posisi suatu tempat berdasarkan garis lintang dan garis bujur astronomis. Berdasarkan letak astronomisnya, Kepulauan Indonesia terletak antara 95° BT - 141° BT dan 6° LU - 11° LS.

**Letak geografis:** letak suatu tempat berdasarkan keadaannya di permukaan bumi.

**Letak geologis:** letak suatu daerah berdasarkan kondisi geologinya, terutama berdasarkan tatanan tektonik.

**Likuifaksi:** gejala peluluan pasir lepas yang bercampur dengan air akibat guncangan gempa di mana gaya pemicu melebihi gaya yang dimiliki litologi setempat dalam menahan guncangan.

**Lingkungan Air Tanah:** lingkungan fisik yang terpengaruh oleh Kondisi Air Tanah.

**Magma:** batuan cair pijar yang terdiri atas berbagai mineral yang terdapat di dalam dapur magma dalam bentuk larutan silikat pijar yang mengandung unsur-unsur oksida, sulfida, gas, air, dan lain-lain, bersifat mobil dengan temperatur sekitar 1.1000 C - 1.2000 C, serta akan menjadi batuan beku setelah mengalami pendinginan.

**Maar:** gunung api yang kepundannya berbentuk corong dan dikelilingi oleh dinding kawah yang tidak tinggi.

**Mata Air Permanen:** mata air yang selalu mengalir sepanjang tahun.

**Mitigasi:** serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana.

**Muka Air Tanah:** ketinggian permukaan Air Tanah suatu sistem Akuifer pada suatu lokasi dan waktu tertentu.

**Muka Piezometrik:** muka Air Tanah pada Akuifer Tertekan.

**Muka Freatik:** muka Air Tanah pada Akuifer Tidak Tertekan.

**Pariwisata:** berbagai macam kegiatan wisata dan didukung berbagai fasilitas serta layanan yang disediakan oleh masyarakat, pengusaha, pemerintah, dan pemerintah daerah.

**Palung laut:** lembah atau cekungan sempit di dalam laut dengan dinding curam dan kedalamannya lebih dari 6.000 m di bawah paras laut.

**Paparan benua:** dataran di dasar laut di sekeliling benua. Paparan benua berbentuk melandai.

**Pegunungan:** kelompok beberapa gunung.

**Pelapukan:** proses penghancuran massa batuan pembentuk litosfer menjadi bagian-bagian yang lebih kecil.

**Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana:** rangkaian upaya yang meliputi penetapan kebijakan risiko timbulnya bencana, kegiatan pencegahan, tanggap darurat, dan rehabilitasi.

**Peringatan dini:** serangkaian kegiatan pemberian peringatan sesegera mungkin kepada masyarakat tentang kemungkinan terjadinya bencana pada suatu tempat oleh lembaga yang berwenang.

**Peta:** suatu gambaran dari unsur-unsur alam dan/atau buatan manusia, yang berada di atas maupun di bawah permukaan bumi yang digambarkan pada suatu bidang datar dengan skala tertentu.

**Rehabilitasi:** perbaikan dan pemulihan semua aspek pelayanan publik atau masyarakat sampai tingkat yang memadai pada wilayah pascabencana dengan sasaran utama untuk normalisasi atau berjalannya secara wajar semua aspek pemerintahan dan kehidupan masyarakat pada wilayah pascabencana.

**Rekonstruksi:** pembangunan kembali semua prasarana dan sarana, kelembagaan pada wilayah pascabencana, baik pada tingkat pemerintahan maupun masyarakat dengan sasaran utama tumbuh dan berkembangnya kegiatan perekonomian, sosial dan budaya, tegaknya hukum dan ketertiban, dan bangkitnya peran serta masyarakat dalam segala aspek kehidupan bermasyarakat pada wilayah pascabencana.

**Relief:** perbedaan ketinggian pada bagian permukaan bumi.

**Risiko bencana:** potensi kerugian yang ditimbulkan akibat risiko bencana pada suatu wilayah dalam suatu kurun waktu tertentu yang dapat berupa kematian, luka, sakit, jiwa terancam, hilangnya mengungsi, kerusakan, atau kehilangan harta, dan gangguan kegiatan di masyarakat tertentu.

**Strike slip fault:** patahan di muka bumi yang diakibatkan oleh dua tekanan horizontal yang berlawanan arah.

**Stratigrafi:** ilmu yang mempelajari lapisan-lapisan batuan pembentuk muka bumi.

**Seismograf:** alat pengukur gempa.

**Status Keadaan Darurat Bencana:** suatu keadaan yang ditetapkan oleh pemerintah untuk jangka waktu tertentu atas dasar rekomendasi Badan yang diberi tugas untuk menanggulangi bencana terdiri atas Siaga Darurat, Tanggap Darurat, dan Transisi Darurat ke Pemulihan.

**Status Siaga Darurat:** keadaan ketika potensi ancaman bencana sudah mengarah pada terjadinya bencana yang ditandai dengan adanya informasi peningkatan ancaman berdasarkan sistem peringatan dini yang diberlakukan dan pertimbangan dampak yang akan terjadi di masyarakat.

**Status Tanggap Darurat:** keadaan ketika ancaman bencana terjadi dan telah mengganggu kehidupan dan penghidupan sekelompok orang/masyarakat.

**Sumber gempa:** tempat terjadinya gerakan pada struktur batuan.

**Sungai:** masa air tawar yang mengalir secara alamiah pada sebuah lembah mulai dari mata air atau hulu sampai ke muara atau hilir.

**Sumber Daya Air:** air, sumber air, dan daya air yang terkandung di dalamnya.

**Sungai:** bagian daratan berbentuk alur yang melekuk tempat mengalirkan air ke daerah yang lebih rendah.

**Sungai campuran:** sungai yang berasal dari sungai gletser yang telah mendapat tambahan air hujan, misalnya bagian hilir Sungai Digul dan Sungai Memberamo di Papua.

**Tanah:** tubuh alam atau gabungan tubuh alam sebagai hasil perpaduan proses, yaitu gaya perusakan dan pembangunan.

**Tanggap darurat bencana:** serangkaian kegiatan yang dilakukan dengan segera pada saat kejadian bencana untuk menangani dampak buruk yang ditimbulkan yang meliputi kegiatan penyelamatan dan evakuasi korban, harta benda, pemenuhan kebutuhan dasar, perlindungan, pengurusan pengungsi, penyelamatan, serta pemulihan sarana dan prasaran.

**Tektonisme:** tenaga yang bekerja di dalam litosfer berupa tekanan dengan

arah vertical maupun mendatar yang mengakibatkan perubahan letak (dislokasi) lapisan-lapisan batuan.

**Tektonik lempeng:** teori tentang kedudukan, pergerakan, interaksi, dan pengrusakan lempeng-lempeng. Menerangkan kegiatan gempa, kegunungapian, pembentukan pegunungan dan peristiwa gunung api pada masa lalu dalam hubungannya dengan pergerakan lempeng.

**Tsunami:** tsu = gelombang, nami = pelabuhan, gelombang yang melanda pelabuhan.

**Vegetasi:** dunia tumbuh-tumbuhan atau tanam-tanaman.

**Vulkanisme:** proses-proses yang berkaitan dengan kegiatan suatu gunung api, dapat berupa letusan baik eksplosif maupun efusif atau hal yang lain.

**Wisata:** kegiatan perjalanan yang dilakukan oleh seseorang atau sekelompok orang ke tempat tertentu untuk tujuan rekreasi, pengembangan pribadi, atau mempelajari keunikan daya tarik wisata yang dikunjungi dalam jangka waktu sementara.

**Wisatawan:** orang yang melakukan kegiatan wisata.

**Zona Kerentanan Gerakan Tanah:** suatu daerah/area yang mempunyai kesamaan derajat, kerentanan relatif untuk terjadi gerakan tanah.

**Zona Konservasi Air Tanah:** zona atau daerah yang ditentukan berdasarkan kesamaan kondisi daya dukung Air Tanah, kesamaan tingkat kerusakan Air Tanah, dan kesamaan pengelolaannya.

**Zona Perlindungan Air Tanah:** daerah yang karena fungsinya terhadap Air Tanah sangat penting sehingga dilindungi.

**Zona Pemanfaatan Air Tanah:** daerah yang Air Tanahnya dapat dimanfaatkan seperti kawasan budi daya.



### **ANDIANI**

E-mail: [Andianidjarwoto@gmail.com](mailto:Andianidjarwoto@gmail.com)

Ahli geologi, penulis. Lahir di Solo, 3 Agustus 1965. Lulusan Jurusan Geologi, UPN “Veteran” Yogyakarta (1984) dan Magister Perencanaan Wilayah dan Kota ITB (1996). Aktif sebagai Anggota Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI). Pernah mengajar di Fakultas Teknik Unpas, Bandung. Kini Kepala Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan (PATGTL), Badan Geologi, Kementerian ESDM.



### **OKI OKTARIADI**

E-mail: okigt@gmail.com

Ahli geologi, penulis, Ketua Dewan Redaksi *Buletin Geologi Tata Lingkungan* (BGTL), dan *Jurnal lingkungan dan Bencana Geologi* (JLBG). Lahir di Bandung, 19 Oktober 1961. Lulusan S-1 UNPAD tahun 1986 dan S-2 Geologi UNPAD tahun 2004. Sejak 1987 bekerja di PATGTL, sebagai pejabat fungsional penyelidik bumi.



### **ATEP KURNIA**

E-mail: atep.kurnia1979@gmail.com

Penulis, penerjemah, dan editor. Lahir di Bandung, 10 Mei 1979. Lulusan Bahasa dan Sastra Inggris, Fakultas Adab dan Humaniora, Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Gunung Djati, Bandung. Bekerja di Badan Geologi sejak tahun 2012.

# LAMPIRAN FOTO







