



**INVESTIGASI AWAL LONGSOR-LIKUIFAKSI
GEOTECHNICAL EXTREME EVENTS RECONNAISSANCE (GEER)
AKIBAT GEMPA PALU 28 SEPTEMBER 2018
(Geotechnical Report on 2018 Palu-Donggala Earthquake)**



Disusun oleh :



RAPID NHERI
Natural Hazards Reconnaissance



**INVESTIGASI AWAL LONGSOR-LIKUIFAKSI
GEOTECHNICAL EXTREME EVENTS
RECONNAISSANCE (GEER)
AKIBAT GEMPA PALU 28 SEPTEMBER 2018
*(Geotechnical Report on 2018 Palu-Donggala Earthquake)***

Diterjemahkan oleh :
Dr. Didiek Djarwadi
Tim Pusat Studi Gempa Nasional



Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

**INVESTIGASI AWAL LONGSOR-LIKUIFAKSI
GEOTECHNICAL EXTREME EVENTS RECONNAISSANCE (GEER)
AKIBAT GEMPA PALU 28 SEPTEMBER 2018
*(Geotechnical Report on 2018 Palu-Donggala Earthquake)***

PENYUSUN

Tim Pusat Studi Gempa Nasional

ISBN:

978-602-5489-19-8

Penerbit:

**Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat**

Jalan Panyaungan Cileunyi Wetan Kabupaten Bandung 40393

Telp : 022 7798393

Fax : 022 7798392

Cetakan Pertama, September 2019

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, menfotocopy, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

ACKNOWLEDGEMENTS

Buku ini merupakan terjemahan dari Laporan dari Geotechnical Extreme Events Reconnaissance. Tim GEER yang berkerjasama dengan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Pusat Studi Kegempaan Nasional dan HATTI (Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia) telah memeriksa longsor-likuifaksi di Kota Palu dan Kabupaten Sigi, yang sebelumnya telah dipicu oleh gempa bumi Palu pada tanggal 28 September 2018 di Indonesia.

Tim GEER dipimpin oleh H. Benjamin Mason (Oregon State University) yang beranggotakan Aaron Gallant (University of Maine), Daniel Hutabarat (University of California, Berkeley), Jack Montgomery (Auburn University), dan Joseph Wartman (University of Washington). A. Nicole Reed (Auburn University) memberikan dukungan kepada tim lapangan melalui pemetaan kerusakan pra-pengintaian dan bertanggung jawab untuk memetakan perpindahan bangunan menggunakan gambar satelit. Secara khusus, tim lapangan dari Indonesia dipimpin oleh Masyhur Irsyam dan beranggotakan Widjojo Prakoso, Didiék Djarwadi, Dandung Harnanto, Idrus Alatas, Paulus Rahardjo, Pintor Simatupang, Aksan Kawanda, dan Rahma Hanifa. Pemerintah Indonesia sangat mendukung perjalanan lapangan ini dan mengeluarkan izin penelitian.

Secara khusus kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Ardito Kodijat, dari Kantor UNESCO di Jakarta, dan Laura Kong, dari Pusat Informasi Tsunami Internasional, karena membantu kami dengan cepat memproses izin penelitian dan membangun diri kami di Indonesia. Kami yakin bahwa lebih banyak tangan masuk ke proses membantu, membuka pintu, dan membuat kami merasa diterima di Indonesia. Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada semua orang yang memiliki andil dalam kesuksesan kolektif kami. Tim GEER ingin mengucapkan terima kasih kepada Yuamar Imarrazan Basarah dan Youssef Hashash (Universitas Illinois, Urbana-Champaign) karena membantu dengan logistik untuk mendapatkan izin penelitian dan bepergian ke Indonesia, serta Jake Dafni (Universitas Washington) karena membantu dengan Logistik peralatan pusat RAPID pusat NSF funded. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Komite Pengarah GEER dan khususnya David Frost dan Fangzhou Albert Liu (Georgia Tech) karena memberi kami banyak dukungan, bimbingan, dan kontak selama upaya pengintaian. Sebelum bepergian ke Indonesia, Hermann Fritz (Georgia Tech) dan Ian Robertson (Universitas Hawaii) juga memberi kami banyak nasihat mengenai perjalanan dan melakukan tinjauan lapangan di Palu. Kegiatan GEER ini didasarkan pada pekerjaan yang didukung sebagian oleh Yayasan Nasional melalui Program

Teknik Geoteknik di bawah Grant No. CMMI-1266418. GEER juga mendapat dukungan dari Direktur Program Rekayasa Geoteknik NSF: Dr. Richard Fragaszy dan almarhum Dr. Cliff Astill. Dukungan juga diberikan oleh Fasilitas Pengintaian Bencana Alam (dikenal sebagai "RAPID") di bawah hibah NSF 1611820. Anggota GEER telah menyumbangkan waktu, bakat, dan sumber daya mereka untuk mengumpulkan pengamatan lapangan yang sensitif terhadap waktu mengenai efek dari peristiwa ekstrem. Setiap pendapat, temuan, dan kesimpulan atau rekomendasi yang diungkapkan dalam materi ini adalah milik penulis dan tidak mencerminkan pandangan NSF.

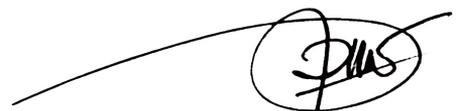
KATA SAMBUTAN

Fenomena likuifaksi yang terjadi setelah Gempa Palu pada Hari Minggu , tanggal 28 September 2018, telah menjadi perhatian dunia dikarenakan terjadi juga longsor atau aliran massa tanah yang bergerak. Fenomena aliran massa tanah tersebut bergerak seperti lumpur membawa bangunan rumah-rumah penduduk yang mengakibatkan korban jiwa yang sangat besar di Kota Palu dan Kabupaten Sigi. Pada kenyataannya fenomena likuifaksi ini merupakan peristiwa yang sudah pernah terjadi di masa lampau saat gempa bumi besar terjadi. Nenek moyang masyarakat Palu memiliki istilah local untuk fenomena likuifaksi, yang menandakan bahwa mereka telah mengenalinya sejak lama. Likuifaksi disebut dengan istilah 'nalodo' yang berarti amblas dihisap lumpur.

Kejadian likuifaksi di Kota Palu dan Kabupaten Sigi pada masa modern ini, telah menjadikan kawasan terdampak menjadi laboratorium alam dalam skala satu banding satu (full scale). Aspek-aspek yang terkait dengan proses terjadinya longsor-likuifaksi perlu dipelajari dengan seksama. Hal ini dapat memberikan manfaat yang sangat besar bagi Kota Palu dan Kabupaten Sigi maupun daerah lain yang beresiko likuifaksi akibat gempa bumi, sebagai upaya mitigasi bencana dimasa mendatang.

Survey lapangan, untuk pengambilan data dan informasi terkait likuifaksi di Kota Palu dan Kabupaten Sigi, telah melibatkan berbagai tenaga ahli dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Pusat Studi Kegempaan Nasional, GEER, ITB dan HATTI. Semoga dengan kerjasama antar institusi ini dapat memberikan informasi yang menjadi dasar bagi mitigasi longsor-likuifaksi di Indonesia.

Kepala,
Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman,
Badan Penelitian dan Pengembangan,
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat



Arief Sabaruddin
19651130 199003 1 001

KATA PENGANTAR

Gempa, tsunami dan likuifaksi yang terjadi di Palu telah memberikan pembelajaran penting bagi semua kalangan, baik pemerintah maupun peneliti untuk bersikap bijak dan lebih siaga sebagai bentuk persiapan jika peristiwa tersebut kembali terjadi. Kerusakan signifikan bangunan pasca gempa Palu 2018 tersebut justru terjadi beberapa saat setelah gempa, dimana terjadi longsor-likuifaksi di beberapa lokasi di Kota Palu dan Kabupaten Sigi.

Hasil observasi lapangan didokumentasikan pada buku ini, yang merupakan gabungan tim ahli geoteknik setempat, nasional dan luar negeri. Laporan ini mencakup investigasi kondisi geoteknik di daerah-daerah tersebut, meng-update progress dan mengumpulkan data penyelidikan tanah yang telah berjalan selama ini. Keberadaan primary fault Palu Koro sudah dipetakan, sedangkan secondary fault ini perlu diinvestigasi lebih lanjut.

Penyusunan Buku Laporan Investigasi Awal Longsor-Likuifaksi Akibat Gempa Palu telah dilakukan dengan kerjasama antara Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), GEER, ITB dan HATTI yang kemudian diterjemahkan kedalam Bahasa Indonesia. PuSGeN berperan sebagai wadah untuk simpul pertemuan dan koordinasi antarpeneliti gempa dari berbagai kementerian/ lembaga dan dengan latar belakang keahlian yang berbeda sehingga dapat saling bertukar informasi dan mengumpulkan hasil penelitian sesuai tugas institusinya. Atas nama seluruh anggota tim PuSGeN, kami mengucapkan terima kasih atas segala daya upaya seluruh anggota tim dalam pelaksanaan investigasi awal longsor-likuifaksi.

Ketua,
Tim Pusat Studi Gempa Nasional,



Prof. Ir. Masyhur Irsyad, MSE, Ph.D

TIM PENYUSUN

PEMBINA

Kepala Balitbang Kementerian PUPR

PENGARAH

Prof. Dr. Ir. Arief Sabaruddin, CES

Ir. Lutfi Faizal

Prof. Masyhur Irsyam, MSE, Ph.D

Aaron Gallant

KONTRIBUTOR

Aaron Gallant

Daniel Hutabarat

Jack Montgomery

Joseph Wartman

A. Nicole Reed

Widjojo Prakoso

Dandung Harnanto

Didiek Djarwadi

Idrus Alatas

Paulus Rahardjo

Pintor Simatupang

Aksan Kawanda

Rahma Hanifa

DAFTAR ISI

ACKNOWLEDGEMENTS	i
KATA SAMBUTAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
TIM PENYUSUN	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
1. PENDAHULUAN	1
2. LATAR BELAKANG GEOLOGI	7
2.1. GEOLOGI BATUAN DASAR DAN FITUR TEKTONIK	7
2.2. GEOLOGI PERMUKAAN: CEKUNGAN PALU	10
2.3. KEGEMPAAN	11
3. LONGSOR-LIKUIFAKSI DI LEMBAH PALU	13
3.1. LONGSOR-LIKUIFAKSI PETOBO	19
3.1.1. OBSERVASI LAPANGAN DAN MORFOLOGI LONGSOR-LIKUIFAKSI	21
3.1.2. TAFSIRAN PERKEMBANGAN LONGSORAN	28
3.1.3. FAKTOR YANG BERKONTRIBUSI DAN HIPOTESIS MEKANISME LONGSOR-LIKUIFAKSI PETOBO	31
3.2. LONGSOR-LIKUIFAKSI DI JONO OGE	33
3.2.1. OBSERVASI LAPANGAN DAN MORFOLOGI	36
3.2.2. KESAKSIAN DARI SAKSI MATA	44
3.2.3. INTERPRETASI DAN HIPOTESIS PERKEMBANGAN MEKANISME LONGSOR	46
3.3. LONGSOR DI DESA LOLU	48
3.3.1. OBSERVASI LAPANGAN DAN MORFOLOGI	49
3.3.2. INTERPRETASI DAN HIPOTESA MEKANISME PERKEMBANGAN LONGSOR-LIKUIFAKSI	57
3.4. LONGSOR LIKUIFAKSI DI SIBALAYA	61
3.4.1. OBSERVASI LAPANGAN DAN MORFOLOGI	62

3.4.2. INTERPRETASI DAN HIPOTESA PERKEMBANGAN LONGSORAN	69
3.5. TANAH LONGSOR DI BALAROA	72
4. RINGKASAN DAN KESIMPULAN	77
5 REFERENSI	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Lokasi gempa bumi utama, gempa susulan, dan gempa susulan (dari JRC, 2018).....	1
Gambar 1.2	Area yang disurvei oleh Tim GEER	3
Gambar 2.1	Pemindahan utara-selatan dipetakan di sepanjang Sesar Palu-Koro dari data satelit optik setelah gempa bumi (Valkaniotis et al. 2018) ...	7
Gambar 2.2	Geologi Sulawesi yang menunjukkan struktur utama dan fitur geografis (dari Maulana et al. 2016)	8
Gambar 2.3	Peta geologis wilayah Palu (dari Watkinson 2011)	9
Gambar 2.4	Geologi permukaan dan ketebalan sedimen di Lembah Palu (diadaptasi dari Hanifa 2018) dan Thein et al. 2014).....	11
Gambar 2.5	Kontur puncak percepatan pada batuan dasar (PGA) yang diberikan oleh United States Geological Survey (USGS). Bintang menunjukkan pusat gempa bumi dan titik merah adalah lokasi dari “Did You Feel It?” responden, yang dekat Kota Palu (USGS; https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/shakemap/pga ; diakses 1 April 2019).	12
Gambar 3.1	Lokasi tanah longsor di Cekungan Palu disurvei oleh Tim GEER.....	13
Gambar 3.2	Deformasi tanah arah timur-barat di cekungan Palu yang diinterpretasikan dari data satelit optik (diadaptasi dari Valkaniotis et al., 2018).....	15
Gambar 3.3	Deformasi tanah arah timur-barat di tepi barat Cekungan Palu diinterpretasikan dari data optik satelit	16
Gambar 3.4	Kontur ketinggian ditafsirkan dari data satelit optik di tepi barat cekungan Palu disekitar longsor-likuifaksi Petobo, Desa Lolu, dan Jono Oge	18
Gambar 3.5	Peta Orthomosaic menunjukkan batas tanah longsor-likuifaksi Petobo, lokasi sand boil, vektor perpindahan, dan zona yang digambarkan oleh fitur morfologis dan notasi.	19

- Gambar 3.6 Model elevasi digital menggambarkan fitur morfologi 3D di bagian timur laut longsor-likuifaksi 20
- Gambar 3.7 Pengamatan di Zona A: a.) Retak di saluran irigasi (-0.93791, 119.92157);
b.) runtuhnya dinding saluran dekat puncak longoran (-0.93832, 119.92154); c.) kerusakan dan pergeseran vertikal pintu air di sudut timur laut longoran tempat saluran irigasi berbelok dan membentang dari timur ke barat (-0,936019, 119.920635);
d.) blok yang terputar di dekat puncak longoran (-0.938349, 119.921008); e.) blok yang terputar-balik dan lereng curam di sudut timur laut longoran (-0.93623, 119.92018);
f.) menghadap ke bidang blok yang terputar di sudut tenggara longoran (0.94071, 119.92258) 22
- Gambar 3.8 Sand boil: a.) Tipikal pasir pada ejecta (-0.93850, 119.92092);
b c.) tinggi dan lebar tipikal sand boil yang ditemukan terlindung di antara balok (-0.938503, 119.920425) 22
- Gambar 3.9 Zona B: a.) Blok/gundukan yang relatif besar di zona ini dengan sedikit vegetasi dan bentuknya tidak seperti blok lain di Zona A (-0.939489, 119.917507); b.) deposit debris flow dan gundukan di bagian depan gambar dekat batas Zona C, yang membentuk bidang yang terangkat pada batas kedua zona ini (-0.939664, 119.918263) 23
- Gambar 3.10 Zona C: a.) Pandangan menghadap selatan-tenggara di batas Zona B dan C, dengan jelas perbedaan ketinggian dan air yang terlihat di Zona C (-0.93971, 119.91859); bc.) mengamati jaringan anak sungai dan drainase yang membawa air melalui zona (-0.939725, 119.918577 dan 0.93974, 119.91859); d.) blok yang tidak menentu, relatif utuh, di dalam zona (-0.940918, 119.917806) 24

Gambar 3.11 Zona D: a.) Blok tertekan dan terangkat, punggungan, dan gundukan sepanjang barat batas zona (-0,941527, 119,917471); b.) bukti aliran debris melalui rumah di Zona D1(-0.940627, 119.912096)	26
Gambar 3.12 Zona E: a.) Area yang mengalami keruntuhan berulang di tengah zona di mana pekerjaan tanah dilakukan sehingga fitur morfologis tidak dapat dikenali (-0.93952, 119.90387); b.) daerah genangan di utara batas Zona E (-0,94672, 119,90939); c.) genangan berada di batas selatan Zona E (-0.94090, 119.91040); df.) area di sepanjang batas selatan Zona E4 di mana aliran debris menyusup kedalam perumahan (-0.94072, 119.90413; -0.94141, 119.90977; -0.94150, 119.9068)	27
Gambar 3.13 Perspektif keterangan saksi mata (menghadap arah barat-barat daya) dari sudut timur laut longsoran (-0.93622, 119.920207)	29
Gambar 3.14 Potongan-potongan melintang dan topografi pra-slide dan citra satelit pasca-gempa di Petobo	30
Gambar 3.15 Foto udara dari pintu air yang hancur dan titik longsoran diambil dengan drone	34
Gambar 3.16 Peta Orthomosaic menunjukkan batas tanah longsor Jono Oge, lokasi sand boil, vektor pergeseran, dan zona dibatasi oleh fitur morfologis dan pengamatan utama	35
Gambar 3.17 Model elevasi digital dan gambar relief berbayang drone yang menggambarkan fitur3D dari morfologis di wilayah timur longsoran	36
Gambar 3.18 (a) Lokasi akhir Pasar Unggas Patra (-0,98786, 119,90844), yang tergeser sekitar 1.230 m; (b) lokasi akhir Pusdiklat GPID Patmos Jono Oge (-0.98942, 119.91007), yang tergeser sekitar 1.080 m (gambar dari Antara Foto 2018)	36

- Gambar 3.19 Zona A: (a) Pemandangan sawah utuh dan lereng curam dari aliran longsor di Jono Oge (-0.98540, 119.92580); (b) perpotongan puncak longsor dengan saluran irigasi (-0,98423, 119,92607); (c) pembentukan blok-blok yang terputar dan retakan ekstensional di area keruntuhan saluran irigasi (perhatikan pasir diendapkan oleh banjir berikutnya; -0,98478, 119,92423); (d) kerusakan jalan di sepanjang batas tepi selatan longsor-likuifaksi (0.98623, 119.92383). 37
- Gambar 3.20 Zona B: Zona B terdiri dari blok rakit yang bergerak ke area keruntuhan utama setelah tanah di daerah ini tergeser (-0.98211, 119.91760) 38
- Gambar 3.21 Zona C: (a) Sebagian besar Zona C berada di dataran rendah dan daerah di antara blok seringkali jenuh (-0.98539, 119.91938); (b) bangunan runtuh terletak di Zona C (-0,98364, 119,92071). Atap logam runth setelah gempa; (c) bangunan dan pohon yang tergeser, yang telah tergeser sekitar 470 meter pada blok yang relatif utuh (-0,98436, 119,91995); (d) gugusan sand boil di antara dua blok (-0.98410, 119.92163). Perhatikan pena di salah satu sand boil di latar depan panjangnya sekitar 15 cm 39
- Gambar 3.22 Citra drone dari zona runtuh sekunder di sepanjang tepi selatan longsor di Jono Oge 40
- Gambar 3.23 Cuplikan layar video yang direkam selama longsor awal. Orang yang merekam video berdiri di atap gedung, yang bergerak. Rumah beratap merah di video tidak bergerak dan terletak di -0.98579, 119.91965. Bangunan di belakang rumah beratap merah belum tergeser pada saat video direkam, tetapi kemudian tergeser oleh keruntuhan sekunder 41
- Gambar 3.24 Zona D: (a) Pohon di antara dua blok sawah utuh (-0.98554, 119.22403); (b) sand boil kecil di daerah dataran rendah di antara blok (-0,98483, 119,92223); (c) tampilan rumah beratap merah yang

menghadap ke timur laut (-0.98595, 119.91951); (d) kerusakan pada sisi rumah beratap merah dari arah barat daya (-0.98566, 119.91973). Orang di foto itu sekitar 1,87 tinggi meter . . . 42

Gambar 3.25 Zona E: (a) Bangunan yang rusak oleh luncuran longsor-likuifaksi (-0.98898, 119.90891); (b) Bangunan yang ada dikelilingi oleh debris dan tanah yang diendapkan oleh longsor-likuifaksi di Jono Oge (-0.98985, 119.90922); (c) Kendaraan yang rusak oleh luncuran debris (-0.98838, 119.90895); (d) debris, blok rakit dan pohon-pohon di dalam area pengendapan longsor-likuifaksi (-0.98893, 119.90881) 43

Gambar 3.26 Perkiraan tingkat luapan lumpur yang disebabkan olehruntuhnya saluran irigasi Gumbasa di Jono Oge 44

Gambar 3.27 (a) Endapan lumpur memenuhi jalan-jalan, tetapi meninggalkan bangunan yang tidak rusak di dekat batas longsor-likuifaksi (-0.99025, 119.90926); (b) endapan lumpur dalam alur sungai (-0.98440, 119.90143); (c) endapan lumpur keluar dari alur sungai dan membanjiri masyarakat sekitar setelah mencapai jembatan (-0,98279, 119,89848); (d) ketinggian aliran lumpur di salah satu rumah di dekat jembatan (-0,98253, 119.89817). Orang di foto itu tingginya sekitar 1,75 meter 45

Gambar 3.28 Tafsirkan perkembangan longsor aliran di Jono Oge. Panah merah besar menunjukkan gerakan awal, sedangkan panah kuning menunjukkan gerakan sekunder 47

Gambar 3.29 Profil aliran gempa Jono Oge sebelum gempa 48

Gambar 3.30 Peta Orthomosaic dengan lokasi sand boil dan vektor pergeseran di Desa Lolu. 49

Gambar 3.31 Peta Orthomosaic di lokasi longsor bagian bawah yang mengindikasikan vektor pergeseran. Juga ditampilkan pola deformasi massa tanah di dekat pusat longsor (garis hijau (putus-putus) dan lokasi jalan sebelumnya (garis putus-putus coklat). 50

Gambar 3.32 Model elevasi digital yang diperoleh dari Drone yang menggambarkan fitur morfologi 3D di Lolu Desa	50
Gambar 3.33 a.) Tampak atas retakan di saluran irigasi; b.) retak di saluran irigasi (-0.96974, 119.92249); c.) pintu air yang masih utuh (-0.970496, 119.922598)	51
Gambar 3.34 a.) Ekstensi lateral tanah di (timur) jalan utama (-0.970407, 119.918776); b.) kerusakan pada bangunan perumahan dan tanah yang menyebar secara lateral di dekat jalan utama (-0.970327, 119.916775); dan pengembangan parsial longsor dekat utama jalan (-0.971073, 119.919248)	52
Gambar 3.35 Sand boil di antara tanah yang berpecah secara lateral di (timur) jalan utama (-0.970349, 119.916787)	52
Gambar 3.36 Pompa bensin yang rusak di sisi barat jalan utama: a.) Tampak pompa bensin (-0.970627, 119.916465); b.) pergeseran dan retak pada perkerasan beton (-0.970753, 119.916406)	53
Gambar 3.37 Struktur yang rusak di Zona B: a.) Tanah yang tertarik ke samping dan rumah yang runtuh (0.97051, 119.91515); b.) masjid yang sebagian runtuh dan jalan akses yang sudah diperbaiki (-0.97050, 119.91492); c.) bangunan yang runtuh dan blok rakit di latar depan (-0.97037, 119.91531)	53
Gambar 3.38 Area menanjak dan berdekatan dengan kompleks perumahan yang tergeser: a.) Memanjang ke samping dan sebagian blok dan gundukan hancur di lapangan di atas kompleks perumahan (-0,97000, 119,91361); b.) luasnya aliran debris yang hancur dan rakit pohon di dekat batas Zona B dan C (-0.97034, 119.91374); c.) mendidih sebagian sand boil dekat batas tumpukan debris di Zona B (-0.97030, 119.91360)	54
Gambar 3.39 Kompleks perumahan di Zona C: a.) Tampilan komplek perumahan yang terbelah dari sekitar kebun papaya (-0.97025, 119.91304);	

b.) pemandangan menghadap ke timur menunjukkan jalan yang terputar dan terangkat dengan kebun papaya yang masih terlihat di sebelah kiri (-0.97039, 119.91268); c.) pandangan kehancuran dan bukti kompresi dan pengangkatan di jalan di bagian bawah kompleks perumahan (-0.97069, 119.91304); d.) pandangan barat di belakang bagian kompleks perumahan yang terpisah yang menunjukkan sand boil dan batas aliran debris dan bagian kanan blok yang hancur (-0.97034, 119.91380); e.) tampilan barat-barat laut bagian atas kompleks perumahan dengan batas aliran debris dan blok-blok yang hancur (-0.97036, 119.91375); f.) ketinggian aliran lumpur yang melalui bagian bawah kompleks perumahan (-0.97040, 119.91292) 56

- Gambar 3.40 Zona D: a.) Lokasi likuifaksi dan puing-puing debris (-0,97100, 119.91171); b.) punggungan tertekan dekat batas Zona C dan D (-0.97048, 119.91188); c.) pohon yang bergerak maju atau terputar di dekat ujung longsoran (-0.97091, 119.91104)56
- Gambar 3.41 Hampan sand boil di dekat batas timur Zona D 57
- Gambar 3.42 Topografi Pra-longsor dan progres longsor yang diinterpretasikan dari indikasi awal (panah merah) dan gerakan sekunder (panah kuning) . . 60
- Gambar 3.43 Peta Orthomosaik menunjukkan batas lokasi longsor-likuifaksi Sibalaya dari sand boil, dan zona yang dibatasi oleh fitur morfologis dan pengamatan di lapangan 61
- Gambar 3.44 Peta Orthomosaic yang menunjukkan lokasi sand boil, pergeseran vektor, dan zona yang dibatasi oleh fitur morfologi dan pengamatan utama 62
- Gambar 3.45 Zona A: a.) Saluran gerusan dan gorong-gorong kotak yang rusak (-1.1488, 119.92477); b.) timur-perspektif menghadap tenggara dari saluran gerusan selatan di mana saluran gerusan bertemu (-1.14788,119.92281); c.) Rusaknya gerbang dan retak di saluran

irigasi pada batas tenggara slide (-1.149652,119.924991); d.) Rusaknya liner antara box culvert dan gate dan sloughing dinding saluran irigasi di latar belakang (-1.14915, 119.92493) 63

Gambar 3.46 Zona B1: a.) Puncak longsoran (-1.149536, 119.924125); b.) blok tanah terputar (-1.149580, 119.924053); c.) sand boil (-1.49620, 119.923225) 64

Gambar 3.47 Zona C: a.) Tampak blok yang terotasi balik arah tenggara (-1.146946, 119.919843); b.) Tampak blok yang terotasi balik arah selatan (-1.146946, 119.919843); c.) Tampak arah tenggara blok yang terotasi balik dan sand boil (-1.146575, 119.919432); d.) sand boil (-1.146419, 119.920662); e.) likuifaksi dekat batas Zona C dan D (-1.146422, 119.919374); f.) sand boil besar (-1.147622, 119.921125) 65

Gambar 3.48 Zona D: a.) Blok terkompresi dan terangkat dekat margin utara zona C (-1.145940, 119.919559); b.) bagian jalan yang relatif utuh dan retak tertutup pada sisi kiri (-1.146440, 119.919162); c.) perbedaan ketinggian yang mencolok yang berbatasan langsung dengan depresi pada zona C (-1.146422, 119.919289); d.) rumah tinggal yang relatif utuh di dekat pusat zona D (-1.146385, 119.919055); e.-f.) kerusakan dan keruntuhan struktur yang lebih parah di dekat barat laut batas zona D (-1.145904, 119.919079 dan -1.145963, 119.918827) 68

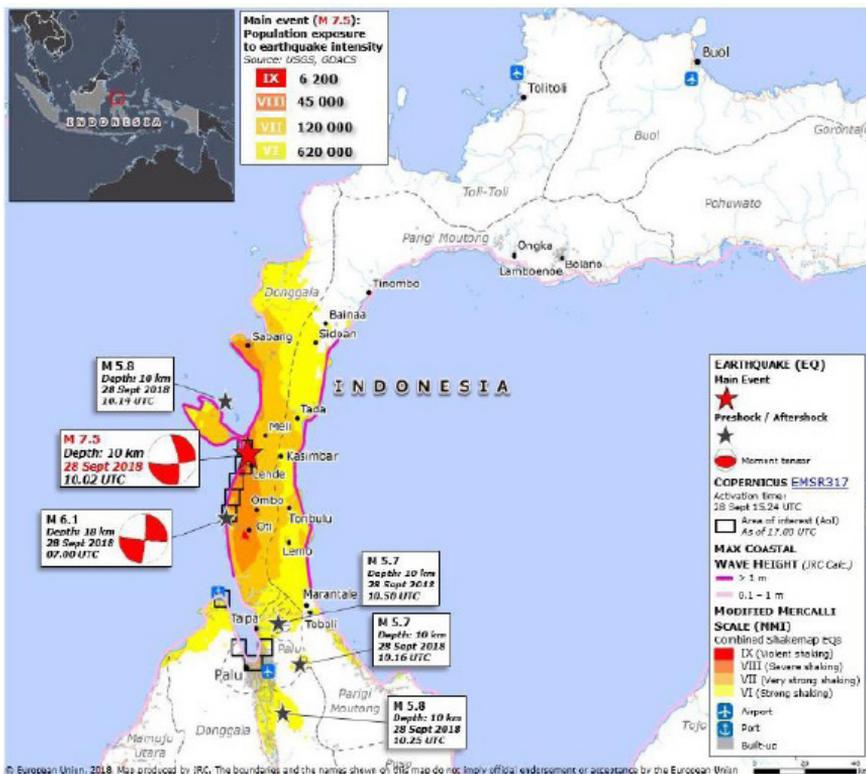
Gambar 3.49 Zona E: a.) Bidang luncuran blok dan lapisan sedimen yang terfluidisasi di lapisan antar blok (-1.144891, 119.917555); b.) sedimen pada lapisan yang tertekan diantara blok (-1.14496, 119.91769); c.) tumbukan blok yang memutar ke depan dan terangkat di dekat ujung longsoran (-1.144893, 119.917708); d.) ketebalan debris pada ujung longsoran (-1.144651, 119.915743) . 69

Gambar 3.50 Topografi sebelum longsor dan progres longsor yang diinterpretasikan mengindikasikan awal (panah merah) dan

gerakan sekunder (panah kuning) serta pergerakan longsoran (panah biru)	71
Gambar 3.51 Tanah longsor di pemukiman Balaroa	73
Gambar 3.52 Foto-foto lereng longsor di Balaroa (kiri $-0,906689^{\circ}$, $119,839557^{\circ}$) dan dari badan longsor (kanan, $-0,906687^{\circ}$, $119,839372^{\circ}$) setelah pembersihan dilakukan.	73
Gambar 3.53 Peta pergeseran tanah longsor di Balaroa	74
Gambar 3.54 Ujung tanah longsor Balaroa, menunjukkan beberapa bangunan yang saling bertumpuk ($-0,904367$, $119,846528$).	74
Gambar 3.55 Topografi pra-longsor di Balaroa	75

1. PENDAHULUAN

Gempa Palu-Donggala dengan magnitudo M_w 7,5 terjadi pada tanggal 28 September 2018 pukul 18:02 waktu setempat, terjadi pada sesar geser Palu-Koro yang berarah utara-selatan, memanjang melalui Kota Palu dan wilayah lainnya di provinsi Sulawesi Tengah, Indonesia. The United States Geological Survey (USGS) melaporkan pusat gempa terletak sekitar 72 km sebelah utara kota Palu pada kedalaman 10 km, dan bukti geodetik menunjukkan pergeseran pada sesar mencapai sepanjang 150 km. Gambar 1.1 menunjukkan gempa utama (main shock) dan beberapa gempa awalan (foreshock) dan gempa susulan (aftershock) serta besaran magnitudonya (JRC, 2018). Gempa tersebut memicu serangkaian longsor besar, mengakibatkan runtuhnya struktur bangunan baik yang dirancang strukturnya (engineered) maupun yang yang tidak dirancang strukturnya (non engineered), serta menghasilkan gelombang tsunami yang berdampak kerusakan yang besar pada wilayah pantai di Teluk Palu, Sulawesi Tengah.



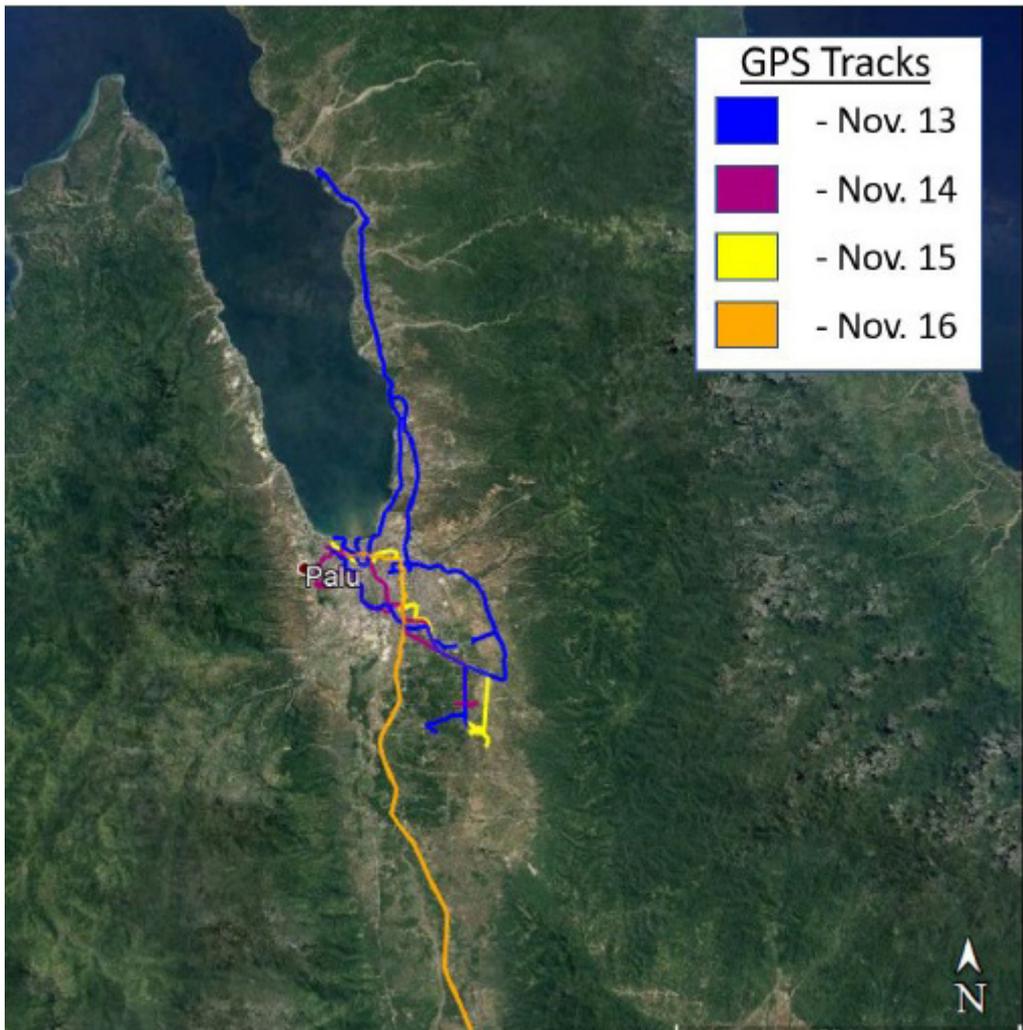
Gambar 1.1. Lokasi gempa bumi utama, gempa susulan, dan gempa susulan (dari JRC, 2018).

Badan Nasional Penanggulangan Bencana di Indonesia (BNPB) memperkirakan kerugian ekonomi akibat gempa Palu sebesar \$ 911 Juta di Sulawesi Tengah (Tehusjarana, 2018). Wilayah di Sulawesi Tengah yang paling banyak yang terkena dampak gempa adalah Palu, Donggala, Sigi, dan Parigi Moutong. Menurut Gubernur Sulawesi Tengah, terdapat 4.340 korban meninggal sebagai akibat dari gempa bumi dan tsunami (Jakarta Post, 2019). Jumlah ini termasuk 667 orang yang dinyatakan hilang. Operasi pencarian dan penyelamatan dihentikan pada 12 Oktober 2018 dan daerah longsor-likuifaksi dianggap sebagai kuburan massal bagi mereka yang terkubur oleh longsor-likuifaksi. Gempa juga mengakibatkan 4.438 luka-luka berat, kerusakan 68.451 rumah, dan 206.494 orang mengungsi (AHA, 2018). Ibukota provinsi (Kota Palu), yang memiliki populasi yang relatif besar, yaitu sekitar 350.000 jiwa, menderita kerugian paling parah, baik kehilangan jiwa dan ekonomi. Besarnya korban jiwa menjadikan gempa Palu-Donggala sebagai bencana alam paling mematikan di seluruh dunia pada tahun 2018, dan gempa yang paling mematikan di Indonesia sejak gempa Yogyakarta tahun 2006. Mayoritas besar korban terkait langsung dengan longsor-likuifaksi, menjadikan masalah ini sebagai salah satu bencana tanah longsor paling signifikan dalam beberapa dekade terakhir.

The National Science Foundation (NSF) membiayai Tim Geotechnical Extreme Event Reconnaissance (GEER) melakukan survey investigasi awal dan tiba di Kota Palu pada 11 November 2018 untuk melakukan enam hari kerja lapangan yang mencakup penelitian yang luas. Tim GEER, yang terdiri dari lima orang yang berasal dari Amerika Serikat, menjadi tamu dan didampingi oleh tim ahli geologi, geoteknik, dan peneliti dari Pusat Studi Gempa Bumi Indonesia (PusGen) dan Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI). **Mengingat kerja sama lapangan yang erat, kami secara kolektif merujuk tim dari GEER dan tim PuSGen serta HATTI sebagai tim Investigasi Awal Longsor-Likuifaksi GEER di dalam laporan ini .**

Setibanya di Palu, tim GEER melakukan survei wilayah pesisir yang terkena dampak tsunami. Namun berdasarkan survei tim investigasi lain yang telah secara intensive melakukan penelitian masalah tsunami, tim GEER memutuskan untuk lebih fokus untuk melakukan investigasi pada lima lokasi longsor-likuifaksi besar di dalam dan di luar Kota Palu (Gambar 1.2), yang dinilai lebih menarik secara geoteknik. Tujuan utama tim GEER adalah untuk mengumpulkan dan mendokumentasikan data yang mudah rusak/hilang karena perubahan rona permukaan tanah, yang dapat digunakan

untuk memahami urutan kejadian dan mekanisme yang menghasilkan longsor-likuifaksi yang besar ini. Selain bencana yang dahsyat, dan korban fisik dan emosi yang terus-menerus masih membebani korban dalam wilayah ini, beberapa aspek dari peristiwa yang terjadi setelah gempa Palu-Donggala membuat hal ini menjadi salah satu bencana geologis paling signifikan dalam sejarah kebencanaan.



Gambar 1.2. Area yang disurvei oleh Tim GEER.

Masalah yang perlu diperhatikan adalah kurangnya data gempa (akselerogram) di sekitar wilayah Palu. Secara total, ada ada tiga stasiun seismik: satu di Palu, satu di Sabang, dan satu di Poso. Pada saat penulisan ini, catatan seismik digital tidak tersedia untuk umum.

Beberapa aspek longsor-likuifaksi yang dipelajari oleh tim GEER dan penting bagi rekayasa dan komunitas sains meliputi hal hal sebagai berikut:

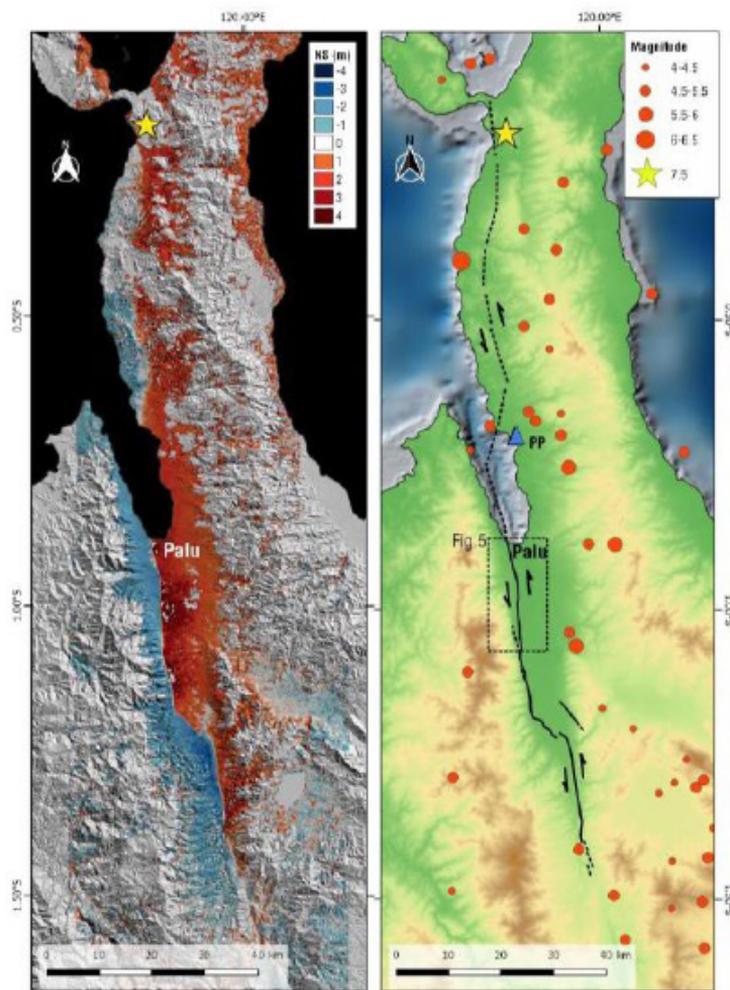
- a. Longsor-likuifaksi terjadi di sepanjang daerah dengan relief yang relatif datar (yaitu, kemiringan rerata sekitar 2 hingga 4 persen). Bagian dari longsor-likuifaksi ini dialihkan menjadi longsor aliran (lateral spread) dengan menggunakan klasifikasi tanah longsor Hungr et al.(2014), yang bergerak sampai sekitar 1 km dalam beberapa kejadian. Setidaknya satu lokasi, saluran irigasi yang runtuh memicu aliran lumpur yang menimpa massa longsor awal. Longsor yang sangat besar ini bertanggung jawab terhadap banyaknya korban pada gempa Palu-Donggala.
- b. Adanya fenomena "sand boil" pada atau dekat tanah longsor mengindikasikan bahwa likuifaksi yang dipicu oleh gempa terjadi di setiap situs. Likuifaksi dipercaya sebagai mekanismenya yang menginisiasi terjadinya longsor. Fitur morfologi tanah longsor yang penting termasuk retakan tanah (baik retak tarik maupun retak geser), perpanjangan, blok tanah yang terputar-balik, kompresi dan pengangkatan blok tanah, gundukan "sand boil", dan erosi, banyak yang masih utuh dan didokumentasikan selama penyelidikan lapangan.
- c. Saluran irigasi Gumbasa yang tidak berpelindung lereng membentuk batas atas atau puncak longsor yang terjadi pada sisi timur cekungan Palu. Saluran irigasi Gumbasa berkontribusi terhadap saturasi tanah (biasanya digunakan sebagai ladang pertanian dan sawah) di lokasi ini, apabila lereng saluran berpelindung, maka muka air tanah akan berada di kedalaman yang lebih besar. Saluran irigasi ini longsor di beberapa lokasi dan berkontribusi memicu terjadinya aliran lumpur (mud flow) di beberapa lokasi. Dengan demikian, saluran irigasi Gumbaya diyakini telah memainkan peran penting dalam inisiasi dan perkembangan longsor di sisi timur cekungan Palu.
- d. Informasi geomatik dan fotogrametri yang dikumpulkan melalui gambar drone dan satelit membantu memahami evolusi dan perkembangan longsor. Gambar-gambar ini menangkap fitur geomorfologi tiga dimensi yang dihasilkan selama longsor, dan membantu dalam evaluasi pergeseran bangunan dan jarak yang ditempuh dalam kejadian ini.
- e. Catatan saksi mata tentang longsor-likuifaksi yang diperoleh dari banyak orang yang selamat dari bencana ini, banyak di antaranya yang menyaksikan dari

awal dan perkembangan longsor-likuifaksi dan banjir lumpur. Penggunaan telepon pintar dan kamera memungkinkan penduduk setempat untuk mengambil video rekaman ketika beberapa longsor-likuifaksi terjadi, yang merupakan salah satu contoh di mana skala besaran longsor-likuifaksi telah didokumentasikan oleh banyak individu. Tautan rekaman ini di situs media sosial disediakan dalam Bab 3 laporan ini, dan video telah diarsipkan bersama dengan laporan ini pada DesignSafe (designsafe-ci.org) untuk memastikan mereka tetap ada tersedia untuk peneliti lain.

2. LATAR BELAKANG GEOLOGI

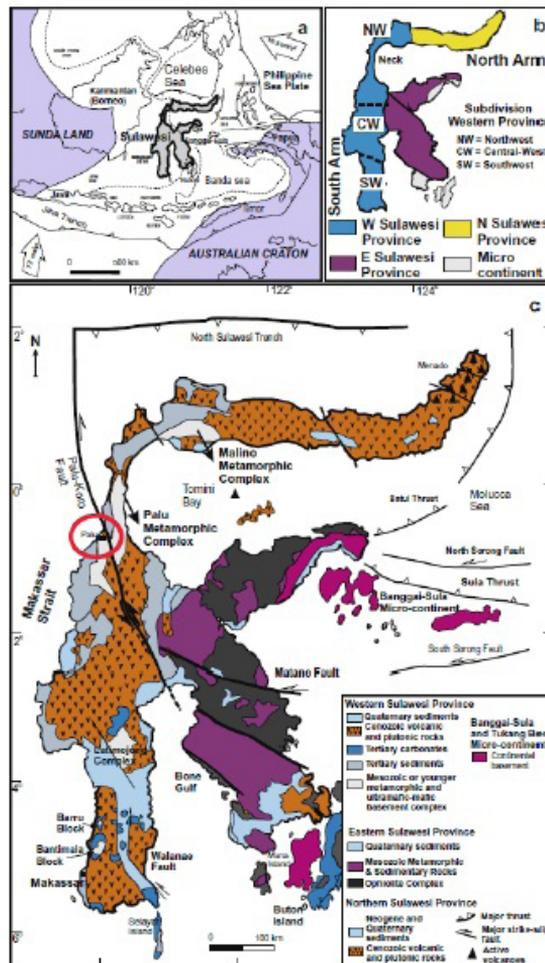
2.1. Geologi Batuan Dasar dan Fitur Tektonik

Pulau Sulawesi di Indonesia Timur terletak di konvergensi lempeng tektonik Eurasia, lempeng Indonesia-Australia dan Filipina, yang telah berinteraksi dari zaman Mesozoikum sampai saat ini (Gambar 2.1). Bentuk pulau Sulawesi seperti huruf K yang unik dengan empat lengan yang khas telah terbentuk oleh sejarah subduksi geologi yang kompleks, akresi, penghancuran ophiolite, dan tumbukan (Hamilton 1979). Pulau ini dibagi menjadi empat kondisi geologi utama yang dibedakan oleh dislokasi tektonik skala besar dan sesar naik:



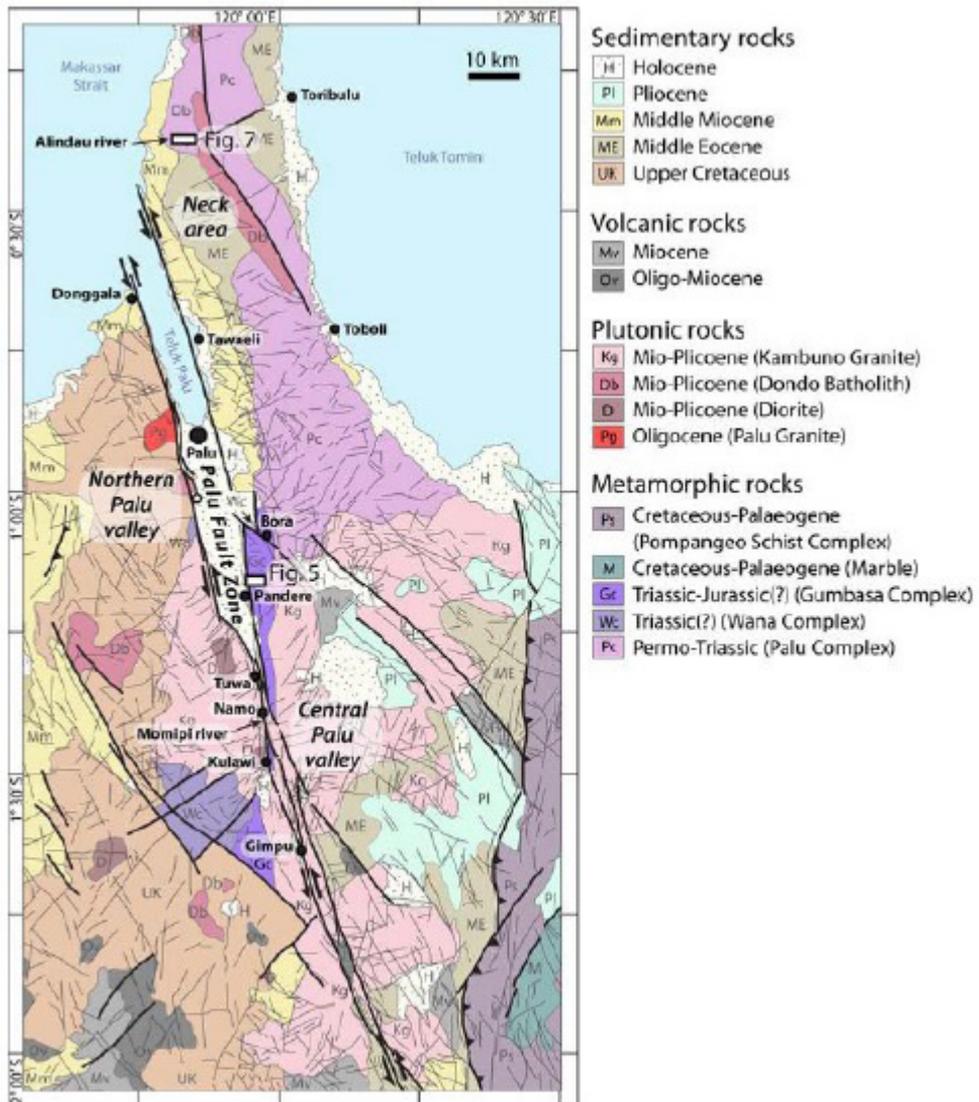
Gambar 2.1. Pemindaian utara-selatan dipetakan di sepanjang Sesar Palu-Koro dari data satelit optik setelah gempa bumi (Valkaniotis et al. 2018).

- i.) Sulawesi Barat, di mana sedimen Tersier dan batuan magmatik sangat dominan,
- ii.) Sulawesi Tengah dan Tenggara, sebagian besar terdiri dari batuan metamorf dari zaman Cretaceous awal,
- iii.) Sulawesi Timur, batuan sedimen Mesozoikum dan Paleozoikum menjadi mandasan batuan ophiolitic nappe, dan
- iv.) Banggai-Sula Microcontinent terdiri batu basement kontinental (van Leeuwen dan Muhandjo 2005, Thein et al. 2014, Maulana et al. 2016). Kota Palu terletak di Sulawesi Tengah, dekat leher, yang menghubungkan lengan utara ke Tanjung Pinang Sulawesi bagian barat (Gambar 2.2).



Gambar 2.2. Geologi Sulawesi yang menunjukkan struktur utama dan fitur geografis (dari Maulana et al. 2016).

Batuan dasar (basement rock) di wilayah ini terdiri dari beberapa batuan metamorf yang kompleks yang ditindih oleh endapan sedimen vulkanik dan intrusi magmatik bervariasi dalam komposisi dari gabro dan diorit ke granodiorit dan granit (van Leeuwen dan Muhandjo 2005, Watkinson 2011). Gambar 2.3 memberikan peta terperinci geologi batuan dasar daerah di sekitar Kota Palu dan Teluk Palu.



Gambar 2.3. Peta geologis wilayah Palu (dari Watkinson 2011).

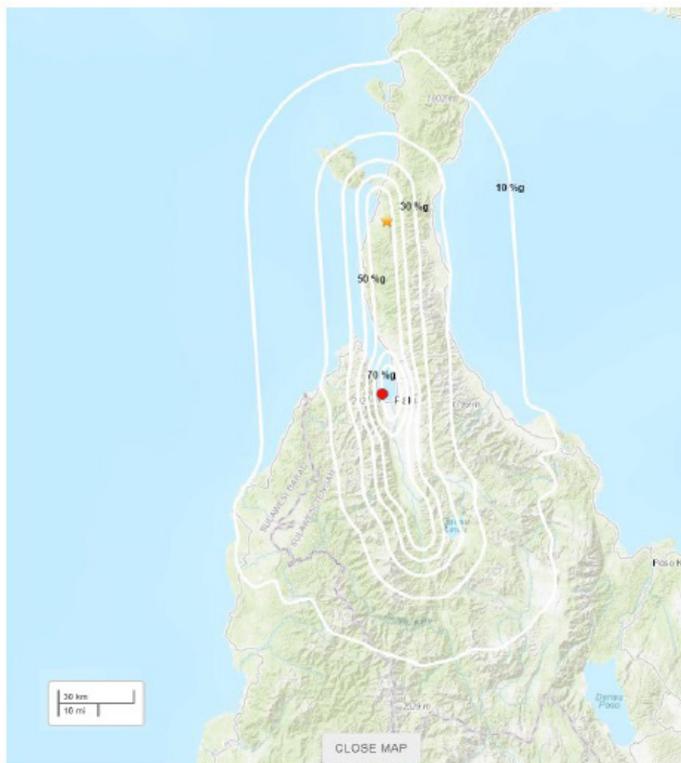
Struktur geologis yang paling menonjol di Sulawesi Tengah adalah sesar Palu-Koro (PKF) berorientasi NNW-SSE, yang membentang lebih dari 300 km melalui Teluk

Palu dan kota Palu dan terhubung ke zona subduksi Parit Sulawesi Utara di utara pulau Sulawesi (Gambar 2.2). Sesar Palu-Koro berada sepanjang tepi barat lembah dan kota Palu dan memotong (dips) antara 50 sampai 80 derajat ke arah timur (Walpersdorf et al. 1998, Socquet et al. 2006). Pergeseran fitur geomorfik, seperti aliran, aluvial fan zaman kuartar, menunjukkan pergeseran arah lateral-kiri (left lateral offset) (Bellier et al. 2001, Bellier et al. 2006). Sesar Palu-Koro diyakini menembus litosfer yang tipis dan secara seismik terkunci pada kedalaman 12 km. Pemantauan sesar Palu-Koro dengan GPS menunjukkan bahwa sesar tersebut memiliki laju geser (slip rate) yang tinggi, yaitu geser sekitar 39 mm/tahun dan perpanjangan sekitar 11 sampai 14 mm/tahun (Socquet et al. 2006). Meskipun sesar Palu-Koro itu mempunyai karakteristik kegempaan yang relatif rendah, hasil analisis palaeoseismicity menunjukkan tiga gempa bumi besar dengan magnitudo $6,8 < M_w < 8$ terjadi di 2.000 tahun terakhir, menunjukkan periode ulang gempa sekitar 700 tahun (Bellier et al. 2006). Sebelum gempa terakhir, Walpersdorf et al. (1998) menyoroti bahwa tidak ada gempa bumi yang signifikan ($M_w > 4.5$) telah terjadi dalam kurun waktu 100 tahun terakhir (sebelum 1998). Mereka juga menunjukkan bahwa pergeseran telah terakumulasi hingga setidaknya 3m, yang akan menghasilkan gempa bumi sebesar $M_w 7$ apabila pergeseran terjadi pada sesar sepanjang 50 hingga 100 km, mirip dengan gempa $M_w 7.5$ yang mempengaruhi Kota Palu pada 28 September 2018, yang diyakini memanjang lebih dari 150 km menurut USGS. Menariknya, pemetakan pergeseran utara-selatan di sepanjang sesar Palu-Koro oleh Valkaniotis et al. (2018) berkisar antara 3m dan 4m.

2.2 Geologi Permukaan: Cekungan Palu

Cekungan Palu dipenuhi dengan sedimen Kuartar (Gambar 2.4). Tanah liat, lanau, dan pasir membentuk deposit aluvial dari banjir dan endapan sungai lama yang mengikuti Sungai Palu pada ketinggian yang lebih rendah di dekat pusat lembah. Endapan alluvium fan muda dan tua merupakan sedimen permukaan di dataran rendah berbukit bukit yang membentang di sisi barat dan timur lembah. Endapan colluvium yang terdiri dari kerikil pasir adalah kejadian umum elevasi yang lebih tinggi. Longsor-likuifaksi yang dipelajari oleh tim GEER selama survei investigasi awal memotong batas aluvium yang tidak terkonsolidasi, dengan lereng yang landai yang memanjang dari sistem drainase anak sungai di kaki pegunungan, dan endapan aluvial oleh banjir yang tidak terkonsolidasi dari Sungai Palu (Gambar 2.4). Batuan di

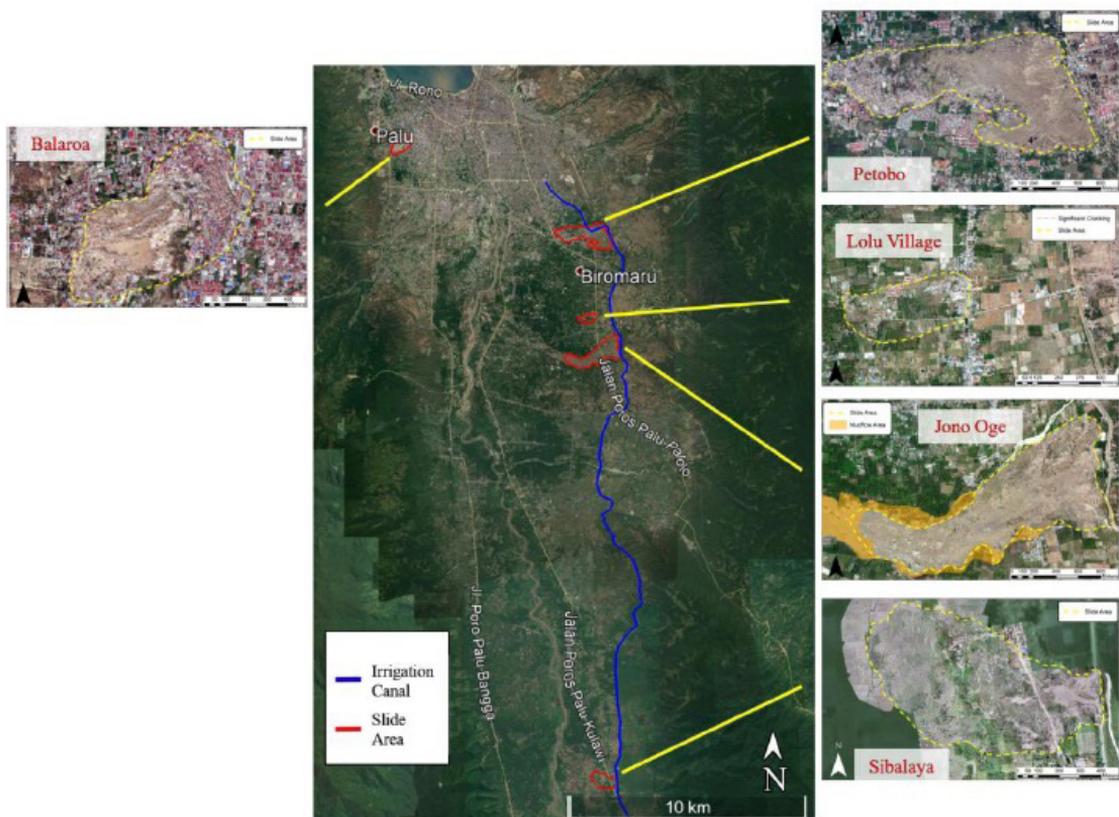
melakukan interpretasi terhadap longsor-likuifaksi dengan lebih rinci. Gambar 2.5 menunjukkan kontur percepatan puncak pada batuan dasar (PGA) yang diperkirakan oleh United States Geological Survey (USGS) berdasarkan data yang terbatas. Perkiraan maksimum PGA adalah sekitar 0,7 g, yang kemungkinan besar menjadi alasannya kerusakan yang terjadi di wilayah Palu yang lebih besar. Sayangnya, hanya ada satu stasiun akselerogram di Cekungan Palu. Stasiun ini terletak di dalam Kota Palu (PCI-PALU; -0.90554, 119.83666) sekitar 80 km dari pusat gempa dan tepat di sebelah barat longsor besar di Balaroa. Rekaman dari stasiun ini belum tersedia secara digital, tetapi data plot yang ditunjukkan kepada tim GEER menunjukkan PGA horizontal 0,286g ke arah timur-barat dan 0,207g di arah utara-selatan. Perbedaan dengan estimasi USGS ini penting dan membutuhkan penyelidikan lebih lanjut. Tim GEER berharap agar data akselerograf dari stasiun Palu, bersama dengan data karakterisasi untuk situs tersebut, dapat dirilis, yang akan memotivasi pembuatan adendum pada laporan ini.



Gambar 2.5. Kontur puncak percepatan pada batuan dasar (PGA) yang diberikan oleh United States Geological Survey (USGS). Bintang menunjukkan pusat gempa bumi dan titik merah adalah lokasi dari “Did You Feel It?” responden, yang dekat Kota Palu (USGS; <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/shakemap/pga>; diakses 1 April 2019).

3. LONGSOR-LIKUIFAKSI DI CEKUNGAN PALU

Gempa Palu-Donggala pada tanggal 28 September 2018 memicu empat (4) longsor-likuifaksi yang sangat besar (*flowslides*) yang terletak di atau dekat dengan kota Palu (Gambar 3.1). Semua longsor terletak di sepanjang tepi lembah Palu, di mana endapan aluvial fan bertemu dengan lembah aluvial Sungai Palu (Gambar 2.4). Longsor-likuifaksi paling utara terjadi di sisi barat lembah di lingkungan *Balaroa* yang padat penduduk. Badan Nasional Penanggulangan Bencana Indonesia (BNPB) memperkirakan 2.895 bangunan rusak atau hancur di Balaroa. Tiga longsor-likuifaksi lainnya di bagian utara cekungan terletak di sisi timur lembah (Gambar 3.1) dan disebut dengan nama daerah tempat longsor-likuifaksi terjadi (dari utara ke selatan, yaitu *Petobo*, *Desa Lolu* dan *Jono Oge*).



Gambar 3.1. Lokasi tanah longsor di Cekungan Palu disurvei oleh Tim GEER.

Tiga longsor-likuifaksi membentang sekitar 7 kilometer sebelah selatan dari bandara Palu (Mutiaras SIS Al Jufri). Penggunaan lahan di sisi timur lembah terdiri

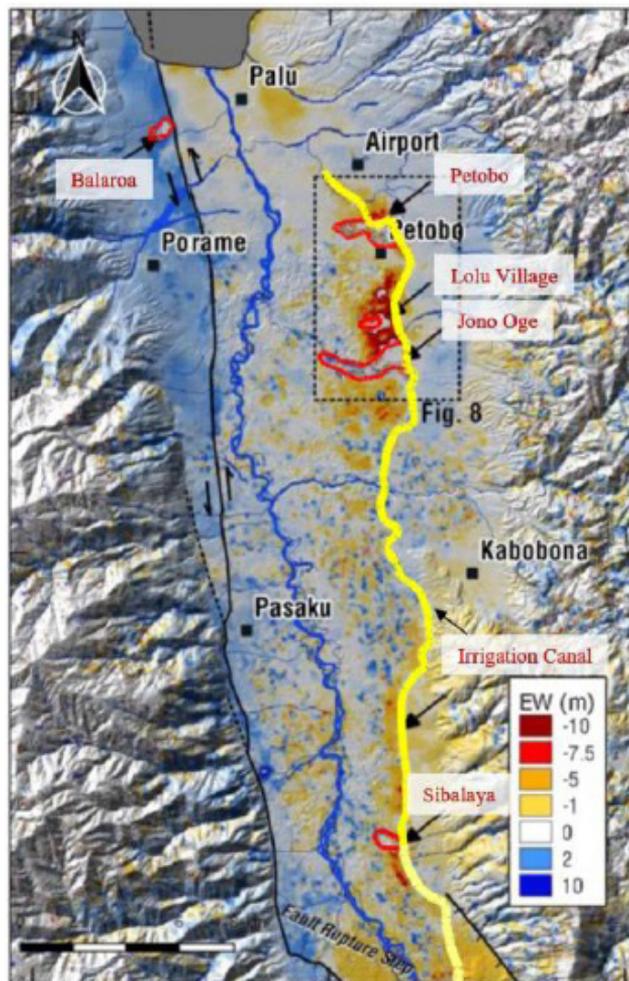
dari campuran sawah dan hunian tempat tinggal dan komersial. Batas bagian timur dari lapisan tanah dibatasi oleh saluran irigasi digunakan untuk mengairi sawah setempat. Pada saat gempa, saluran irigasi dilaporkan muka air tanah diperkirakan mencapai kedalaman antara 2,0 m hingga 2,5 m. BNPD memperkirakan longsor di bagian timur merusak dan menghancurkan 3.334 bangunan di Petobo, dan 340 bangunan di Jono Oge. Pemetaan cepat tentang kerusakan cepat yang dilakukan oleh Copernicus Emergency Management Service (2018) menunjukkan bahwa sekitar 150 bangunan rusak atau hancur di daerah longsor desa Lolu. Kira-kira 25 km di selatan bandara Palu, kerusakan yang ke empat akibat longsor-likuifaksi terjadi di desa *Sibalaya* (Gambar 3.1). Peta kerusakan dari Copernicus (Copernicus 2018) menunjukkan bahwa 147 bangunan rusak atau hancur oleh longsor-likuifaksi Sibalaya. Mirip dengan longsor-likuifaksi di Palu, batas timur longsor di Sibalaya adalah saluran irigasi Gumbasa.

Tim investigasi menggunakan kombinasi citra satelit, UAV, atau drone, foto udara dengan resolusi tinggi, survei lapangan berbasis darat, dan wawancara saksi mata dengan warga setempat untuk menyelidiki masing-masing longsor-likuifaksi. Fitur morfologis utama adalah dipetakan, termasuk puncak longsor, rotasi balik blok tanah, zona ekstensi, blok tanah yang terangkat, sand boil, aliran air, dan gerusan. Gambar satelit sebelum dan sesudah gempa disediakan melalui program Open Data Digital Globe (Digital Globe 2018) digunakan untuk memetakan pergeseran bangunan, identifikasi arah pergeseran, dan besarnya deformasi tanah. Gambar satelit ini digunakan sebagai latar belakang sebagian besar peta yang ditampilkan dalam laporan ini. Dengan kecuali Balaroa, tempat tempat tersebut umumnya terpelihara dengan baik dan dapat diakses sepenuhnya pada saat investigasi lapangan.

¹Sistim klasifikasi dari Hungr et al. (2014) diadopsi dalam menggambarkan longsor sebagai aliran, yang didefinisikan sebagai "cepat hingga sangat cepat dari bahan berbutir jenuh pada lereng dengan kemiringan sedang, yang melibatkan kelebihan tegangan air pori atau likuifaksi bahan yang berasal longsor tanah. Bahannya bisa terdiri dari pasir lepas sampai debris dan ... lanau. Biasanya berasal dari longsor yang berulang"

Survei di lokasi Balaroa terbatas, karena pembersihan yang signifikan dan pemindahan puing-puing telah dilakukan sebelum tim investigasi datang mengunjungi lokasi tersebut. Kegiatan pembersihan melibatkan penggunaan peralatan berat untuk memindahkan atau meratakan bangunan yang rusak dan permukaan tanah. Pemetaan morfologi longsor di Jono Oge dan Sibalaya terkendala dampak longsornya saluran irigasi Gumbasa, yang mengakibatkan erosi, dan dalam kasus Jono Oge, aliran lumpur yang besar merusak dua desa di hilir dari lokasi longsor-likuifaksi.

Peta pergeseran yang diperoleh dari citra satelit optik di seluruh cekungan Palu (Valkaniotis et al. 2018) menunjukkan deformasi tanah yang cukup besar di luar tapak dari longsor-likuifaksi yang masif dan diselidiki oleh tim GEER, HATTI dan PuSGen (Gambar 3. 2).

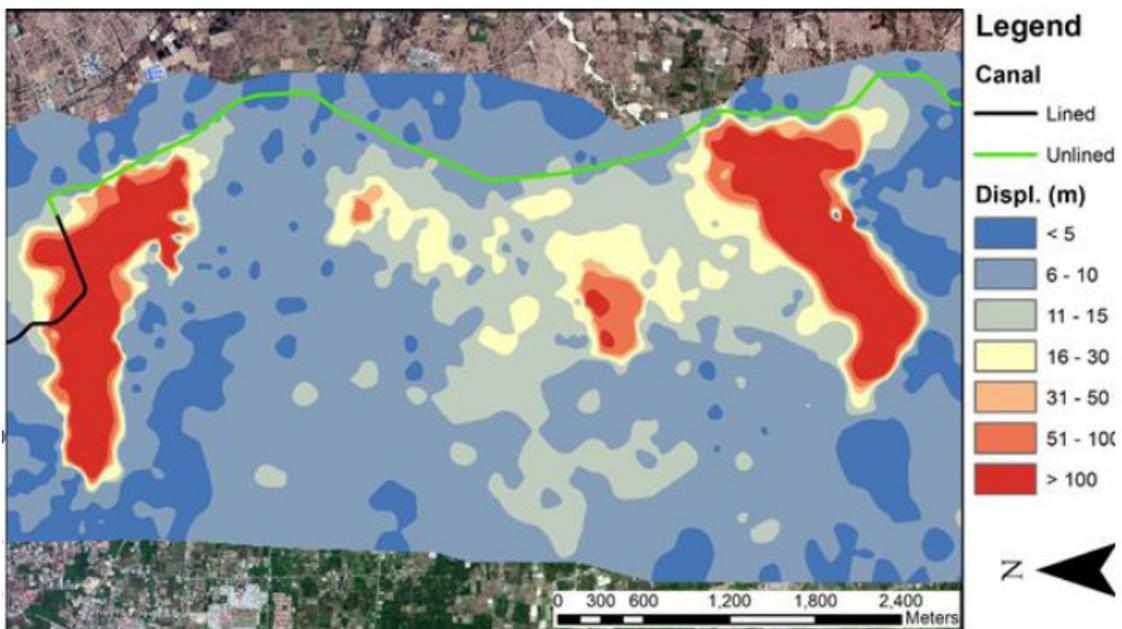


Gambar 3.2. Deformasi tanah arah timur-barat di cekungan Palu yang diinterpretasikan dari data satelit optik (diadaptasi dari Valkaniotis et al., 2018).

Secara umum, tim GEER mengamati bahwa deformasi tanah di cekungan Palu masing-masing bergerak ke barat di sisi timur sungai Palu, dan ke arah timur di sisi barat sungai Palu. Area dengan deformasi tanah yang lebih besar umumnya terjadi di sekeliling lokasi dimana terjadi longsor-likuifaksi.

Perspektif Global Tanah Longsor Cekungan Timur Selatan Bandara Palu

Tiga lokasi longsor-likuifaksi yang terjadi di sebelah selatan bandara Palu, di sisi timur cekungan Palu terletak dalam wilayah dengan deformasi tanah yang besar (Gambar 3.2). Penggunaan lahan di lokasi ini termasuk campuran pertanian (mis. sawah) dan komunitas perumahan. Peta pergeseran tanah (Gambar 3.3) yang dihasilkan dari identifikasi lokasi struktur dalam gambar satelit sebelum dan sesudah gempa dan mengukur pergeseran untuk lebih memahami pola pergerakan regional di bidang ini.



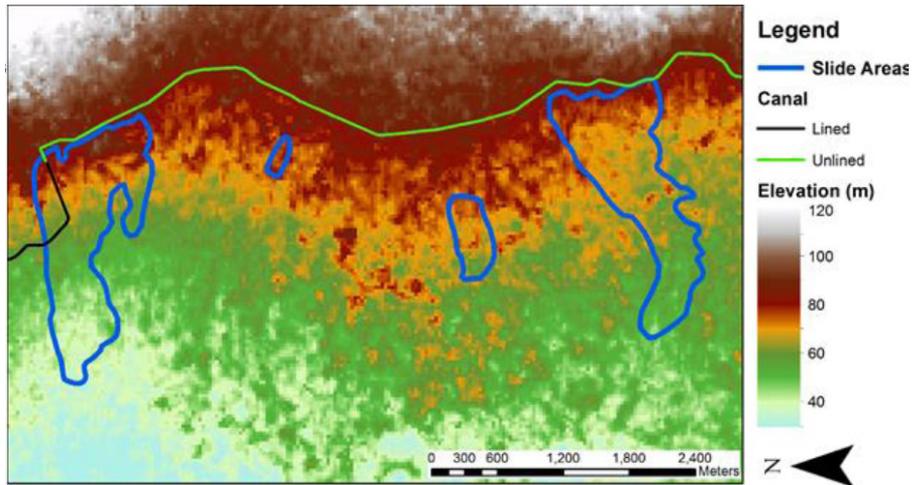
Gambar 3.3. Deformasi tanah arah timur-barat di tepi barat Cekungan Palu diinterpretasikan dari data optik satelit.

Untuk mendokumentasikan pergerakan suatu bangunan, sebuah puncak, atau titik yang jelas lainnya, dipilih pada keduanya gambar. Metode yang dijelaskan di atas digunakan untuk memetakan pergeseran 1.220 bangunan, yang kemudian dibuat

kontur dengan menggunakan pembobotan jarak terbalik (Gambar 3. 3). Pemetaan awal dilakukan dengan menggunakan gambar satelit yang disediakan oleh Program Data Terbuka "DigitalGlobe". DigitalGlobe menyediakan akses terbuka ke gambar sebelum dan sesudah gempa untuk mendukung respons dan upaya pemulihan. Untuk studi ini, gambar pra-gempa (ID 1030010078CD4A00) diambil pada 20 Februari 2018, sedangkan gambar pasca gempa (ID 1040010042376D00) diambil empat hari setelah gempa bumi pada tanggal 2 Oktober 2018.

Pergeseran di dalam wilayah yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 (yaitu; sisi timur cekungan Palu) adalah umumnya berorientasi ke barat, yang menurun menuju Sungai Palu. Deformasi lebih besar dari 50 meter terjadi di empat lokasi, termasuk longsor-likuifaksi Petobo, Desa Lolu, dan Jono Oge. Longsor yang lebih kecil dan tidak terlalu mencolok juga terjadi di sawah antara Petobo dan Lolu Desa, tetapi tidak diselidiki selama investigasi lapangan tim GEER. Di luar lokasi keempat longsor-likuifaksi, pergeseran sebesar 30 meter mengakibatkan retak pada tanah yang signifikan dan kerusakan pada jalan raya dan struktur di lokasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Singkatnya, dalam skala regional, pergeseran relatif kecil di sisi timur dari saluran irigasi, dan pergeseran yang jauh lebih besar diamati di sisi barat saluran irigasi. Sebagian besar saluran irigasi tidak berpelindung lereng menyediakan air untuk kegiatan pertanian dan mencapai tepi utara longsor-likuifaksi di Petobo, yang menandai sebagai batas utara dari longsor-likuifaksi. Saluran tidak berpelindung lereng memungkinkan air merembes ke bawah menuju sungai, yang tidak diragukan lagi berkontribusi pada muka air tanah yang lebih tinggi, penjumlahan endapan aluvial, dan peningkatan potensi likuifaksi, dan kehilangan kuat geser selama gempa. Pola deformasi tanah di selatan bandara juga tampaknya dipengaruhi oleh faktor topografi regional dan geologi. Aliran longsor terjadi di dekat persinggungan endapan kipas aluvial yang lebih muda dan sedimen aluvial yang membentuk dasar cekungan dekat Sungai Palu. Petobo dan Jono Oge, yang merupakan batas utara dan selatan dari wilayah longsor-likuifaksi yang besar masing-masing terletak di tepi utara dan selatan dari endapan kipas aluvial (Gambar 2.4). Selain itu, tanah yang landai di daerah ini memiliki kemiringan rerata antara 2 dan 4 persen, meskipun aliran longsor tampaknya dimulai dari permukaan dengan kemiringan lokal yang lebih besar (sekitar 4 hingga 6 persen), yang juga bertepatan dengan transisi elevasi yang berubah dari 60 menjadi 80 m (yaitu transisi dari kontur hijau ke merah pada Gambar 3. 4, yang merupakan wilayah dengan ketinggian pada

kisaran yang sama dimana deformasi terbesar teramati di luar lokasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dimensi aliran longsor berkorelasi langsung dengan permukaan tanah diluar lokasi dimana longsor mulai terjadi.



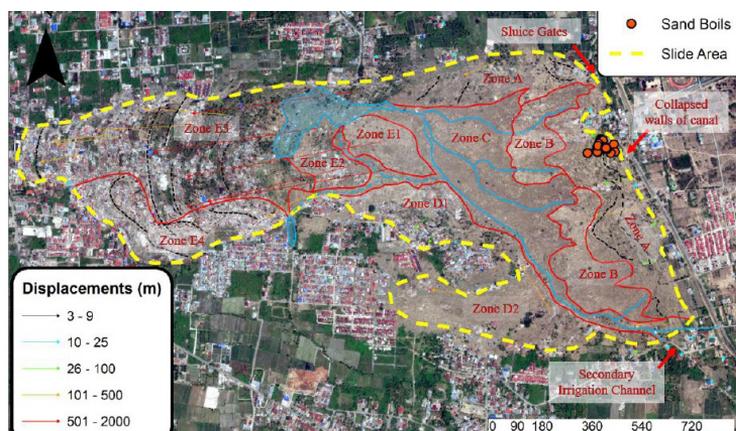
Gambar 3.4. Kontur ketinggian ditafsirkan dari data satelit optik di tepi barat cekungan Palu disekitar longsor-likuifaksi Petobo, Desa Lolu, dan Jono Oge.

Semua aliran longsor terhenti di daerah yang datar atau dengan sedikit bergelombang pada permukaan tanahnya, atau di daerah dengan topografi yang sedikit naik, aliran yang terhambat dan berkelanjutan pada daerah yang menurun (topografi awal untuk setiap longsor-likuifaksi disajikan kemudian dalam diskusi terperinci dari setiap lokasi).

Diskusi sebelumnya berfokus pada pola gerakan yang lebih besar di sekitar ketiga lokasi longsor-likuifaksi di selatan bandara Palu, di sisi timur cekungan Palu. Namun, terdapat kesamaan untuk tanah longsor lainnya, seperti longsor di Balaroa dan Sibalaya, yang terletak di seberang lembah, juga terjadi di dekat pertemuan antara kipas aluvial dan aluvial endapan banjir dari Sungai Palu (Gambar 2.4). Longsor-likuifaksi Sibalaya juga terjadi yang batas timurnya adalah saluran irigasi, mirip dengan Petobo, desa Lolu, dan Jono Oge. Bagian selanjutnya yang disajikan di bagian sini adalah diskusi yang terperinci tentang setiap lokasi longsor-likuifaksi yang dikunjungi oleh tim GEER, termasuk pengamatan, ekspresi geomorfologi, dan catatan saksi mata yang memberikan kesaksian untuk dapat memahami perkembangan longsor-likuifaksi yang lebih baik di setiap lokasi, dan mekanisme secara umum yang berkontribusi pada longsor-likuifaksi.

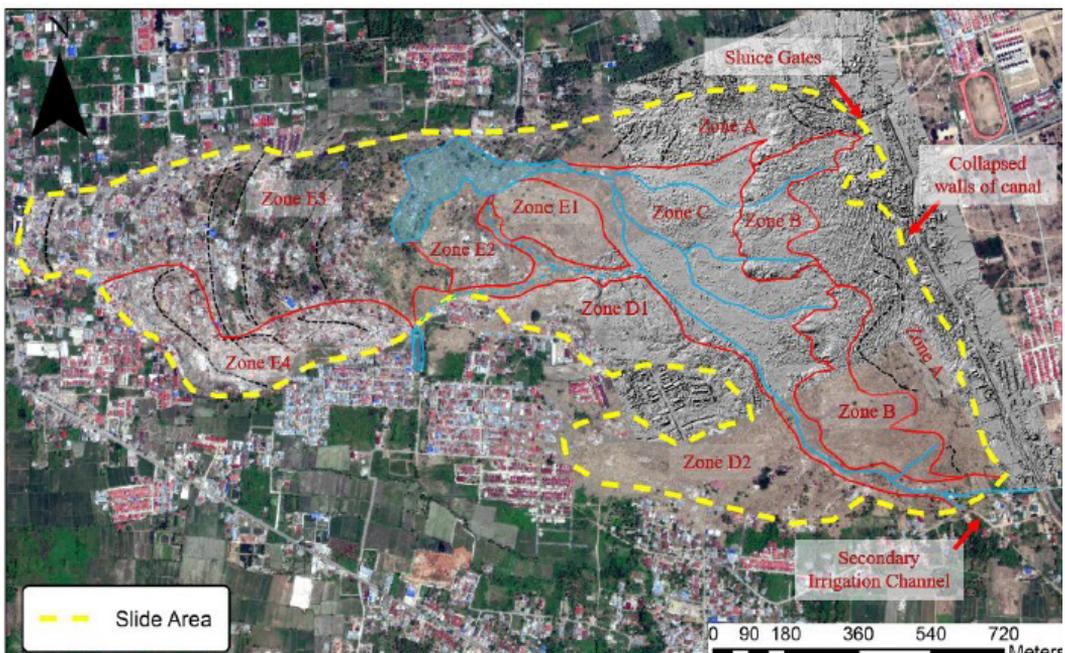
3.1. Longsor-Likuifaksi Petobo

Petobo adalah daerah perumahan di mana sebagian besar korban yang terkait dengan longsor-likuifaksi terjadi. Korban meninggal dan luka-luka terutama disebabkan oleh banjir dan tenggelamnya bangunan-bangunan di bagian tengah sampai barat dari daerah bencana, dan dari cepatnya pergerakan tanah (yang menyebabkan terjadinya pergeseran hingga 800 meter) yang membawa manusia dan bangunan yang runtuh dari bagian tengah sampai dengan bagian timur dari aliran longsor. Setidaknya beberapa ratus rumah hancur pada daerah dengan penduduk padat. Bagian tengah longsor-likuifaksi Petobo berjarak sekitar 1 km sebelah selatan bandara Mutiara SIS Al Jufri Palu, dan terletak pada sisi barat cekungan Palu. Luas total longsor-likuifaksi termasuk zona sumber longsor, pergeseran, dan deposisi berkisar antara 1,43 kilometer², dengan panjang keliling sekitar 6,7 km. Panjang longsor-likuifaksi diperkirakan lebih dari 2 km dari puncak longsor di dekat saluran irigasi sampai dengan zona disposisi di batas barat daerah longsor. Longsor-likuifaksi umumnya mengalir dari timur ke barat, dengan gerakan terbesar terjadi di bagian utara dari longsor. Pergeseran bangunan di bagian selatan dari Longsor tidak sebesar di bagian utara. Tim GEER telah membagi aliran longsor menjadi lima zona berbeda seperti terlihat pada Gambar 3.5 (zona A sampai zona E), yang ditandai oleh morfologi yang unik dengan besaran deformasi tanah yang berbeda (horizontal dan vertikal, dan rotasi), retak, kekasaran permukaan, dan pergeseran blok tanah.



Gambar 3.5. Peta Orthomosaic menunjukkan batas tanah longsor-likuifaksi Petobo, lokasi sand boil, vektor pergeseran, dan zona yang digambarkan oleh fitur morfologis dan notasi.

Bangunan dan infrastruktur yang lebih besar di bagian timur dari longsor-likuifaksi Petobo pada umumnya terhindar dan relatif tidak terganggu oleh longsorlikuifaksi. Citra satelit sebelum dan sesudah gempa dan model elevasi digital (DEM) yang diproses dari gambar drone² yang dikumpulkan oleh Tim investigasi membantu identifikasi dan interpretasi fitur morfologis dan pergeseran zona di bagian timur longsor-likuifaksi (Gambar 3.6). Namun, bangunan dan infrastruktur di bagian barat longsor-likuifaksi (terutama Zona E) harus dikerjakan ulang dan banyak terganggu oleh peralatan berat yang dibawa ke lokasi sebelum tim GEER tiba. Peralatan berat (bulldozed & excvator) bergerak meratakan tanah longsor dan memindahkan, menghancurkan, dan mengubur sisa-sisa bangunan yang hancur oleh longsor-likuifaksi.



Gambar 3.6. Model elevasi digital menggambarkan fitur morfologi 3D di bagian timur laut longsor-likuifaksi.

² Beberapa pesawat tanpa awak (UAV) atau "drone" digunakan selama investigasi, tetapi sebagian besar pemetaan resolusi tinggi dilakukan menggunakan platform DJI Inspire 2 yang dikombinasikan dengan kamera Zenmuse X4S (Sensor 1 inci, dengan resolusi 20 MP). Penerbangan drone biasanya diterbangkan pada ketinggian 65 m (dengan gambar nadir memiliki 75% overlapping), memberikan resolusi piksel jarak pengambilan sampel tanah ~ 2 cm. Gambar drone diproses dengan menggunakan perangkat lunak Pix4D mapper untuk mengembangkan gambar ortomosaic resolusi tinggi dan model elevasi digital. Keakuratan survei drone ditingkatkan dengan menggunakan kontrol elevasi. Survei GPS kinematik real-time dengan resolusi tinggi digunakan untuk menentukan koordinat titik kontrol tanah.

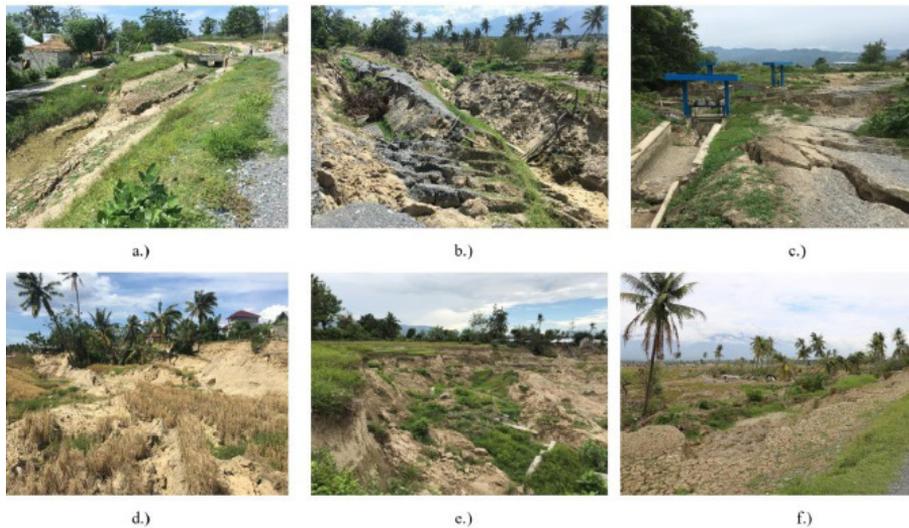
3.1.1 Observasi lapangan dan morfologi longsor-likuifaksi

Zone A – Puncak Longsoran dan Blok Ekstensional yang Terputar

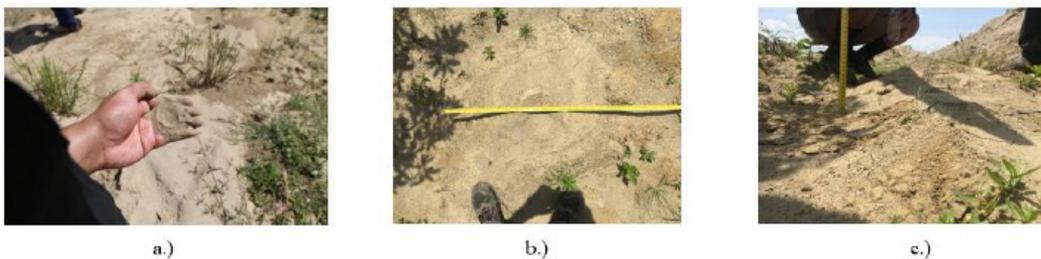
Zona A longsor-likuifaksi Petobo terdiri dari puncak longsoran dan dan perputaran blok yang masih dalam kondisi baik. Puncak longsoran di sepanjang batas timur longsor-likuifaksi ini berbatasan dengan saluran irigasi Gumbasa yang aktif sebelum terjadi gempa (Gambar 3.5). Seorang warga Petobo memperkirakan kedalaman air di saluran irigasi itu sekitar 2 meter pada saat terjadi gempa. Tampaknya terjadi kehilangan tegangan kekang pada puncak longsoran yang mengakibatkan ekstensi lateral (ke barat) dan menyebabkan rusak yang parah pada saluran di beberapa lokasi (Gambar 3.7a), dan di beberapa tempat, terjadi keruntuhan lereng saluran (Gambar 3.7b). Pada saat investigasi, saluran irigasi telah kering, dan tidak terdapat rembesan atau genangan air. Perlu dicatat bahwa lereng saluran di dekat pusat longsoran Petobo telah benar-benar runtuh (Gambar 3.6) , tidak terlihat fitur gerusan atau erosi yang dapat diidentifikasi di lokasi ini, menunjukkan bahwa sumber air saluran irigasi terbatas ketika dinding saluran runtuh. Seperti yang dibahas kemudian, ini berbeda dengan yang terjadi di Jono Oge dan Sibalaya, dimana gerusan dan erosi yang signifikan terlihat di lokasi tersebut, dimana saluran irigasi runtuh. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, air di saluran irigasi sebelumnya mengalir ke utara, sebelum berbelok tajam ke barat dan kemudian berbelok lagi ke utara. Aliran air di saluran irigasi sebelumnya dikendalikan oleh dua pintu air di sudut timur laut longsoran, di mana saluran irigasi beralih dari yang tidak berpelinding lereng menjadi saluran beton. Gambar 3.7c menggambarkan kerusakan pada pintu air saluran irigasi yang berjajar, ekstensi lateral dan pergeseran blok vertikal di sudut timur laut lokasi tersebut. Bagian saluran beton yang memanjang sampai ke lokasi longsor hancur dan terkubur di bawah puing-puing.

Puncak longsoran memotong sawah yang ditanami dengan endapan aluvial yang mengandung kerang, ha ini menunjukkan bahwa sedimen tersebut adalah sedimen laut. Blok tanah yang besar besar (umumnya setinggi beberapa meter) longsor ke bawah dan memanjang ke samping dekat puncak longsoran. Longsor memutar blok-blok yang curam secara lokal menghasilkan talus yang berada dalam depresi antar blok. Sebagian besar blok terputar kembali, dengan vegetasi yang berorientasi ke atas puncak longsoran (Gambar 3.7d -f). Tinggi dan ukuran blok arah lateral umumnya mengecil sesuai dengan jarak dari puncak longsoran. Blok blok tanah tampaknya telah berubah bentuk pada serangkaian imbas kerusakan permukaan selama tahap

awal longsor (terlihat dekat saluran irigasi), sebelum berubah menjadi balok-balok yang hanyut dan meluncur di sepanjang lokasi yang hancur oleh likuifaksi pada tanah berpasir. Sand boil dan ejecta ditemukan di antara blok di Zona A (Gambar 3.5 dan Gambar 3.8), menunjukkan bahwa tekanan air pori meningkat dan likuifaksi terjadi pada tanah di bawah blok. Ejecta terdiri dari pasir halus dengan lanau dan pasir lanau, mirip dengan bahan yang terdiri dari lantai Zona C.



Gambar 3.7. Pengamatan di Zona A: a.) Retak di saluran irigasi (-0.93791, 119.92157); b.) runtuhnya dinding saluran dekat puncak longsor (-0.93832, 119.92154); c.) kerusakan dan pergeseran vertikal pintu air di sudut timur laut longsor tempat saluran irigasi berbelok dan membentang dari timur ke barat (-0.936019, 119.920635); d.) blok yang terputar di dekat puncak longsor (-0.938349, 119.921008); e.) blok yang terputar-balik dan lereng curam di sudut timur laut longsor (-0.93623, 119.92018); f.) menghadap ke bidang blok yang terputar di sudut tenggara longsor (0.94071, 119.92258).



Gambar 3.8. Sand boil: a.) Tipikal pasir pada ejecta (-0.93850, 119.92092); b. c.) tinggi dan lebar tipikal sand boil yang ditemukan terlindung di antara balok (-0.938503, 119.920425).

Zone B - Material Longsor berupa Hancuran Blok dan Gundukan Tanah

Zona B adalah lokasi yang mengandung campuran material longsor yang secara mencolok terdiri dari massa tanah yang sangat lunak dan blok-blok tanah yang secara berulang terpecah menjadi dan gundukan yang lebih kecil selama proses longsor (Gambar 3.6). Zona B juga terdiri dari beberapa gundukan tanah besar yang terisolasi. Blok dan gundukan di Zona B terasa lebih kecil dan lebih bulat daripada blok sudut yang terputar balik yang ditemukan di Zona A (Gambar 3.9a). Deposit di Zona B tampaknya menimbun material yang terletak di lereng bawah di Zona C. Ini ditunjukkan dalam DEM pada permukaan yang lebih curam yang terlokalisir di perpotongan antara Zona B dan C (Gambar 3.6). Perbandingan kondisi permukaan Zona B (Gambar 3.9b) dengan Zona C (Gambar 3.10a) menunjukkan bahwa sedimen di Zona B lebih kering pada saat investigasi lapangan. Diyakini ini karena material Zona B meluncur di atas sedimen pada dasar Zone C, yang kemungkinan terjadi likuifaksi pada saat longsor.



a.)



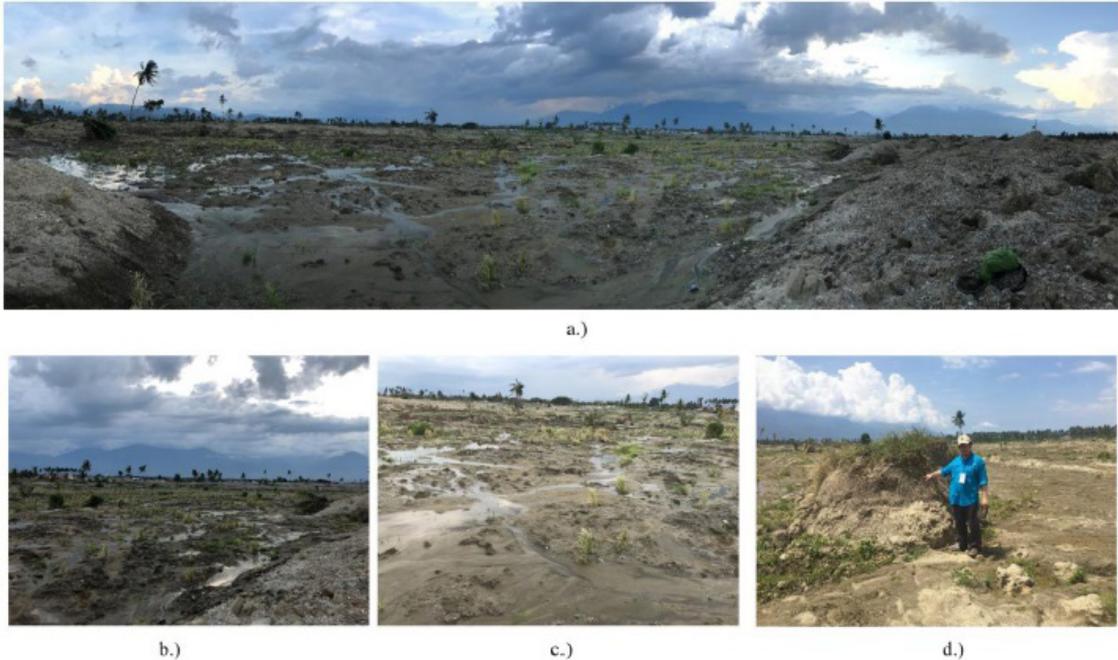
b.)

Gambar 3.9. Zona B: a.) Blok/gundukan yang relatif besar di zona ini dengan sedikit vegetasi dan bentuknya tidak seperti blok lain di Zona A (-0.939489, 119.917507); b.) deposit debris flow dan gundukan di bagian depan gambar dekat batas Zona C, yang membentuk bidang yang terangkat pada batas kedua zona ini (-0.939664, 119.918263).

Zone C – Deposit Endapan yang Mengalami Runtuh Ulang

Zona C adalah lokasi yang relatif datar, dataran yang terbentuk dari endapan tanah yang mengalami runtuh yang berulang (yaitu, sepenuhnya tidak terstruktur) yang memisahkan bahan longsor-likuifaksi Zona B dari endapan luncuran yang lebih terfluidisasi dalam zona D dan E. Dengan pengecualian beberapa lokasi yang terisolasi, blok tanah dan gundukan tanah ditemukan sepanjang wilayah atas longsor-likuifaksi

(yaitu, Zona A dan B) tidak terdapat di Zona C. Sedimen permukaan di Zona C terdiri dari tanah berpasir jenuh, berbutir halus dengan sedikit mengandung lanau. Sedimen ini secara signifikan lebih lunak (tanah tidak dapat menopang berat badan anggota tim) dan lebih basah daripada yang ditemukan di Zona B (Gambar 3.10a -c).



Gambar 3.10. Zona C: a.) Pandangan menghadap selatan-tenggara di batas Zona B dan C, dengan jelas perbedaan ketinggian dan air yang terlihat di Zona C (-0.93971, 119.91859); bc.) mengamati jaringan anak sungai dan drainase yang membawa air melalui zona (-0.939725, 119.918577 dan 0.93974, 119.91859); d.) blok yang tidak menentu, relatif utuh, di dalam zona (-0.940918, 119.917806).

Kadar air yang tinggi ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap dari endapan di Zona C yang ditunjukkan pada satelit dan citra ortomosaik yang diperoleh dari drone (Gambar 3.5). Pada saat investigasi, jaringan anak sungai yang terkikis secara aktif mengalirkan air melintasi permukaan Zona C menuju barat laut. Saluran jaringan anak sungai terlihat sampai lereng Zona B (Ini ditunjukkan oleh perubahan warna yang ditunjukkan pada Gambar 3.5) dan mencapai ke bagian bawah Zona A yang tersingkap. Ada beberapa kemungkinan sumber air di Zona C termasuk: (i) rembesan yang berasal dari Zona B (ini terlihat selama investigasi), (ii) disipasi tegangan air pori yang tinggi diinduksi oleh gempa di dalam Zona A sampai C, (iii) aliran permukaan dari anak sungai alami yang sebelumnya mengalir melalui bagian selatan dari jejak

longsor (terlihat di Gambar 3.3), dan (iv) saluran irigasi sekunder yang sebelumnya mengalirkan air dari saluran induk irigasi untuk sawah di bagian selatan longsor (Gambar 3.5). Hal ini tidak diketahui apakah runtuhnya saluran irigasi sekunder adalah sumber air permukaan yang berkontribusi terhadap erosi dan gerusan selama dan setelah longsor, atau jika hanya menambah jenuh sedimen. Jika saluran irigasi sekunder menyebabkan air permukaan di Zona C segera setelah itu longsor, morfologi zona yang datar menunjukkan bahwa aliran mempunyai energi yang jauh lebih kecil daripada di lokasi lain di mana saluran irigasi utama runtuh (misalnya, Jono Oge dan Sibalaya, lihat §3.2 dan §3.4, masing-masing). Kombinasi sedimen yang mengalami runtuh ulang, kondisi basah, dan kuat geser rendah bersama-sama mendukung hipotesis bahwa sedimen di Zona C mengalami likuifaksi selama gempa, dan berfungsi sebagai lapisan yang di atasnya tanah meluncur selama terjadinya longsor-aliran.

Zone D – Zona Luncuran Selatan

Zona D terdiri dari material luncuran longsor-likuifaksi yang diendapkan melintasi bagian selatan longsor. Endapan sebagian besar terdiri dari pasir halus yang telah mengalami runtuh berulang (yaitu, sepenuhnya tidak terstruktur) yang terdiri dari sedimen pasir halus nampak sangat terfluidisasi pada saat longsor-likuifaksi. Zona termasuk berbagai fitur permukaan termasuk blok tanah dan gundukan tanah yang hancur, dan balok balok rakit tanah yang diperkuat oleh massa akar dari vegetasi perdu dan pepohonan (Gambar 3.11a). Banyak fitur permukaan hanyut sampai beberapa ratus meter sebelum teronggok di Zona D. Saat mereka tergeser, fitur permukaan ini mengalami perputaran, miring, tergeser, dan terfragmentasi. Permukaan tanah Zona D ditandai dengan orientasi utara-selatan punggungan terkompresi, tanah terangkat, tumpukan fitur permukaan, dan gundukan tanah. Deposit luncuran bertabrakan dengan dan membanjiri banyak bangunan dan infrastruktur di Zona D. Dari bagian tengah ke arah timur bagian dari zona ini, bangunan tercabut dari fondasinya dan diangkat oleh endapan yang terfluidisasi. Di lokasi terdekat lainnya, bangunan sepenuhnya terkubur oleh endapan (Gambar 3.5). Sepanjang batas barat dari longsor-likuifaksi, rumah-rumah terangkat beberapa meter di sepanjang punggungan yang terdorong. Di tepi distal Zona D, endapan mengalir menyebar melalui jalan-jalan, menembus dinding, pintu, dan jendela rumah penduduk sepanjang jalan-jalan ini (Gambar 3.11b). Pada saat investigasi, rumah-rumah yang tidak rusak atau rusak sebagian di Zona D tidak

dihuni dan tampaknya telah ditinggalkan.



Gambar 3.11. Zona D: a.) Blok tertekan dan terangkat, punggungan, dan gundukan sepanjang barat batas zona (-0,941527, 119,917471); b.) bukti aliran debris melalui rumah di Zona D1(-0.940627, 119.912096).

Zone E - Zona Luncuran Utara

Bagian dari Zona E telah terpengaruh oleh upaya penyelamatan dan pemulihan pasca gempa pada saat tim investigasi tiba di Palu. Penggalan dan peralatan berat pemindah tanah telah digunakan untuk menghancurkan bangunan dan meratakan zona luncuran dan puing (Gambar 3.12a). Dengan demikian, fitur permukaan ditafsirkan berdasarkan pengamatan selama investigasi berlangsung dan citra satelit yang diambil sesaat setelah gempa. Untuk membantu menginterpretasikan gambar satelit, fitur permukaan yang diamati tim di lapangan Zona D dicocokkan dengan kondisinya didalam gambar. Pemahaman ini kemudian digunakan untuk mengembangkan deskripsi Zone E. Perlu dicatat bahwa Zona D dan E memiliki banyak karakteristik umum termasuk: (i) ketebalan luncuran endapan (Gambar 3.12d), (ii) limpasan material yang terfluidasi sepanjang tepi distal ke lingkungan yang berdekatan (dengan penetrasi ke dalam rumah) [Gambar 3.12e, f], dan (iii) secara menyeluruh sifat keruntuhan berulang (tidak terstruktur) dari endapan yang sebelumnya terfluidisasi. Satu fitur penting teramati dalam gambar satelit Zona E, area besar genangan air dekat bagian utara dan tepi selatan zona, (Gambar 3.12b , c), yang masih ada dan dapat diamati pada saat investigasi.



Gambar 3.12. Zona E: a.) Area yang mengalami keruntuhan berulang di tengah zona di mana pekerjaan tanah dilakukan sehingga fitur morfologis tidak dapat dikenali (-0.93952, 119.90387); b.) daerah genangan di utara batas Zona E (-0,94672, 119,90939); c.) genangan berada di batas selatan Zona E (-0.94090, 119.91040); d.) area di sepanjang batas selatan Zona E4 di mana aliran debris menyusup kedalam perumahan (-0.94072, 119.90413; -0.94141, 119.90977; -0.94150, 119.9068).

Jarak luncuran Zona E jauh lebih panjang daripada di Zona D. Banyak bangunan dan infrastruktur yang terkena dampak bahan luncuran yang terfluidisasi lebih dari 500 meter. Puing-puing di sepanjang tepi timur Zona E (ditunjukkan sebagai subarea E1 pada Gambar 3.6) mirip dengan di Zona D dan terdiri dari campuran heterogen tanah berpasir dan lanau yang diselingi dengan meningkatnya jumlah bahan antropogenik menuju tepi barat sub zona E2. Pergeseran yang dipetakan menunjukkan bahwa bangunan yang hanyut ke sub zone E3 paling besar mengalami pergeseran yang signifikan, yang sebelumnya terletak di tempat yang sekarang menjadi Zona C dan bagian timur Zona D (Gambar 3.5). Orientasi punggungan yang tertekan diamati dari citra satelit pasca gempa, yang memberikan informasi tentang interaksi antara sub-zona E3 dan E4. Di subzone E3, punggungan tertekan berorientasi utara-selatan dan konsisten di seluruh area. Di subzone E4, punggungan tertekan terputar, yang menunjukkan bahwa punggungan itu “didorong” karena menghambat aliran dari blok rakit di subzone E3. Citra satelit juga menunjukkan bahwa luncuran puing terjadi di sepanjang jalan-jalan subzone E4, menunjukkan setidaknya sebagian tumpang tindih dengan endapan tanah dari subzone E3 diatas subzone E4 selama longsor-likuifaksi

berlangsung. Sebagai tambahan, bagian barat dari subzone E3 tergeser melalui bagian barat laut dari subzone E4 saat longsor bergerak, mencapai sudut barat laut bagian longsor ini (Gambar 3.5).

3.1.2 Tafsiran Perkembangan Longsoran

Sebelum gempa, Petobo adalah lingkungan yang padat penduduk. Gempa terjadi pada sore hari (sekitar jam 6 sore) ketika banyak penghuni berada di dalam rumah atau di lingkungan rumah mereka. Tim investigasi mewawancarai saksi mata yang secara langsung mengamati longsor-likuifaksi dan perkembangannya ke arah barat. Karena besarnya longsor-likuifaksi yang terjadi, sebagian besar saksi mata hanya menyaksikan sebagian kejadian; Namun, satu saksi mata berada pada bidang yang lebih tinggi di sudut timur laut dari longsor-likuifaksi (Gambar 3.13) yang melihat hampir semua kejadian yang berlangsung selama beberapa menit. Secara umum, keterangan saksi mata diberikan secara sukarela, sangat konsisten dan memberikan detail yang signifikan tentang waktu, urutan, dan perkembangan dari longsor-likuifaksi. Keterangan ini juga sesuai dengan sumber-sumber informasi lain tentang longsor-likuifaksi termasuk: (i) video saksi mata yang diunggah di media sosial, (ii) citra satelit sebelum dan sesudah gempa, (ii) gambar dari drone dan DEM, dan (iv) ekspresi morfologis yang diamati di lapangan. Para saksi mata umumnya menggambarkan gempa yang bergetar adalah periode awal yang intens dari gerakan tanah horizontal, diikuti oleh kondisi tenang yang singkat tanpa guncangan (beberapa detik), dan kemudian terjadi gerakan naik turun yang keras dan bantingan yang keras pada akhir guncangan. Beberapa saksi mata juga memberikan deskripsi visual urutan gerakan tanah dengan terlebih dahulu menggerakkan tangan mereka secara datar, kemudian diikuti dengan gerakan memantul vertikal untuk secara visual menggambarkan gerakan vertikal, dan kemudian gerakan ke bawah yang cepat dengan kedua tangan untuk menggambarkan penurunan akhir secara vertikal. Berdasarkan keterangan saksi mata dari orang yang menyaksikan longsor dari sudut timur laut dari lokasi longsor-likuifaksi, Longsor tidak dimulai sebelum gerakan tanah mereda. Geser yang terjadi pertama kali diamati (melalui pergerakan pohon kelapa) di bagian selatan lokasi dan bergerak ke utara. Lebar jejak longsor-likuifaksi di bagian selatan lebih dari 1 km; oleh karena itu saksi tidak dapat memberikan deskripsi yang tepat tentang di mana keruntuhan itu mulai terjadi (misalnya, berdekatan dengan selatan selatan dan barat). Namun,

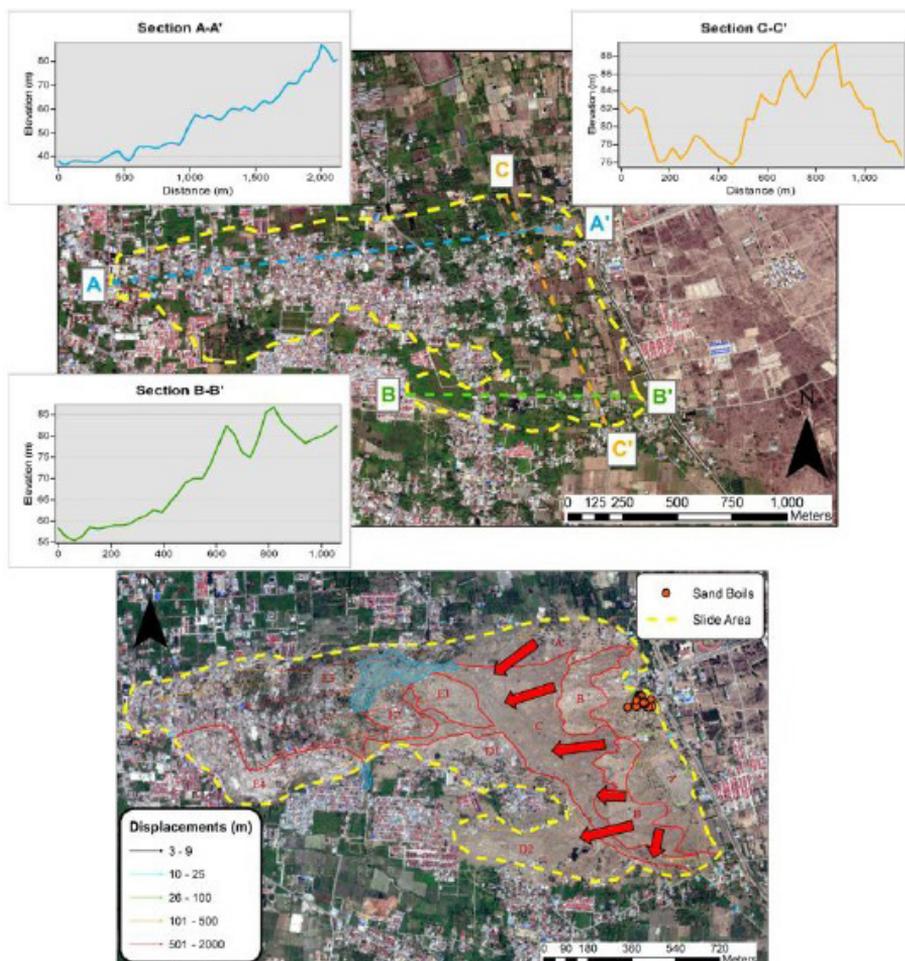
keterangan mereka menunjukkan pergerakan pertama kali diamati jauh dari saluran irigasi tetapi masih di bagian timur area yang terdampak (yaitu, Zona B atau C).



Gambar 3.13. Perspektif keterangan saksi mata (menghadap arah barat-barat daya) dari sudut timur laut longsor ($-0.93622, 119.920207$).

Fitur unik dari longsor-likuifaksi Petobo adalah pembentukan dua "kaki" (kaki utara dan selatan) saat gempa. Gambar 3.14 menunjukkan profil elevasi pra-gempa untuk dua potongan melintang yaitu, A-A' dan B-B', yang masing masing adalah "kaki" utara dan selatan. Potongan melintang C-C' menunjukkan profil elevasi di sepanjang bagian timur longsor. Khususnya, "kaki" selatan secara signifikan lebih pendek, yang dikaitkan dengan punggungan yang ditemui di bagian bawah kaki selatan yang menghalangi massa longsor bergeser memanjang ke barat sampai ke kaki utara. Sangat mungkin bahwa topografi yang terus menerus menurun di sepanjang kaki utara menyebabkan pergeseran dan jarak luncuran yang lebih besar sampai dengan daerah yang mulai menanjak secara topografi. Profil elevasi yang memotong bagian timur longsor (bagian C-C') juga membantu menjelaskan pengamatan ekspresi geomorfik dan menjelaskan mengapa kedua kaki terbentuk dengan cara ini. Di bagian selatan dari longsor-likuifaksi, terjadi kenaikan elevasi atau fitur seperti bukit dan beralih ke depresi dangkal, mengarah ke utara (Gambar 3.14). Aliran debris

di utara tampaknya telah digerakkan ke daerah yang lebih rendah, yang juga didukung oleh kerusakan di sepanjang tepi utara longsoran (yaitu, perpanjangan Zona A di barat batas ini). Berbeda dengan batas utara, sejumlah besar debris mengalir tidak jauh dari bukit kecil di batas selatan longsoran. Longsoran cenderung mengalir ke berbagai arah di bukit kecil (misalnya, barat, barat daya, dan barat laut) saat longsor-likuifaksi terjadi di bagian selatan dari zona, karena tidak ada topografi alami yang dapat mengalirkan ke semua arah. Endapan longsor-likuifaksi mengaburkan runtuhannya di sepanjang batas selatan. Perhatikan bagaimana runtuhannya berkembang (Zona A) yang meluas lebih jauh ke arah barat di batas utara dan tumpukan luncuran (Zona D) meluas lebih jauh ke timur di batas selatan longsoran. Pemahaman topografi sebelum gempa membantu rekonsiliasi pengamatan ini.



Gambar 3.14. Potongan-potongan melintang dan topografi pra-slide dan citra satelit pasca-gempa di Petobo.

3.1.3 Faktor yang berkontribusi dan hipotesis mekanisme longsor-likuifaksi Petobo

Data pra-gempa di lokasi longsor-likuifaksi di Petobo (mis. Peta topografi resolusi tinggi, tinggi muka air tanah, informasi pemantauan, dan kondisi bawah permukaan) terbatas, dan karenanya pengetahuan lengkap tentang kondisi yang tepat pada saat flowlide tidak akan pernah sepenuhnya diketahui. Dengan demikian, mekanisme yang tepat yang bertanggung jawab untuk inisiasi dan perkembangan flowlide dapat tidak diketahui dengan pasti. Namun demikian, data pengintaian dikumpulkan selama dan tak lama setelah gempa (termasuk pengamatan lapangan, pemetaan dan pencitraan, dan saksi mata) akun) memberikan wawasan yang signifikan untuk memicu dan mengurutkan flowlide. (Perhatikan bahwa sebagai bagian dari investigasi pasca-gempa, mitra-mitra Indonesia saat ini mengumpulkan permukaan bawah tanah informasi di dalam dan di dekat seluncuran; namun, data ini tetap tidak lengkap pada saat laporan ini Sudah ditulis). Berdasarkan data yang tersedia dan analisis yang dilakukan hingga saat ini, pengintaian tim investigasi telah mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi dan mekanisme hipotesis yang bertanggung jawab untuk inisiasi dan perkembangan gerakan arus Petobo. Interpretasi yang disajikan di bawah ini adalah berdasarkan: (i) pemahaman tim tentang kondisi pada saat gempa, (ii) langsung pengamatan yang dilakukan selama pengintaian, dan (iii) berbagai laporan saksi mata, antara lain sumber informasi. Temuan utama adalah sebagai berikut.

- a. Dipercayai bahwa longsor-likuifaksi dimulai dari dasar endapan aluvial fan yang berasal dari daerah yang lebih tinggi di pegunungan sekitarnya. Endapan ini terjadi berlapis lapis (dan mungkin diselingi dengan) endapan banjir sepanjang Sungai Palu (Gambar 2.4). Kondisi geologis tidak memiliki cukup energi, untuk memengaruhi pengendapan pasir dan lumpur yang lebih halus (diamati di pasir boil ejecta) dalam kondisi lepas (Youd dan Hoose, 1977) pada permukaan tanah yang miring.
- b. Berdasarkan wawancara dengan pejabat Departemen Pekerjaan Umum di kota Palu (dan dikuatkan oleh saksi mata), saluran irigasi hampir penuh pada saat gempa. Deskripsi ini didukung oleh keberadaan dan ketinggian rumput dan tumbuh-tumbuhan (di atas dasar) di sepanjang dinding saluran irigasi (misalnya Gambar 3. 7a). Bagian bawah dan dinding saluran utama tidak berpelindung di sepanjang batas timur lokasi longsor. Saluran irigasi yang tidak

berpelindung, dan kombinasi dengan koefisien permeabilitas yang besar dari endapan alluvial, akan memberikan kenaikan yang signifikan secara langsung pada muka air tanah di hilir (barat) saluran irigasi, berkontribusi terhadap saturasi dari endapan alluvial yang longgar. Saluran sekunder (memanjang dari saluran utama) yang dialirkan ke sawah/ladang yang terletak di sudut tenggara longsor-likuifaksi. Ini mungkin berkontribusi tambahan terhadap saturasi alluvium di daerah ini dan lebih jauh ke timur.

- c. Sand boil yang diamati di bagian atas dari longsor-likuifaksi memberikan bukti kuat likuifaksi yang diinduksi oleh gempa dan tegangan air pori yang meningkat di dalam endapan aluvial. Tekanan air pori berlebih yang dihasilkan secara siklik dalam sedimen jenuh yang longgar, mengurangi kekuatan dan kekakuan tanah, diyakini sebagai mekanisme utama mulainya longsor-likuifaksi
- d. Banyak saksi mata melaporkan bahwa mereka tidak melihat deformasi tanah (besar) sampai beberapa saat (berdasarkan urutan menit) setelah gempa mereda. Karena itu diketahui bahwa longsor-likuifaksi tidak mulai secara co-seismically (yaitu, bersama dengan guncangan tanah), tetapi terjadi secara *progresif* segera setelah gempa. Urutan, keruntuhan lereng dan aliran yang diinduksi likuifaksi, yang terkenal dalam literatur studi kasus geoteknik oleh (misalnya, Gu et al. 1993), telah dikaitkan dengan redistribusi tegangan hasil dari disipasi tegangan air pori berlebih (misalnya, Seed 1979).
- e. Longsor-aliran tampaknya telah dimulai di dekat atau dalam tanah yang miring (Gambar 3.4). Tanah miring memberikan tegangan geser statis in-situ (yaitu non-seismik) di dasar lereng tanah. Diketahui bahwa tegangan air pori yang diinduksi secara siklik akan dengan cepat menghasilkan (dalam tanah longgar) tegangan geser in-situ awal (Seed and Harder, 1990). Selain itu, dapat dipastikan bahwa longsor-aliran dapat terjadi apabila tegangan in situ melebihi kekuatan residu (likuifaksi) tanah (misalnya Boulanger 1990).
- f. Bersama-sama, temuan ini menunjukkan bahwa keruntuhan mungkin telah diinisiasi dari endapan aluvial yang lepas yang telah terisi air dari rembesan saluran irigasi yang tidak berpelindung (Zona B). Mekanisme keruntuhan awal kemungkinan oleh tegangan air pori yang diinduksi secara siklik, yang menyebabkan redistribusi tegangan karena disipasi tegangan pori segera

setelah gempa. Tanah yang miring akan memberikan tegangan geser in situ yang mungkin melebihi tegangan tanah yang mengalami likuifaksi, memicu timbulnya longsor-aliran. Ketika tanah mulai bergerak ke arah barat, wilayah ujung longsor yang terletak di lereng bawah mempunyai sedikit penopang atau tahanan, juga karena likuifaksi didekatnya (Zona B / C). Bersama-sama, massa tanah yang melunak ini telah bergabung menjadi massa cairan yang besar, yang menempuh jarak ratusan meter, dengan cepat menelan bagian bawah longsor-aliran (Zona D / E). Sifat umum massa yang terfluidisasi adalah indikasi respon tanah “tak terdrainasi”, yang terjadi oleh kandungan lanau pada endapan tersebut. Terlihat bahwa di beberapa bagian dari longsor-aliran, massa tanah membawa lapisan tipis yang terfluidisasi [pada urutan beberapa meter] “kerak” yang tidak jenuh dekat dengan permukaan). Karena longsor-aliran bergerak menurun, tanah yang curam tepat di bawah saluran irigasi telah runtuh, menghasilkan tarikan tanah ke arah timur, dan menyebabkan tanah runtuh dan rotasi balik blok tanah yang utuh di bagian atas daerah ini (Zona A).

3.2. Longsor-Likuifaksi di Jono Oge

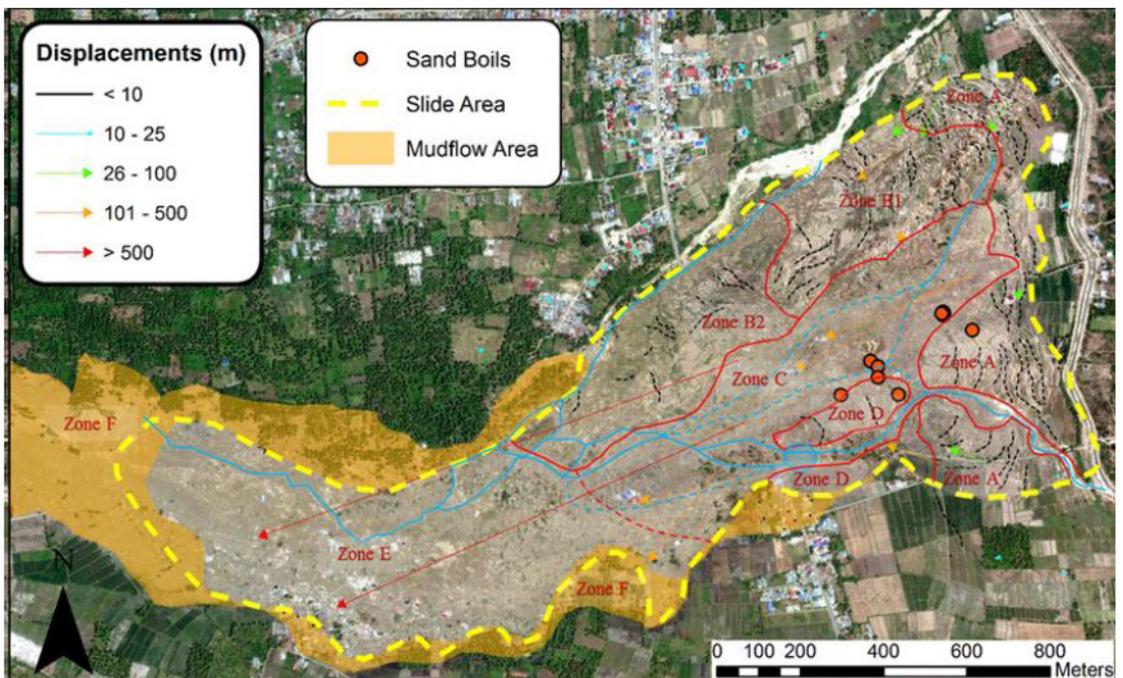
Tanah longsor Jono Oge terjadi di atas lokasi seluas 1,35 km², menjadikannya longsor-likuifaksi terbesar yang disebabkan oleh gempa. Panjang longsor memanjang lebih dari 2 km dari puncak longsor di dekat saluran irigasi Gumbasa, longsor meluncur dan diendapkan di sepanjang tepi barat daerah longsor. Longsor-likuifaksi juga menghancurkan jalan utama yang menghubungkan kota Palu dan Palopo, yang merupakan salah satu jalan utama di Sulawesi Tengah. Daerah tempat terjadinya longsor terutama adalah daerah pertanian, perumahan masyarakat luasnya kurang dari 5 persen. Kondisi area longsor di Jono Oge terganggu oleh runtuhnya saluran irigasi Gumbasa, yang terjadi di sudut tenggara di mana longsor memotong saluran (Gambar 3.15). Keruntuhan pintu air dan saluran irigasi menyebabkan air mengalir ke daerah longsor. Aliran yang cepat menyebabkan gerusan yang signifikan dalam area dan aliran lumpur yang mengalir ke Sungai Palu. Rincian dari kerusakan yang disebabkan oleh aliran longsor-likuifaksi dan aliran lumpur akan dibahas dalam bagian berikut ini.



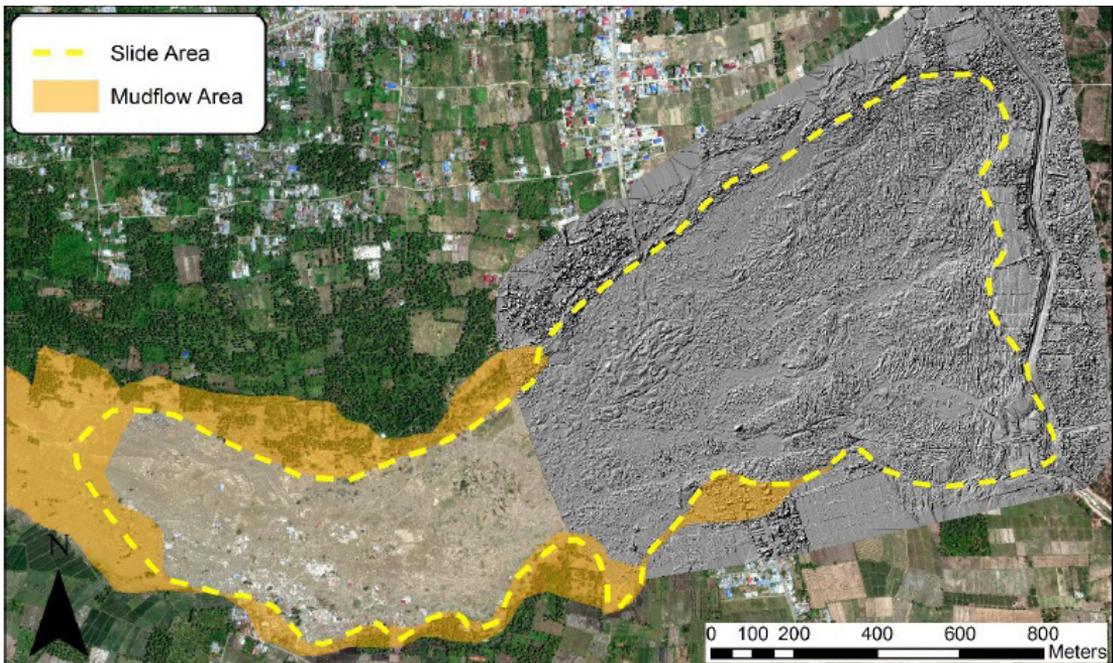
Gambar 3.15. Foto udara dari pintu air yang hancur dan titik longsoran diambil dengan drone.

Proses keruntuhan dan morfologi Jono Oge sebagian besar mirip dengan Petobo, dengan pengecualian pada keruntuhan saluran irigasi. Karena erosi dari keruntuhan itu terjadi pada area yang luas, investigasi dari Tim akan mengandalkan citra satelit sebelum dan sesudah gempa untuk memetakan pergeseran bangunan dan mengidentifikasi fitur morfologis (Gambar 3.16). Citra satelit dilengkapi dengan peta udara dan DEM resolusi tinggi yang dibuat dari penerbangan drone yang dilakukan oleh tim investigasi (Gambar 3.17). Gambar UAV segera setelah gempa terjadi tersedia dari BNPD dan digunakan untuk mengkonfirmasi lokasi bangunan pasca gempa. Area longsor dibagi menjadi lima zona (A hingga E), berdasarkan pola pergeseran dan fitur

morfologis. Zona keenam (F) ditambahkan untuk menggambarkan area yang tidak mengalami pergeseran yang signifikan, tetapi dibanjiri oleh endapan lumpur. Pergeseran yang terbesar terjadi pada bagian tengah dari longsor-likuifaksi (Gambar 3.16). Semua bangunan dalam zona ini semuanya hancur oleh gempa dan hanya dua bangunan dari bagian tengah luncuran (pasar unggas Patra dan gereja Pusdiklat GPID Patmos Jono Oge) yang dapat diidentifikasi dengan baik setelah gempa. Lokasi akhir Pasar Unggas Patra difoto oleh tim investigasi (Gambar 3.18a) dan lokasi akhir gereja diidentifikasi dengan membandingkan gambar satelit pasca gempa dengan foto-foto gambar gereja yang runtuh dari publikasi online (Gambar 3.18b). Lokasi pra-gempa bangunan ini ditentukan dengan menggunakan gambar Google Street View pada tanggal Desember 2015. Berdasarkan sumber-sumber ini, pergeseran dari pasar unggas diukur mencapai 1.230 meter sedangkan pergeseran gereja diukur mencapai 1.080 meter. Banyak bangunan lain yang berada di area yang sama kemungkinan mengalami pergeseran yang serupa besarnya, tetapi dalam kondisi yang terlalu rusak untuk diidentifikasi secara andal dengan citra pasca gempa.



Gambar 3.16. Peta Orthomosaic menunjukkan batas tanah longsor Jono Oge, lokasi sand boil, vektor pergeseran, dan zona dibatasi oleh fitur morfologis dan pengamatan utama.



Gambar 3.17. Model elevasi digital dan gambar relief berbayang drone yang menggambarkan fitur3D dari morfologis di wilayah timur longsoran.



Gambar 3.18. (a) Lokasi akhir Pasar Unggas Patra (-0,98786, 119,90844), yang tergeser sekitar 1.230 m; (b) lokasi akhir Pusdiklat GPID Patmos Jono Oge (-0.98942, 119.91007), yang tergeser sekitar 1.080 m (gambar dari Antara Foto 2018).

3.2.1 Observasi Lapangan dan Morfologi

Zone A – Puncak Longsoran dan Blok Blok Terputar Balik

Mirip dengan longsor di Petobo (dijelaskan di atas), Zona A di Jono Oge (Gambar 3.16) meliputi bagian puncak longsoran dari longsor-likuifaksi. Zona A terutama

berupa sawah (Gambar 3.19a) dengan sedikit bangunan rumah. Puncak longsoran membentang di sepanjang batas barat longsoran dan memotong saluran irigasi di banyak lokasi (Gambar 3.19b). Di perpotongan paling selatan dengan saluran irigasi, longsor menyebabkan pengaliran air yang besar (Gambar 3.15). Aliran air menyebabkan gerusan yang signifikan di dalam daerah longsor-likuifaksi dan aliran lumpur mempengaruhi komunitas di hilir, seperti telah dibahas sebelumnya. Pergeseran tanah menyebabkan kurangnya tagangan kekang pada sawah dekat saluran irigasi, yang mengarah pada pembentukan retakan memanjang dan blok terputar (Gambar 3.19c). Di sepanjang tepi selatan longsoran, blok terbentuk, tetapi ekstensi berkurang secara signifikan dari yang diamati di daerah lain di Zona A (Gambar 3.19d).



Gambar 3.19. Zona A: (a) Pemandangan sawah utuh dan lereng curam dari aliran longsor di Jono Oge (-0.98540, 119.92580); (b) perpotongan puncak longsoran dengan saluran irigasi (-0,98423, 119,92607); (c) pembentukan blok-blok yang terputar dan retakan ekstensional di area keruntuhan saluran irigasi (perhatikan pasir diendapkan oleh banjir berikutnya; -0,98478, 119,92423); (d) kerusakan jalan di sepanjang batas tepi selatan longsor-likuifaksi (0.98623, 119.92383).

Zona B - Blok yang Tertarik Secara Lateral, Terputar, dan Terapung

Zona B terletak di sisi utara dari aliran longsor-likuifaksi dan terdiri dari banyak blok-blok rakit, yang bergeser ke daerah keruntuhan setelah jalan Palu-Palopo dan banyak bangunan yang sebelumnya terletak di daerah ini tergeser oleh longsor-likuifaksi. Blok di Zona B kurang koheren daripada yang ada di Zona A (Gambar 3.20) karena pergeseran yang jauh lebih besar terjadi di dalam Zona B. Zona B juga terkena dampak aliran sungai yang membentang di sepanjang sisi utara area keruntuhan. Zona B1 dapat dibedakan dari Zona B2 terutama dari koherensi blok yang tersisa. Pergerakan di dalam Zona B1 tampaknya lebih kecil dari Zona B2, dan Zona B1 kurang terpengaruh oleh aliran sungai. Kedua faktor tersebut menyebabkan kondisi blok-blok di zona B1 lebih baik.

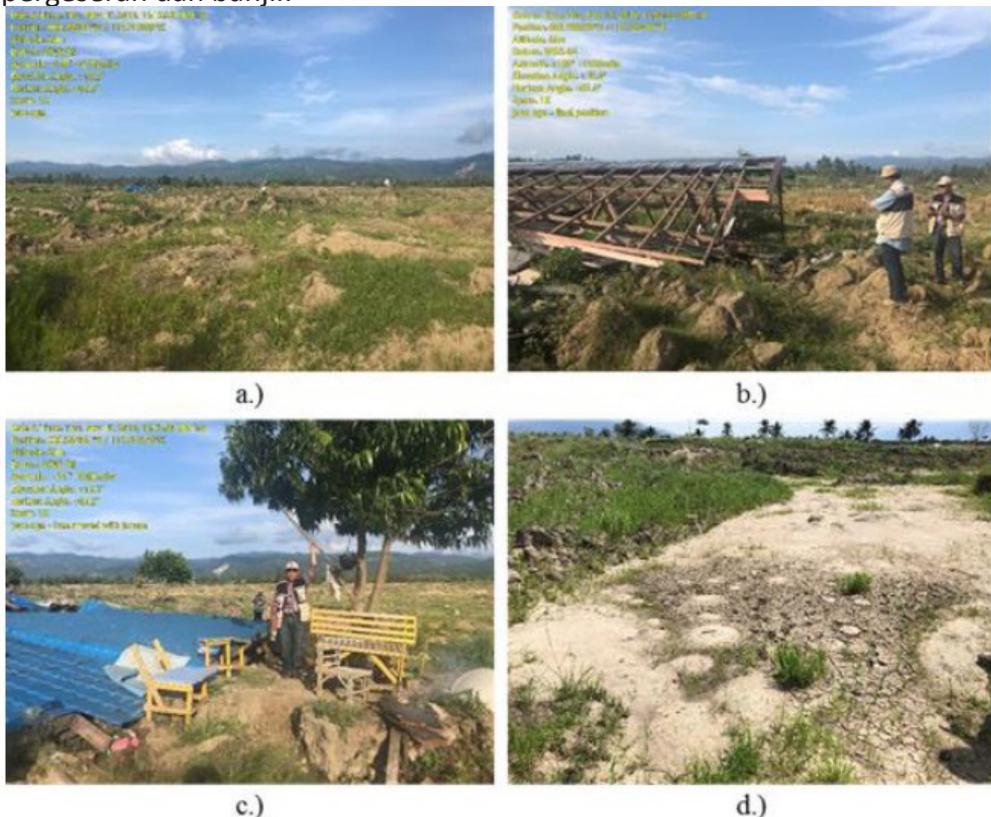


Gambar 3.20. Zona B: Zona B terdiri dari blok rakit yang bergerak ke area keruntuhan utama setelah tanah di daerah ini tergeser (-0.98211, 119.91760).

Zona C - Daerah Keruntuhan, Banjir, Gerusan dan Erosi

Zona C adalah lokasi keruntuhan utama longsor-likuifaksi dan lokasi di mana gerusan dan erosi terjadi. Arah luncuran debris utama adalah ke barat daya. Zona C dibatasi oleh Zona A di sebelah timur, Zona B di sebelah utara dan Zona D di sebelah

selatan. Zona C adalah zona transisi ke Zona E, yang berisi blok tertekan dan deposit debris dari runtuh. Lokasi tepat transisi tidak diketahui, karena banyak kondisi di Zona C telah terganggu oleh banjir dari runtuhnya saluran irigasi. Zona C terdiri dari elevasi terendah dalam daerah longsor-likuifaksi dan di bagian tengah sangat basah oleh rembesan air tanah dan aliran sungai di sepanjang sisi utara longsor (Gambar 3. 21a). Blok didalam Zona C umumnya kecil dan telah mengalami runtuh berulang oleh pergeseran dan banjir.



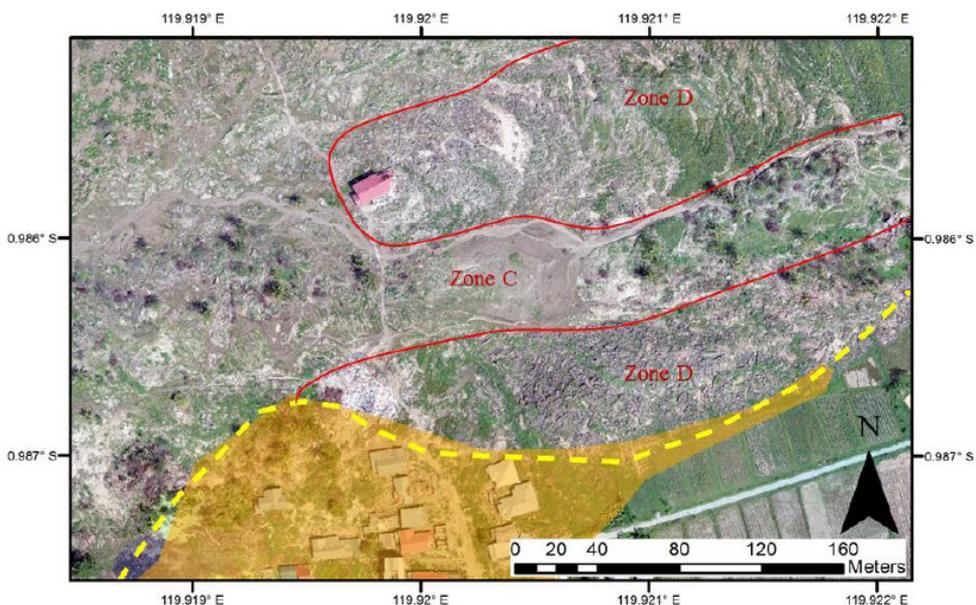
Gambar 3.21. Zona C: (a) Sebagian besar Zona C berada di dataran rendah dan daerah di antara blok seringkali jenuh (-0.98539, 119.91938); (b) bangunan runtuh terletak di Zona C (-0,98364, 119,92071). Atap logam runth setelah gempa; (c) bangunan dan pohon yang tergeser, yang telah tergeser sekitar 470 meter pada blok yang relatif utuh (-0,98436, 119,91995); (d) gugusan sand boil di antara dua blok (-0.98410, 119.92163). Perhatikan pena di salah satu sand boil di latar depan panjangnya sekitar 15 cm.

Beberapa bangunan yang rusak terletak di dalam Zona C (Gambar 3.21b). Bangunan tergeser diatas blok rakit yang relatif utuh. Dalam beberapa kasus, pohon yang berada di sebelah bangunan sebelum longsor tetap tegak dan di lokasi yang sama relatif terhadap bangunan di lokasi perpindahan (Gambar 3.21c). Banjir telah

membuat sulit saat dilakukan pemetaan pergeseran bangunan secara individu, tetapi enam bangunan di dalam area ini dapat diidentifikasi sebelum dan sesudah gempa dari gambar satelit. Pergeseran bangunan berkisar dari sekitar 270 meter di bagian selatan longsor-likuifaksi hingga lebih dari 1.200 meter di bagian tengah (Gambar 3.21a). Bangunan yang ditunjukkan pada Gambar 3.21c diperkirakan telah bergeser sekitar 470 meter.

Sand boil ditemukan di dekat bagian tengah Zona C (Gambar 3.21d). Sand boil umumnya mempunyai diameter kurang dari 30 cm dan bahan dalam likuifaksi pada dasarnya adalah pasir halus. Semua sand boil terletak di daerah datar di antara blok rakit, mirip dengan di Petobo, yang menunjukkan bahwa tegangan air pori yang naik dan likuifaksi dibatasi oleh kedalaman. Kebanyakan daerah dataran rendah telah dipengaruhi oleh air dari runtuhnya saluran irigasi, yang mungkin telah menghilangkan bukti adanya sand boil lainnya.

Meskipun zona longsor-likuifaksi utama terjadi di tengah-tengah longsor, zona keruntuhan sekunder berada di sisi selatan longsor di tengah Zona D (Gambar 3.22). Video yang diambil selama longsor-likuifaksi menunjukkan bahwa rumah yang sebelumnya terletak di area Zona C ini masih berada di lokasi aslinya sementara runtuh awal bergerak (Gambar 3. 23). Rumah-rumah terukur bergerak sekitar 330 meter (Gambar 3.16).



Gambar 3.22. Citra drone dari zona runtuh sekunder di sepanjang tepi selatan longsor di Jono Oge.



Gambar 3.23. Cuplikan layar video yang direkam selama longsor awal. Orang yang merekam video berdiri di atap gedung, yang bergerak. Rumah beratap merah di video tidak bergerak dan terletak di $-0.98579, 119.91965$. Bangunan di belakang rumah beratap merah belum tergeser pada saat video direkam, tetapi kemudian tergeser oleh keruntuhan sekunder.

Zona D – Blok Blok yang Tertarik secara Lateral, Terputar, dan Blok Rakit

Zona D mirip dengan Zona B1 karena sebagian besar terdiri dari blok yang terputar dan blok rakit yang dapat bergerak jauh dari awalnya (Zona A). Gerakan awal di Zona D terutama ke barat laut, tetapi karena keruntuhan sekunder seperti yang dibahas sebelumnya mengubah pola pergeseran. Zona D dibedakan dari Zona C karena pergeserannya yang lebih kecil dan blok-blok di dalam Zona D masih dalam kondisi baik (Gambar 3.24a). Pergeseran satu bangunan diukur dalam zona ini sekitar 130 meter. Beberapa sand boil terlihat di antara blok di sudut timur laut Zona D (Gambar 3.24b). Sand boil ini lebih kecil dari yang ditemukan di Zona C.

Salah satu fitur unik dalam Zone D adalah rumah beratap merah yang tidak bergerak selama longsor-likuifaksi (Gambar 3.24c). Ini adalah satu-satunya bangunan di dalam area aliran longsor yang tidak bergerak. Luncuran longsor memang menyebabkan kerusakan yang signifikan pada rumah tersebut (Gambar 3.24d). Tanda bekas genangan di sisi rumah menunjukkan bahwa kedalaman air saat meluncur lebih dari 2,5 meter (diukur dari permukaan tanah terakhir ke atas tanda air) ketika debris bergerak bersama rumah tersebut. Rumah itu tampaknya memiliki lapisan pondasi yang kuat (Gambar 3. 24d) yang kira-kira setebal 65 cm, terlihat di atas permukaan

tanah pada kondisi terakhir. Tim GEER tidak mengetahui seberapa tebal aktual pondasi bangunan itu di bawah permukaan tanah.



Gambar 3.24. Zona D: (a) Pohon di antara dua blok sawah utuh (-0.98554, 119.22403); (b) sand boil kecil di daerah dataran rendah di antara blok (-0,98483, 119,92223); (c) tampilan rumah beratap merah yang menghadap ke timur laut (-0.98595, 119.91951); (d) kerusakan pada sisi rumah beratap merah dari arah barat daya (-0.98566, 119.91973). Orang di foto itu sekitar 1,87 tinggi meter.

Zone E - Blok Kompresi, Aliran Debris, Luncuran Debris

Zona E meliputi bagian pengendapan dari aliran debris di Jono Oge. Transisi dari Zona C dengan Zona E dalam kondisi tererosi oleh banjir, sehingga transisi ditentukan berdasarkan lokasi debris di ujung timur dari Zona C. Demikian pula, transisi dari Zona E ke Zona F (deposit aliran lumpur) tidak pasti, dan batas yang ditunjukkan dalam Gambar 3.16 ditentukan berdasarkan lokasi paling barat dari timbunan debris yang besar. Secara morfologis fitur Zona E tidak dipelajari secara rinci karena luasnya area dan erosi dari longsor-likuifaksi dan aliran lumpur.

Tim GEER mengunjungi komunitas yang terletak di dekat tepi barat Zone E. Di area ini, tim GEER mengamati bangunan yang rusak parah akibat luncuran debris (Gambar 3.25a dan b) dan bangunan yang telah tergeser saat luncuran debris (Gambar 3.25c). Tanda tinggi aliran lumpur pada sisi bangunan di daerah ini sekitar 1 meter (Gambar 3.25a ; diukur di atas elevasi permukaan tanah). Bangunan yang ditunjukkan pada Gambar 3. 25c adalah pasar yang sebelumnya terletak di pinggir jalan Palu-Palopo yang berada di pusat luncuran debris. Lokasi terakhir setelah longsor-likuifaksi adalah lebih dari 1.200 meter dari posisi awalnya (Gambar 3.18a), mewakili pergeseran yang terbesar dari longsor-likuifaksi. Percikan lumpur bisa dilihat di sisi bangunan, diyakini telah terjadi banjir berikutnya melewati daerah ini. Debris dari bangunan yang tergeser lainnya berada di seluruh area Zona E ini (Gambar 3.25d).



a.)



b.)



c.)

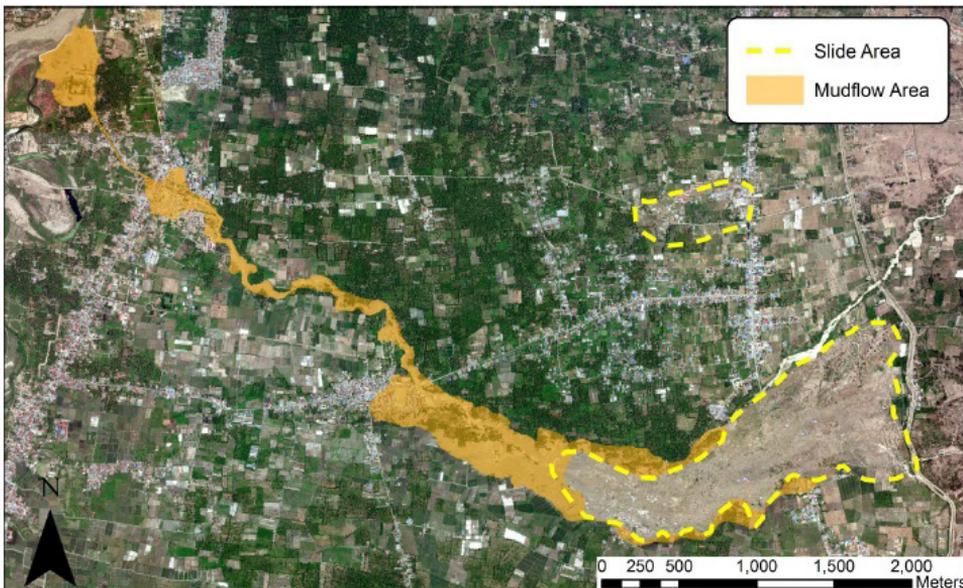


d.)

Gambar 3.25. Zona E: (a) Bangunan yang rusak oleh luncuran longsor-likuifaksi (-0.98898, 119.90891); (b) Bangunan yang ada dikelilingi olehdebris dan tanah yang diendapkan oleh longsor-likuifaksi di Jono Oge (-0.98985, 119.90922); (c) Kendaraan yang rusak oleh luncuran debris (-0.98838, 119.90895); (d) debris, blok rakit dan pohon-pohon di dalam area pengendapan longsor-likuifaksi (-0.98893, 119.90881).

Zone F - Deposit Aliran Lumpur

Setelah longsor-likuifaksi terjadi di Jono Oge, saluran irigasi runtuh di sudut tenggara longsor, menjadikan banjir air dari saluran irigasi Gumbasa melalui area yang mengalami keruntuhan. Banjir air mengikis sejumlah besar material longsor dan menciptakan aliran lumpur yang mengalir ke Sungai Palu (lebih dari enam kilometer dari lokasi longsor). Besarnya aliran lumpur relatif terhadap area longsor-likuifaksi ditunjukkan pada Gambar 3.26. Aliran lumpur membanjiri banyak komunitas sepanjang yang yang dilalui, yang tidak rusak oleh longsor-likuifaksi (Gambar 3. 27a). Lumpur terutama mengikuti alur sungai yang membentang di sepanjang tepi utara longsor (Gambar 3.27b). Dalam dua lokasi, alur sungai dilintasi jembatan (Gambar 3. 27c), yang menyebabkan aliran lumpur berbelok, dan membanjiri komunitas disekitarnya (Gambar 3.27d).



Gambar 3.26. Perkiraan tingkat luapan lumpur yang disebabkan olehruntuhnya saluran irigasi Gumbasa di Jono Oge.

3.2.2 Kesaksian dari Saksi Mata

Interpretasi tim GEER tentang mekanisme longsor-likuifaksi dan waktu keruntuhan didasarkan pada wawancara dengan saksi mata dan rekaman video dari longsor-likuifaksi. Ada dua saksi mata yang diwawancarai dan keduanya menggambarkan longsor-likuifaksi dimulai segera setelah gempa berhenti. Para saksi

juga menggambarkan keruntuhan tersebut yang dimulai di sisi timur jalan Palu-Palopo dan kemudian berkembang ke arah saluran irigasi Gumbasa. Aliran air dari saluran irigasi tidak mencapai ujung bawah area longsor saat gempa berhenti. Video yang paling membantu direkam oleh seseorang yang mengalami longsor-likuifaksi sambil berdiri di atap bangunan (<https://youtu.be/c4sZlz8GuMI>; yang diakses pada tanggal 1 April 2019). Orang yang merekam video sedang bergerak bersama dengan luncuran longsor-likuifaksi dan rumah beratap merah yang terlihat di awal video dalam keadaan diam. Kecepatan longsor-likuifaksi cukup lambat sehingga orang yang merekam video dapat berdiri dan memegang telepon dengan mantap. Video kedua muncul untuk menunjukkan inisiasi longsor-likuifaksi (<https://www.facebook.com/slamet.moeljono.75/videos/vb.100025552757715/243309053197518/?Type=2&teater>; yang juga diakses tanggal 1 April 2019).



Gambar 3.27. (a) Endapan lumpur memenuhi jalan-jalan, tetapi meninggalkan bangunan yang tidak rusak di dekat batas longsr-likuifaksi (-0.99025, 119.90926); (b) endapan lumpur dalam alur sungai (-0.98440, 119.90143); (c) endapan lumpur keluar dari alur sungai dan membanjiri masyarakat sekitar setelah mencapai jembatan (-0,98279, 119,89848); (d) ketinggian aliran lumpur di salah satu rumah di dekat jembatan (-0,98253, 119.89817). Orang di foto itu tingginya sekitar 1,75 meter.

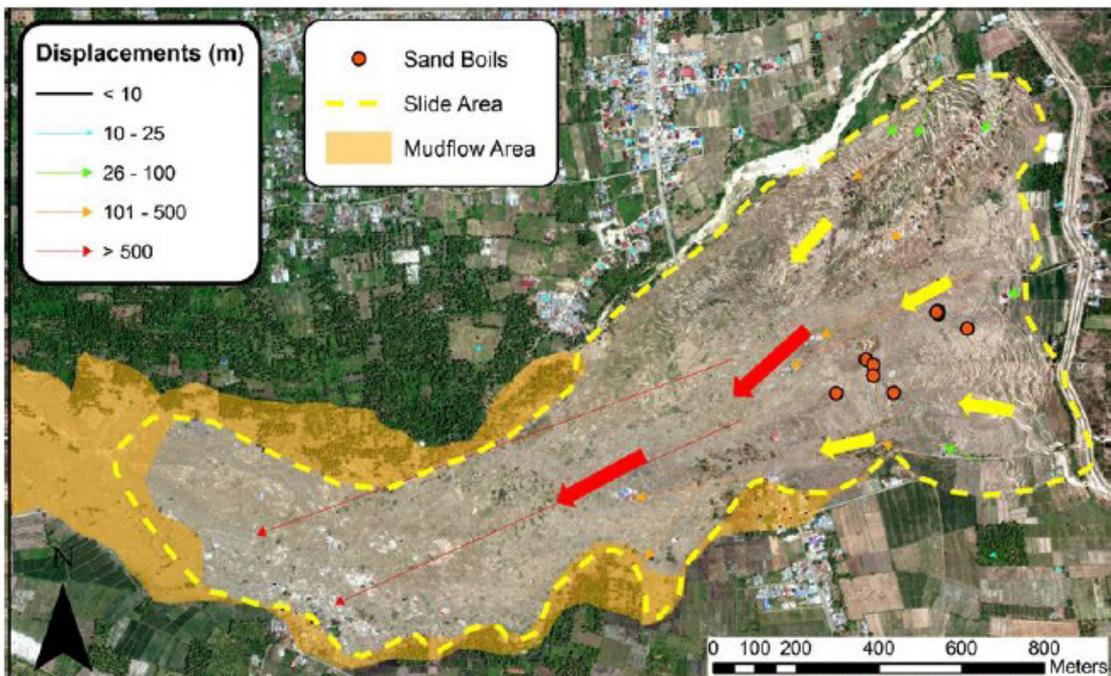
Ketika video direkam orang tersebut berdiri di seberang jalan di depan lokasi asli Pasar Unggas Patra (-0.98424, 119.91858). Jalan terlihat telah retak pada awal video dan tampaknya guncangan gempa telah berhenti, meskipun tidak diketahui berapa lama setelah gempa, rekaman ini dimulai. Sekitar 17 detik setelah merekam, orang yang merekam video mulai lari dan terdengar jeritan, bersama dengan terdengarnya suara yang keras suara lain yang bermunculan. Ini diyakini sebagai inisiasi keruntuhan di daerah ini. Upaya untuk mencari pembuat video tidak berhasil.

Salah satu saksi mata yang diwawancarai oleh tim investigasi sedang bekerja di ladang dekat lereng tepi timur yang longsor ketika gempa terjadi. Dia mengamati pohon bergerak dan retakan mulai terjadi pada lapangan yang membentang dari utara ke selatan. Dia bisa lari ke rumah putranya (lokasi terakhir ditunjukkan pada Gambar 3.21c), yang rumahnya tidak bergerak atau runtuh selama guncangan gempa. Dia kemudian melihat pohon kelapa mulai bergerak mendekati jalan Palu-Palopo dan kemudian rumah putranya mulai bergeser secara perlahan. Dia mendengar suara yang keras saat pergeseran dimulai, yang kemungkinan berasal dari runtuhnya saluran irigasi Gumbasa. Saksi kedua yang tinggal di dekat jalan Palu-Palopo menyatakan dia berdiri diatas rerimbunan pohon pisang yang meluncur seperti rakit bersama dengan sepuluh orang lainnya. Semua orang di rakit pohon pisang tersebut selamat dari longsor-likuifaksi, kecuali satu anggota keluarganya yang tersapu oleh luncuran lumpur. Aliran air masih terus berlanjut selama tiga jam setelah semua pergeseran berhenti.

3.2.3 Interpretasi dan Hipotesis Perkembangan Mekanisme Longsor

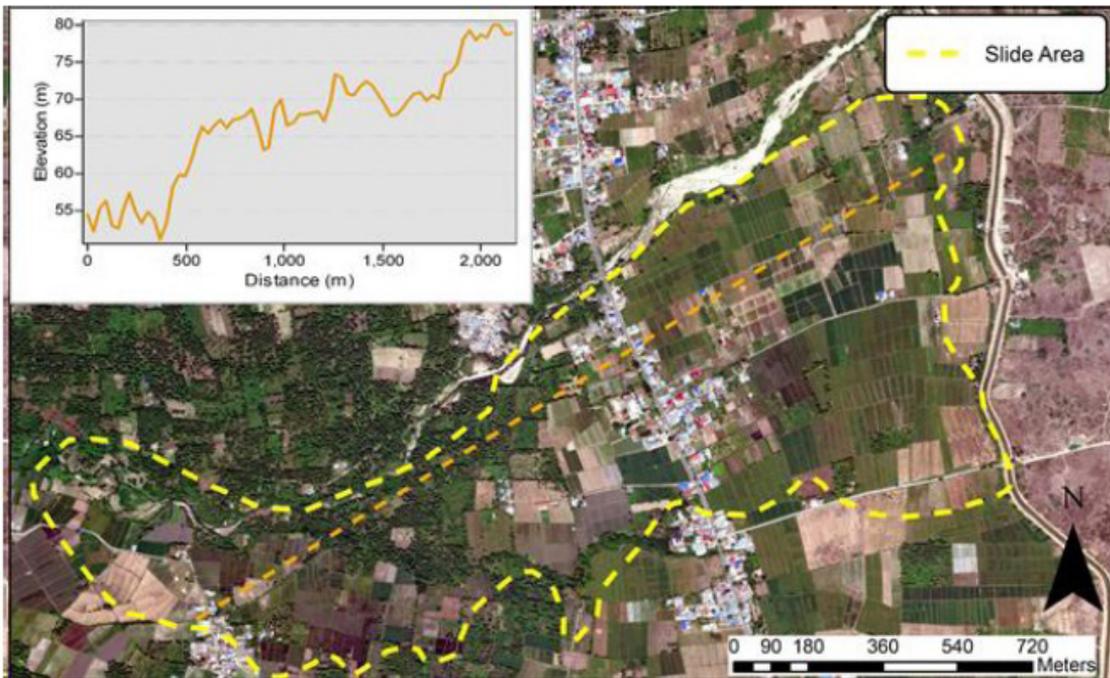
Tafsiran perkembangan longsor-likuifaksi di Jono Oge ditunjukkan pada Gambar 3.28. Kesaksian dari saksi mata dan rekaman video menunjukkan bahwa longsor dimulai di suatu tempat di bagian timur Zona C setelah gempa berhenti (ditunjukkan dengan panah merah pada Gambar 3.28). Longsor kemudian berkembang ke barat daya sebelum menumpuk debris di sepanjang sudut barat daya area longsor-likuifaksi. Arah luncuran debris ditentukan oleh kondisi topografi (Gambar 3.29), yang mendorong luncuran ke arah selatan. Luncuran debris berhenti ketika topografi menjadi rata. Setelah pergeseran awal dimulai, daerah disekitarnya kehilangan tegangan kekang dan mulai bergerak menuju ke zona yang telah ditinggalkan pada awal keruntuhan. Pergeseran sekunder ini ditunjukkan dengan panah kuning di Gambar 3.28. Longsor progresif akhirnya mencapai saluran irigasi dan memulai terjadinya

keruntuhan. Satu area di mana perkembangannya tidak jelas adalah di sepanjang tepi selatan longsoran dekat rumah beratap merah (Gambar 3.22). Rekaman video (Gambar 3.23) menunjukkan bahwa area ini runtuh setelah pergeseran awal terjadi, tetapi tidak jelas apakah ini hanya bagian dari kegagalan progresif yang terjadi di tepi timur area longsoran atau merupakan keruntuhan sekunder yang terjadi setelah longsor pada saluran irigasi. Gerusan air dari saluran irigasi menggerus fitur morfologis di daerah ini, sehingga urutan kejadian sulit diketahui.



Gambar 3.28. Tafsirkan perkembangan longsoran aliran di Jono Oge. Panah merah besar menunjukkan gerakan awal, sedangkan panah kuning menunjukkan gerakan sekunder.

Hipotesis mekanisme longsoran likuifaksi di Jono Oge sama dengan yang dijelaskan sebelumnya di Petobo. Sand bol diamati terdapat di daerah dataran rendah di lokasi, yang menunjukkan likuifaksi terjadi pada kedalaman tertentu dan sand boil terbentuk ketika material di atasnya telah hanyut oleh luncuran debris. Likuifaksi diyakini sebagai pemicu utama terjadinya longsoran aliran. Inisiasi dari longsoran-likuifaksi itu sendiri tampaknya telah dipicu oleh medan yang secara lokal lebih curam (Gambar 3.29) dan berhentinya longsoran aliran terjadi di mana topografi menjadi relatif datar.



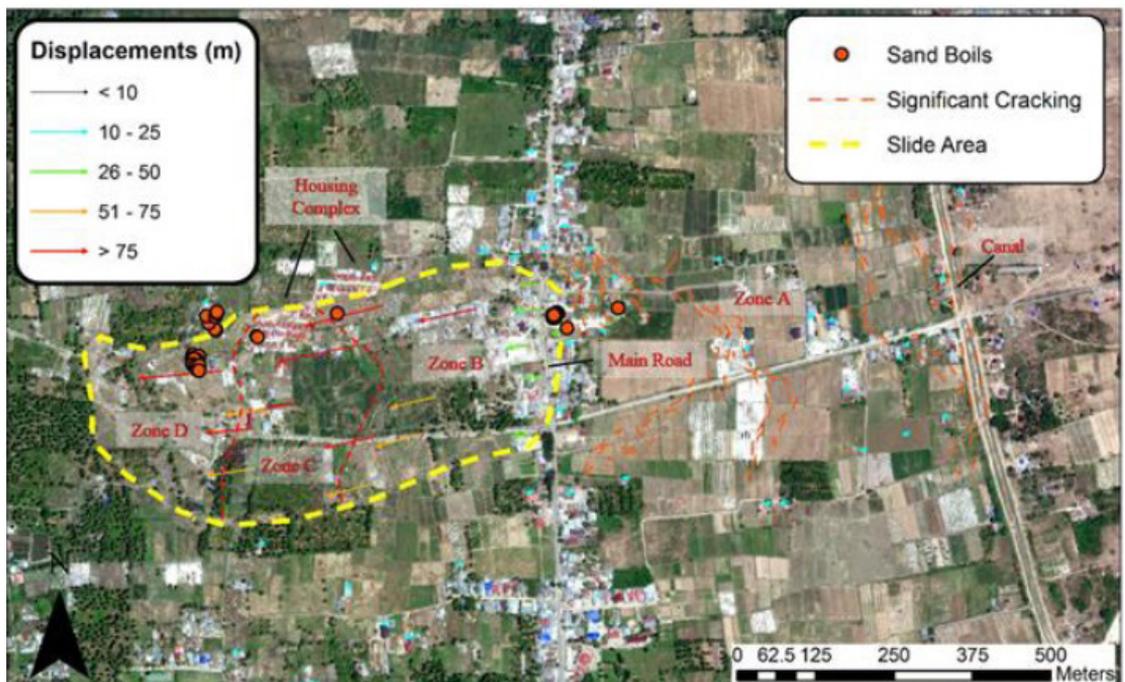
Gambar 3.29. Profil aliran gempa Jono Oge sebelum gempa.

Fitur lain di Jono Oge adalah runtuhnya saluran irigasi dan aliran lumpur setelahnya. Aliran lumpur tersebut menyebabkan kerusakan lebih lanjut di daerah yang telah terkena longsor aliran dan menggenangi masyarakat awalnya tidak terpengaruh oleh longsor aliran. Keruntuhan saluran irigasi memiliki pengaruh yang sangat besar di Jono Oge, karena merupakan longsor yang terjadi pada lokasi paling selatan dari saluran irigasi sehingga volume air yang masuk ke dalam daerah longsor lebih besar dibandingkan dengan di Petobo.

3.3. Longsor di Desa Lolu

Desa Lolu adalah lokasi dari longsor-likuifaksi yang ditandai oleh pergeseran tanah yang lebih kecil dengan tingkat kerusakannya secara geomorfik yang lebih rendah dibandingkan dengan Petobo dan Jono Oge. Kerusakan yang terjadi memengaruhi 0,22 km² dan membentang 750 m dari jalan utama ke batas luncuran yang menumpuk di tepi barat longsor (Gambar 3.30). Meskipun pergeseran lebih kecil, deformasi tanah di beberapa tempat masih sebesar 150 m (Gambar 3.30). Pergeseran terbesar terjadi di bawah jalan utama sekitar 650 m arah menurun dari saluran irigasi, meskipun ekstensi

lateral tanah dan kerusakan parsial terjadi di atas jalan dan berkembang hingga ke saluran irigasi. Selain dari perbaikan pada jalan utama, yang tidak bisa dilewati setelah gempa, ekspresi geomorfologi masih terlihat, termasuk bukti peningkatan tegangan air pori dan likuifaksi yang terjadi dengan ditemukannya sand boil yang didokumentasikan di seluruh lokasi.

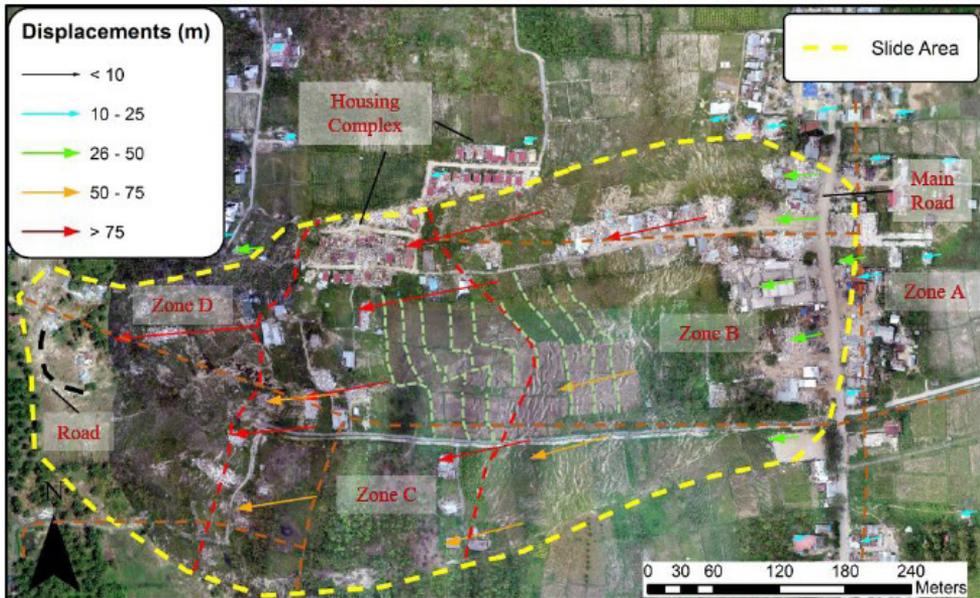


Gambar 3.30. Peta Orthomosaic dengan lokasi sand boil dan vektor pergeseran di Desa Lolu.

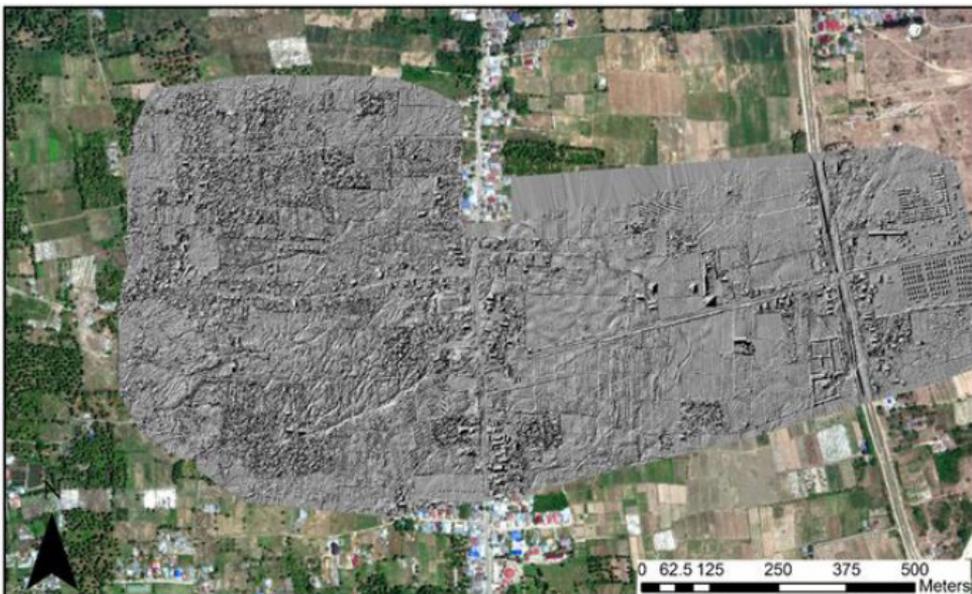
3.3.1 Observasi Lapangan dan Morfologi

Berbeda dengan longsor-likuifaksi di Petobo dan Jono Oge, pergeseran tanah di Desa Lolu bukan hasil dari longsor dalam, erosi yang signifikan, dan luncuran rotasi dari debris. Kondisi yang relatif utuh di dalam lokasi longsor-likuifaksi adalah hal yang unik yang ditemukan tim investigasi. Bagian hilir longsor-likuifaksi (barat jalan utama), di mana pergeseran terbesar terjadi, lebih mudah digambarkan dengan zona atau pergeseran relatif, pengamatan pola deformasi, rusak geser, dan lapisan ekstensi yang terlihat (Gambar 3.31). Sifat unik dari massa tanah yang relatif utuh di Desa Lolu membantu interpretasi pola deformasi dan rotasi massa tanah. Citra satelit sebelum dan sesudah gempa dan model elevasi digital (DEM) yang diproses dari data drone (Gambar 3.32) yang dikumpulkan oleh Tim GEER membantu interpretasi fitur

morfologis dan penggambaran zona dalam diskusi ini. Zona A adalah daerah di atas (timur) jalan utama hingga saluran irigasi sementara Zona B sampai D berada di sebelah bawah (barat) jalan utama.



Gambar 3.31. Peta Orthomosaic di lokasi longsor bagian bawah yang mengindikasikan vektor pergeseran. Juga ditampilkan pola deformasi massa tanah di dekat pusat longsor (garis hijau (putus-putus)) dan lokasi jalan sebelumnya (garis putus-putus coklat).



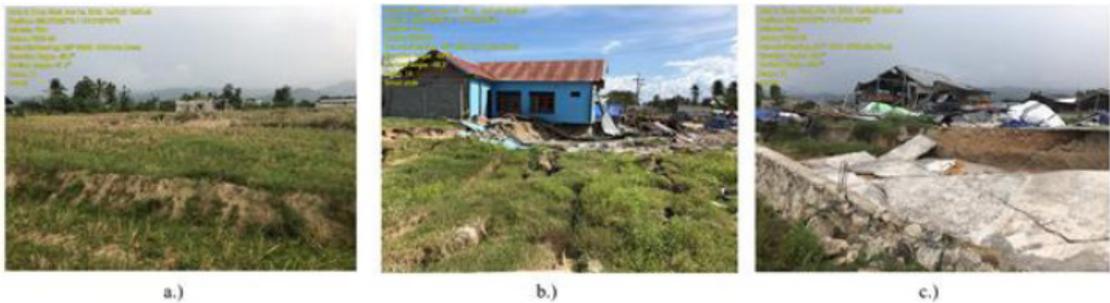
Gambar 3.32. Model elevasi digital yang diperoleh dari Drone yang menggambarkan fitur morfologi 3D di Lolu Desa.

Zona A: Pergeseran Lateral Tanah dan Pengembangan Parsial Longsor (Sebelah Timur dari Jalan Utama ke Saluran irigasi)

Daerah sebelah timur jalan utama sebagian besar terdiri dari retakan besar yang tersebar sampai saluran irigasi (Gambar 3.32). Tidak seperti di Petobo dan Jone Oge, longsor-likuifaksi tidak mengakibatkan hilangnya seluruh tegangan kekang dan runtuhnya dinding saluran, meskipun keretakan yang signifikan pada saluran telah didokumentasikan (Gambar 3.33a, b). Sebuah pintu air yang terletak di persimpangan jalan akses masih tetap utuh (Gambar 3.33c). Retakan lateral memanjang juga ditemukan di seluruh lahan pertanian antara jalan utama dan saluran irigasi (Gambar 3.34a). Dislokasi vertikal tanah yang bergerak secara lateral dan perkembangan longsor parsial yang lebih jelas terdapat di dekat batas barat Zona A, di mana serangkaian imbas longsor permukaan terlihat di dekat jalan utama (Gambar 3.34b, c). Namun, pergeseran arah menurun tidak cukup kuat untuk menghilangkan tegangan kekang yang menghasilkan individual blok besar yang terputar-balik untuk membentuk ekspresi geomorfik seperti yang terjadi pada longsor-likuifaksi di Petobo dan Jono Oge. Dokumentasi sand boil di dekat jalan utama juga memberikan bukti tegangan air pori yang tinggi di lokasi ini (Gambar 3.35).



Gambar 3.33. a.) Tampak atas retakan di saluran irigasi; b.) retak di saluran irigasi (-0.96974, 119.92249); c.) pintu air yang masih utuh (-0.970496, 119.922598).



Gambar 3.34. a.) Ekstensi lateral tanah di (timur) jalan utama (-0.970407, 119.918776); b.) kerusakan pada bangunan perumahan dan tanah yang menyebar secara lateral di dekat jalan utama (-0.970327, 119.916775); c.) kerusakan pada struktur perumahan dan pengembangan parsial longsor dekat utama jalan (-0.971073, 119.919248).



Gambar 3.35. Sand boil di antara tanah yang berpecah secara lateral di (timur) jalan utama (-0.970349, 119.916787).

Zona B: Massa Tanah yang Tertarik Secara Lateral

Di bawah jalan utama, terlihat dari citra satelit terjadi lapisan transversal yang memanjang di antara tanah setelah gempa (Gambar 3.31). Tarikan blok dan lebar bagian yang tertekan antara blok umumnya lebih besar dari tanah yang trangkit, dan dikenali dari foto udara dengan berkurangnya kepadatan vegetasi. Pengamatan sebelumnya digunakan untuk menggambarkan Zona A dan B. Di batas timur Zona B

(dekat jalan utama) sebuah pompa bensin di Desa Lolu tergeser ke barat dan rusak parah, menyebabkan retak dan terpisahnya perkerasan beton (Gambar 3.36). Arah ke barat (turunan), bangunan-bangunan mengalami pergeseran yang lebih besar dan sebagian atau seluruhnya runtuh (Gambar 3.37). Pengamatan sebelumnya penting, karena mendukung kesimpulan bahwa tanah bergerak lateral dan meluas ke bagian barat Zona B. Pemetaan pergeseran tanah menguatkan hal ini (Gambar 3.31).



Gambar 3.36. Pompa bensin yang rusak di sisi barat jalan utama: a.) Tampak pompa bensin (-0.970627, 119.916465); b.) pergeseran dan retak pada perkerasan beton (-0.970753, 119.916406).



Gambar 3.37. Struktur yang rusak di Zona B: a.) Tanah yang tertarik ke samping dan rumah yang runtuh (0.97051, 119.91515); b.) masjid yang sebagian runtuh dan jalan akses yang sudah diperbaiki (-0.97050, 119.91492); c.) bangunan yang runtuh dan blok rakit di latar depan (-0.97037, 119.91531).

Tim GEER menghabiskan banyak waktu untuk menyelidiki wilayah utara Zona B dekat kompleks perumahan yang tergeser. Pemisahan penuh dan pergeseran blok individu dan gundukan diamati dan didokumentasikan dengan arah menanjak dari kompleks (Gambar 3.38a). Debris meluncur ke arah barat (menurun) dari kompleks

perumahan, di mana blok mengalami pergeseran dan mengalami kehancuran yang lebih parah dari blok di bagian hulu (misal .Gambar 3.38b). Di luar timbunan puing debris adalah daerah yang relatif datar yang terdegradasi, yang meluas sampai kompleks perumahan yang tergeser didekat batas barat Zona B. Sand boil yang tersisa didokumentasikan di dekat batas luncuran debris (Gambar 3.38c). Ejecta terdiri dari pasir halus dan bersih, mirip dengan material yang dikeluarkan dari sand boil yang didokumentasikan di Zona C dan D. Namun, sand boil tampaknya sebagian telah terkikis, sebagian tererosi kemungkinan oleh karena rembesan dan aliran lumpur yang terjadi setelah gempa. Dari pengamatan sebelumnya, dikombinasikan dengan tingkat kehancuran geomorfik yang lebih besar di wilayah ini, mendukung hipotesis bahwa sedimen pada dasar lokasi ini berfungsi sebagai lapisan terfluidisasi dimana kompleks perumahan dapat hanyut.



Gambar 3.38. Area menanjak dan berdekatan dengan kompleks perumahan yang tergeser: a.) Memanjang ke samping dan sebagian blok dan gundukan hancur di lapangan di atas kompleks perumahan (-0,97000, 119,91361); b.) luasnya aliran debris yang hancur dan rakit pohon di dekat batas Zona B dan C (-0.97034, 119.91374); c.) mendidih sebagian sand boil dekat batas tumpukan debris di Zona B (-0.97030, 119.91360).

Zona C : Lokasi Blok Rakit Terekani, Terputar, dan Tergeser (Pergeseran Kompleks Perumahan)

Zona C adalah area yang relatif "utuh" di pusat jejak longsoran di mana sebagian besar pergeseran diamati. Zona C berbeda dengan Zona B yang lebih sedikit lapisan tanah yang tertarik, dan lebih sedikit terlihat lapisan yang terlipat, dan dari Zona D yang mempunyai tingkat kehancuran permukaan yang lebih rendah (Gambar 3.31). Zona C tampaknya telah meluncur di atas sedimen yang terlikuifaksi, di mana punggungan terkompresi dan fitur yang terangkat di batas barat Zone terhambat oleh tumpukan debris (Zona D) saat arus longsor berlangsung. Pergeseran yang lebih besar diamati di bagian utara dari zona ini, hasil keruntuhan geser dan ekstensi awal di dekat pusat

Zona, sehingga kompresi dan rotasi selanjutnya dari massa tanah terhenti. Mungkin bukti paling meyakinkan yang mendukung hipotesis urutan peristiwa ini adalah pola deformasi daerah pertanian di daerah ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.31.

Bukti yang paling menonjol dari keruntuhan geser di sepanjang batas utara adalah pergeseran sebuah kompleks perumahan, di mana sebagian rumah seperti bergeser diatas rakit hampir sepanjang 150 m. Bagian yang terpisah tampaknya telah membelah kebun buah pepaya saat meluncur di atas lapisan lanau sampai pasir halus yang terlikuifaksi (Gambar 3.39a). Pergeseran bagai diatas rakit ini tertahan oleh batas tanah yang lebih stabil di tepi utara luncuran debris di sisi barat kompleks, menghasilkan kompresi, pengangkatan, dan rotasi pada lorong yang memisahkan kompleks perumahan (Gambar 3.39b , c). Ada juga bukti signifikan terjadinya kompresi dan pengangkatan yaitu dari punggung kompresi tepat di sebelah barat kompleks perumahan, yang mungkin semula menyebar sebelum akhirnya terhenti. Bukti terjadinya likuifaksi dan aliran debris teramati di belakang kompleks perumahan yang berdekatan dengan bagian kompleks yang terpisah (margin Zona B dan C). Sand boil, deposit endapan lumpur, dan blok yang hancur dan gundukan tanah yang terbelah ditunjukkan pada Gambar 3.39d , e. Gundukan dan blok yang hancur ditunjukkan pada Gambar 3.39d , e adalah sisa-sisa blok yang terpecah secara lateral dari Zona C. Sebagai catatan, vegetasi yang terlihat (rumput) telah tumbuh antara kejadian gempa sampai dengan kedatangan tim GEER. Meskipun tidak ada kerusakan pada saluran irigasi, dan secara signifikan erosi yang terjadi lebih kecil dari apa yang terjadi di Petobo dan Jono Oge, Gambar 3.39f menggambarkan tingkat konsolidasi endapan lumpur yang terlikuifaksi di bagian kompleks perumahan yang terpisah.

Zona D: Luncuran dan Aliran Debris

Tingkat kehancuran permukaan yang besar karena luncuran debris terlihat di Zona D di dekat kaki longsoran. Endapan debris berupa matriks heterogen terdiri dari pasir halus sedimen permukaan berselang seling dengan fitur morfologi, termasuk blok dan gundukan yang hancur, vegetasi yang tertumpuk atau terangkat, pohon yang tumbang dan terputar, serta kompresi punggung (Gambar 3.40). Puing-puing bergeser melalui bagian timur jalan dengan arah barat daya yang memotong pusat Zona D (Gambar 3.31). Sepotong bagian jalan yang tersisa, yang terdesak dan melengkung, masih terlihat pada Gambar 3.31. Tim GEER juga mendokumentasikan bukti naiknya

tegangan air pori yang tinggi dan likuifaksi di dataran pasir di dekat batas timur Zona D, di mana sand bol mencapai diameter sebesar 2,5 m (Gambar 3.41).



Gambar 3.39. Kompleks perumahan di Zona C: a.) Tampilan kompleks perumahan yang terbelah dari sekitar kebun papaya (-0.97025, 119.91304); b.) pemandangan menghadap ke timur menunjukkan jalan yang terputar dan terangkat dengan kebun papaya yang masih terlihat di sebelah kiri (-0.97039, 119.91268); c.) pandangan kehancuran dan bukti kompresi dan pengangkatan di jalan di bagian bawah kompleks perumahan (-0.97069, 119.91304); d.) pandangan barat di belakang bagian kompleks perumahan yang terpisah yang menunjukkan sand boil dan batas aliran debris dan bagian kanan blok yang hancur (-0.97034, 119.91380); e.) tampilan barat-barat laut bagian atas kompleks perumahan dengan batas aliran debris dan blok-blok yang hancur (-0.97036, 119.91375); f.) ketinggian aliran lumpur yang melalui bagian bawah kompleks perumahan (-0.97040, 119.91292).



Gambar 3.40. Zona D: a.) Lokasi likuifaksi dan puing-puing debris (-0,97100, 119.91171); b.) punggungan tertekan dekat batas Zona C dan D (-0.97048, 119.91188); c.) pohon yang bergerak maju atau terputar di dekat ujung longsoran (-0.97091, 119.91104).

3.3.1 Interpretasi dan Hipotesa Mekanisme Perkembangan Longsor-Likuifaksi

Evolusi dari interpretasikan dan perkembangan longsor-likuifaksi di desa Lolu dibuat dengan diperkuat laporan saksi mata, citra satelit sebelum dan sesudah gempa, data drone, dan ekspresi geomorfologi yang didokumentasikan oleh tim investigasi. Longsor-likuifaksi di Desa Lolu terjadi pada daerah yang berpenduduk kurang padat dibandingkan dengan Petobo, tetapi beberapa saksi mata dengan sudut pandang berbeda memberikan kesaksian mereka terhadap peristiwa tersebut.



Gambar 3.41. Hamparan sand boil di dekat batas timur Zona D.

Kesaksian tersebut diterjemahkan oleh anggota tim GEER dari HATTI dan PuSGeN. Meski semua saksi mampu memberikan deskripsi rinci tentang gerakan tanah selama gempa, hanya sedikit yang sebenarnya memiliki perspektif yang baik dalam

menceritakan seluruh longsor-likuifaksi yang terjadi (Gambar 3.42). Catatan saksi mata, yang diberikan secara sukarela, konsisten dan secara signifikan menyampaikan dengan detail tentang waktu, urutan, dan progres dari longsor-likuifaksi. Mekanisme umum yang berkontribusi pada inisiasi dan perkembangan longsor-likuifaksi mirip dengan deskripsi terperinci disampaikan didalam bagian 3.1.3.

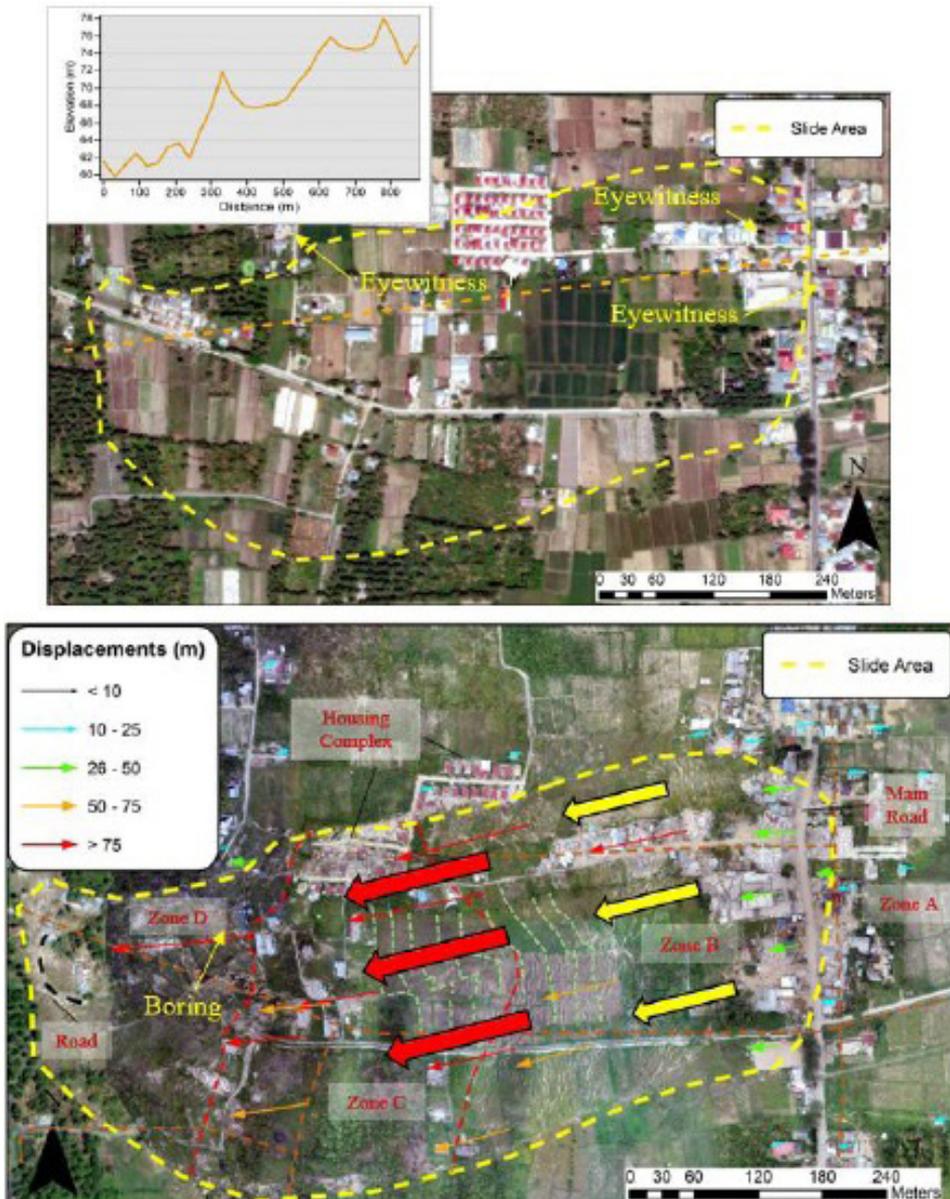
Tiga saksi mata didokumentasikan di Desa Lolu. Dua orang yang selamat menyaksikan peristiwa longsor-likuifaksi tersebut pada bagian hulu longsor. Saksi mata ketiga memberikan kesaksian rinci dari kaki longsor dan mampu menggambarkan perkembangan pergeseran pada kompleks perumahan (Gambar 3.42). Mirip dengan kejadian di Petobo, gempa digambarkan sebagai periode awal yang intens dari gerakan tanah horisontal, diikuti dengan jeda singkat tanpa guncangan, dan kemudian terjadi guncangan vertikal dan bantingan yang keras pada akhir guncangan. Seorang saksi mata menyaksikan peristiwa itu dari dekat masjid yang terletak di jalan akses yang membentang ke barat dari jalan utama (Gambar 3.42). Sebagai tambahan terhadap guncangan tanah, secara umum, dia menyampaikan secara detail proses rotasi tanah dan terputusnya masjid dengan keras, diikuti oleh tanah yang bergelombang, dipercayai masing masing sebagai gelombang permukaan Love dan Rayleigh. Saat gempa, mereka berlari ke arah timur (menuju jalan utama) dan melihat tanah terus membelah dan menutup saat mereka melintasi lokasi ini selama gempa. Pengamatan sebelumnya konsisten dengan retak yang signifikan terjadi di bagian bawah jalan akses. Sebagai catatan, bahwa permukaan dari jalan akses ini telah diperbaiki ketika tim investigasi berada disana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.37b. Saksi mata yang lain yang berada dekat dengan saksi mata pertama, yang lokasinya di sisi timur jalan utama di seberang pompa bensin selama gempa berlangsung. Mereka ingat retakan yang banyak terjadi dan ekstensi lateral jalan utama, dan menyampaikan bahwa retakan ini jauh lebih besar dari yang terjadi pada sisi timur (kondisi menanjak). Hal ini konsisten dengan video rekaman diambil di depan pompa bensin (<https://twitter.com/i/status/1049533431699234816>; diakses 1 April 2019). Mereka menggambarkan bahwa jalan itu tidak bisa dilalui oleh lalu lintas setelah gempa, tetapi telah diperbaiki ketika tim GEER berada di lokasi. Saksi mata ketiga, yang berada di ujung kaki longsor, pertama ingat bahwa kompleks perumahan awalnya bergerak serempak sebelum bagian selatan kompleks tergeser dan meluncur menuju rumahnya. Di beberapa titik selama meluncur, saksi mata juga mencatat bahwa bagian yang bergeser dari komplek

mulai bergerak menjauh (menanjak). Namun demikian Tim GEER percaya ini mungkin masalah persepsi, bahwa dimana mereka berdiri mulai bergeser menurun menjelang akhir longsor-likuifaksi, memberikan ilusi bahwa kompleks perumahan bergeser menjauh. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.42, pergeseran tanah di sekitarnya saksi mata ini sekitar 20 sampai 30 m.

Berdasarkan keterangan saksi mata, peta pergeseran tanah, dan ekspresi geomorfologi, luncuran tanah longsor tampaknya dimulai di dekat pusat area longsor di hilir jalan utama, diikuti dengan pergerakan sekunder dan penyebaran lateral dengan arah menanjak (Gambar 3.42). Arah, inisiasi, dan terminasi gerakan tampaknya sangat dipengaruhi oleh topografi. Pergerakan dimulai di daerah dengan kemiringan yang lebih curam secara lokal (Gambar 3.42) dan berakhir menurun di mana ada sedikit atau tidak ada gundukan tanah (yaitu medan datar). Segera setelah pergeseran dimulai di dekat pusat longsor-likuifaksi, kehilangan kekangan menyebabkan ekstensi lateral dan gerakan sekunder. Juga terlihat bahwa pergeseran yang dipetakan mengindikasikan pergerakan sekunder terbesar terjadi di daerah di mana kondisi lokal lebih curam.

Secara umum, timbulnya tegangan air pori siklik yang berlebihan dan kehilangan kekuatan tanah selama gempa diyakini sebagai faktor utama atas inisiasi (awal) terjadinya longsor-likuifaksi di Desa Lolu, yang mirip dengan kejadian di Petobo dan Jono Oge. Sand boil yang diamati di dekat kaki longsor dan daerah di mana luncuran dimulai tampaknya memberikan bukti kuat yang mendukung mekanisme ini. Perspektif global longsor-likuifaksi di wilayah cekungan Palu ini (Petobo, Jono Oge, Desa Lolu) menunjukkan bahwa awal terjadinya longsor-likuifaksi adalah pada ketinggian transisi dari sekitar 60 hingga 80 m, seperti yang dibahas sebelumnya di awal bagian 3 (Gambar 3.4). Namun, transisi ini terjadi pada jarak yang lebih jauh dari saluran irigasi dibandingkan dengan Petobo dan Jono Oge. Pengamatan sebelumnya menarik dan lebih jauh mendukung hipotesis bahwa kemungkinan kondisi geologi dan lingkungan pengendapan dari alluvial fan memainkan peranan penting dalam kondisi awal yang berkontribusi pada ketidak stabilan tanah (lihat bagian 3.1.3). Namun, mengingat longsor di desa Lolu dimulai lebih jauh dari saluran irigasi Gumbasa dibandingkan dengan di Jono Oge dan Petobo, menjadikan apakah rembesan dari saluran irigasi atau tinggi muka air tanah alami yang menyebabkan terjadinya saturasi dan fluidisasi endapan selama gempa. Mengingat ada tidak ada sumur pemantauan yang ada di daerah ini sebelum gempa bumi, tinggi muka air tanah awal tidak diketahui. Pengeboran dangkal

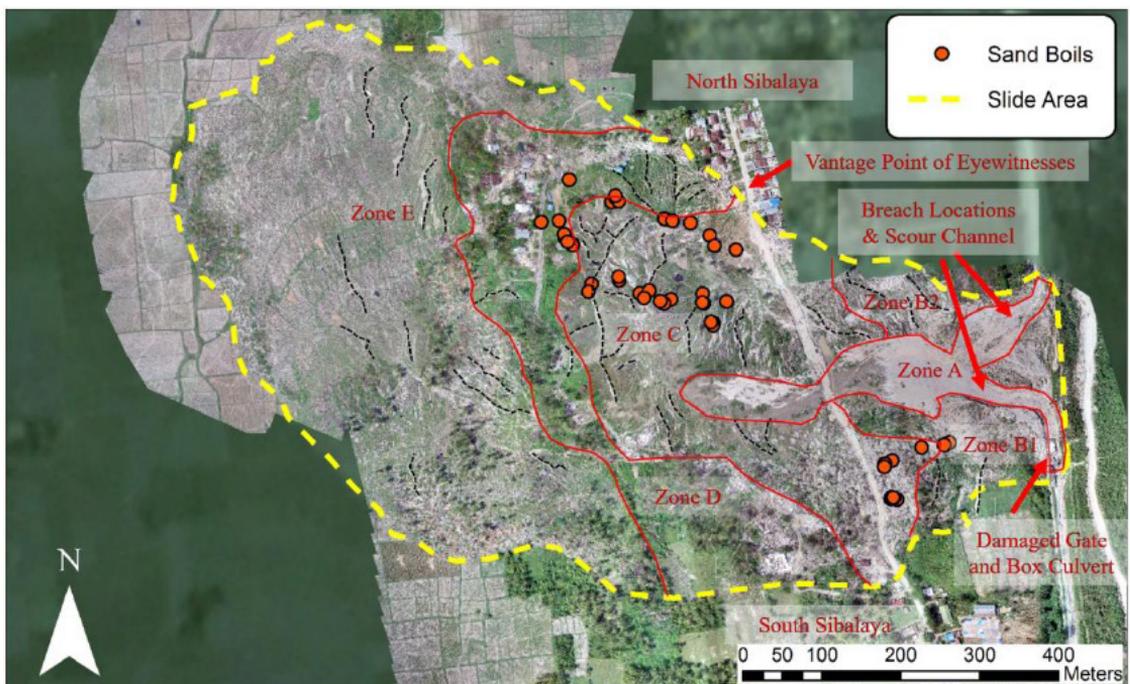
(tangan) dilakukan di bagian hilir longsor-likuifaksi di Zona D menunjukkan muka air tanah berada kira-kira 1 m di bawah permukaan tanah (Gambar 3.42). Namun, tanpa lebih banyak informasi air tanah dan kontur ketinggiannya pasca gempa, tim GEER belum dapat menyimpulkan apakah tanah tersebut mengalami likuifaksi pada atau dekat dengan muka air tanah asli.



Gambar 3.42. Topografi Pra-longsor dan progres longsor yang diinterpretasikan dari indikasi awal (panah merah) dan gerakan sekunder (panah kuning).

3.4. Longsor Likuifaksi di Sibalaya

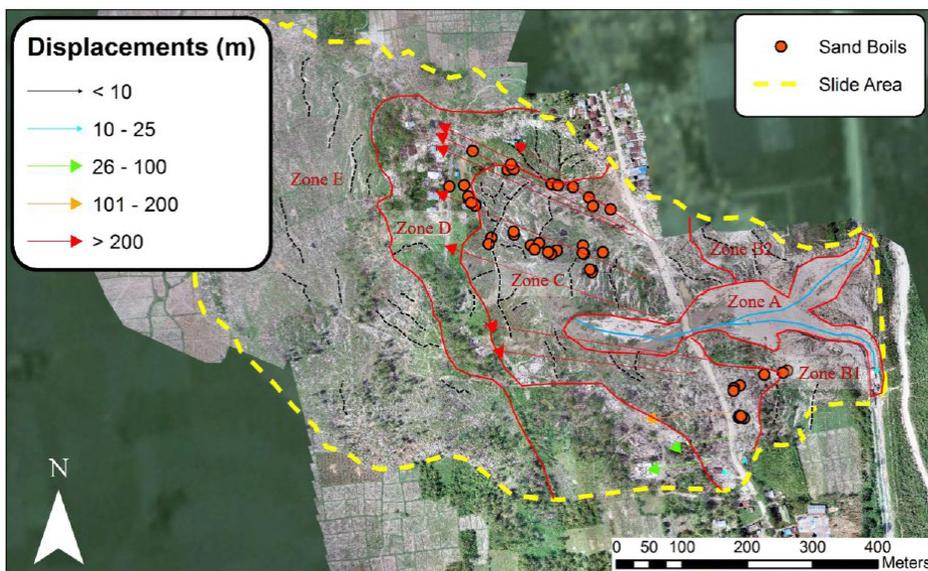
Sibalaya terletak 18 km di sebelah selatan Jono Oge, dan juga dilintasi saluran irigasi Gumbasa. Lebar saluran irigasi di daerah ini relatif besar dibandingkan dengan yang di Jono Oge dan Petobo. Longsor-likuifaksi di Sibalaya adalah lokasi yang paling selatan yang diselidiki oleh tim GEER, dan dibagi menjadi lima zona (A sampai E) berdasarkan pada perbedaan morfologis dan pengamatan utama di setiap zona. Longsor-likuifaksi ini berpengaruh pada luasan 0,52 km² dan mempunyai panjang lebih dari 1,2 km dari saluran irigasi Gumbasa hingga kaki longsor yang jauh di tepi barat longsor (Gambar 3.43) .



Gambar 3.43. Peta Orthomosaik menunjukkan batas lokasi longsor-likuifaksi Sibalaya dari sand boil, dan zona yang dibatasi oleh fitur morfologis dan pengamatan di lapangan.

Longsor yang terjadi pada saluran irigasi Gumbasa menimbulkan dua saluran oleh karena gerusan yang kemudian menyatu dan membelah desa Sibalaya Utara dan Selatan. Sebagian jalan yang telah tererosi terlihat jelas di Zona D, dan sebagian besar tetap utuh selama pergeseran ke lokasi saat ini. Selain perbaikan kecil yang dibuat pada jalan utama untuk membuatnya dapat dilewati lalu lintas, ada sedikit longsor dan sebagian besar fitur geomorfologis bertahan setelah gempa. Sand boil sebagai

bukti likuifaksi didokumentasikan di beberapa tempat di seluruh lokasi ini. Gambar 3.44 menunjukkan pergeseran vektor dari beberapa bangunan, yang mengindikasikan pergerakan tanah dan jarak pergeseran sejauh 400m di beberapa lokasi. Berdasarkan vektor pergeseran yang ditunjukkan pada Gambar 3.44, longsor umumnya mengalir ke arah barat-barat laut dan menyebar ke arah utara selatan saat tanah bergeser. Pergeseran di pusat longsor-likuifaksi adalah yang terbesar dan mengecil di dekat batas luasan yang terdampak, meskipun pergeseran di sepanjang batas selatan longsor-likuifaksi secara signifikan lebih kecil tetapi secara umum bahwa longsor-likuifaksi tersebut adalah aliran massa tanah.



Gambar 3.44. Peta Orthomosaic yang menunjukkan lokasi sand boil, pergeseran vektor, dan zona yang dibatasi oleh fitur morfologi dan pengamatan utama.

3.4.1 Observasi Lapangan dan Morfologi

Zona A - Gerusan dan Daerah Erosi

Runtuhnya saluran irigasi Gumbasa di dua lokasi menghasilkan gerusan dan fitur erosi yang signifikan, termasuk terbentuknya dua saluran di batas longsor sebelah tenggara dan timur laut yang kemudian menyatu menuju pusat Zona A. Gerusan saluran di Zona A menghasilkan ketidaksesuaian dalam struktur fitur dengan yang diamati pada Zona B dan C di dekat bagian tengah longsor-likuifaksi (Gambar 3.43). Gerusan pada saluran ini membuat penampang yang dalam yaitu kira-kira 4

sampai 6 m pada endapan aluvial fan yang sebelumnya landai dari pasir halus ke sedang dan pasir berlumpur. Keberadaan kerikil, kerakal, dan batu besar di dekat bawah saluran ini menunjukkan mekanisme gerusan yang kemungkinan memotong rombakan endapan colluvium yang lebih tua yang menjadi dasar sedimen permukaan (Gambar 3.45a ,b). Pasir dan lumpur yang lebih halus terkikis dan hanyut oleh air yang mengalir dari saluran irigasi yang runtuh dan diendapkan ke pusat dan batas barat Zona A.

Fitur penting lainnya termasuk keruntuhan gorong-gorong kotak beton (box culvert) dan pintu air baja di dekat longsor di bagian tenggara saluran irigasi. Ekstensi lateral dan retak, mengarah pada runtuhnya lokasi ini, gerusan yang terjadi dan erosi di sekitar bangunan bangunan ini, serta rusaknya dinding lereng sepanjang saluran irigasi. Hal ini juga mengakibatkan kerusakan parah pada lapisan dinding beton tidak betulang yang tidak menerus yang menghubungkan saluran dan inlet dari culvert (Gambar 3.45a, c, d).



a.)



b.)



c.)

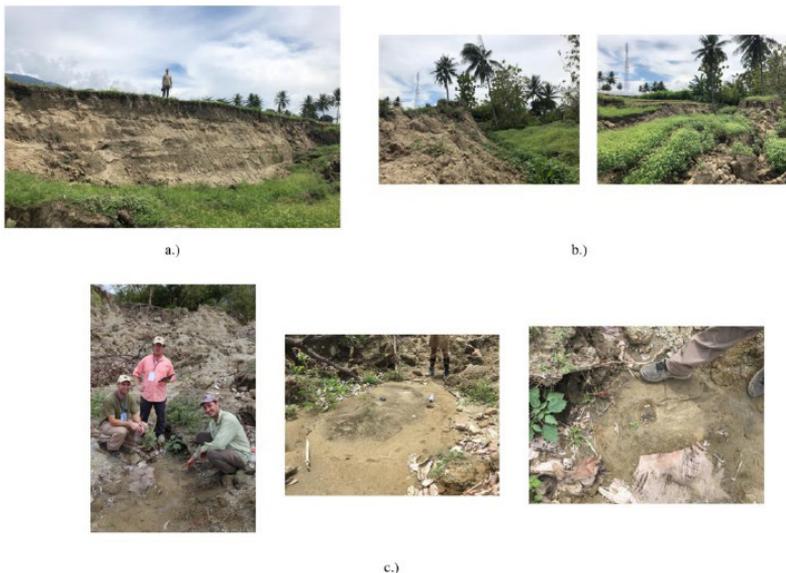


d.)

Gambar 3.45. Zona A: a.) Saluran gerusan dan gorong-gorong kotak yang rusak (-1.1488, 119.92477); b.) timur-perspektif menghadap tenggara dari saluran gerusan selatan di mana saluran gerusan bertemu (-1.14788,119.92281); c.) Rusaknya gerbang dan retak di saluran irigasi pada batas tenggara slide (-1.149652,119.924991); d.) Rusaknya liner antara box culvert dan gate dan sloughing dinding saluran irigasi di latar belakang (-1.14915, 119.92493).

Zone B – Puncak Longsoran dan Rotasi Blok

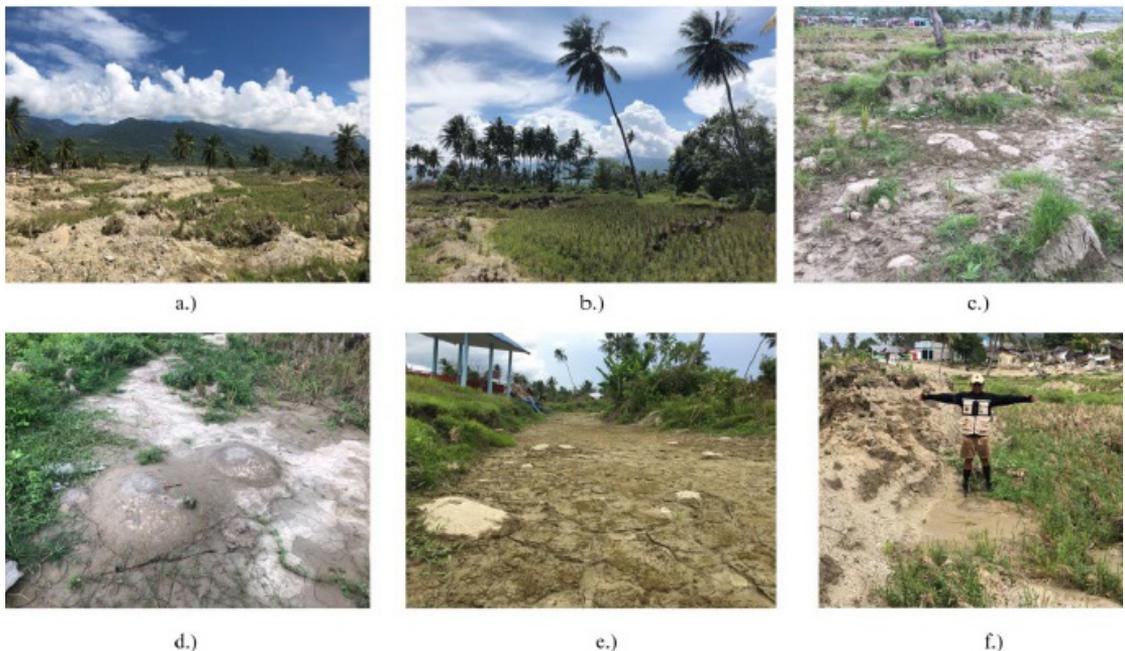
Zona ini, terletak di batas tenggara dan timur laut dari longsor-likuifaksi (Zona B1 dan B2) yang terdiri dari puncak longsoran dan perputaran blok yang terputar balik memotong sawah yang berdekatan dengan saluran irigasi (Gambar 3.46). Puncak longsoran terdiri dari endapan alluvial fan yang sama yang tidak terkonsolidasi terpotong oleh runtuhnya saluran irigasi di Zona A. Blok yang relatif besar terdapat di dekat puncak yang runtuh ke bawah, dan vegetasi dan pohon umumnya berorientasi terangkat. Ukuran blok yang runtuh umumnya mengecil dan bergerak ke barat menjauh dari puncak longsoran, dan mendekati Zona A, di mana gerusan dan erosi akan berpengaruh pada dimensi blok ini. Sedimen talus sebagian mengisi ceruk antara blok yang lebih kecil di elevasi yang lebih rendah. Selain itu, sand boil yang terlindung oleh blok yang lebih kecil dan talus di dasar Zona B1, memverifikasi terjadinya likuifaksi dan fluidisasi material yang berkontribusi terhadap destabilisasi masa tanah. (Gambar 3.46c). Ejecta memberikan bukti bahwa terdapat lapisan cair terdiri dari pasir halus dengan pasir lanau. Pada saat ini kedalaman lapisan yang terlikuifaksi belum teridentifikasi. Sand boil tidak teramati di Zona A, meskipun fitur-fitur ini kemungkinan telah terkikis oleh air banjir di dengan energi yang besar setelah saluran irigasi runtuh, dan karena itu tidak terselamatkan seperti yang ditemukan di Zona B1.



Gambar 3.46. Zona B1: a.) Puncak longsoran (-1.149536, 119.924125); b.) blok tanah terputar (-1.149580, 119.924053); c.) sand boil (-1.49620, 119.923225).

Zone C – Daerah yang mengalami Rotasi Balik dan Blok dengan Ekstensi Lateral

Daerah ini terdiri dari gundukan melintang yang terputar balik dari endapan kipas aluvial yang mengalami tarikan lateral di seluruh zona (Gambar 3.47a- c). Vegetasi pada permukaan blok ini sebagian besar tetap utuh, menunjukkan bahwa terjadi pergeseran dari sawah yang sebelumnya berdekatan dengan saluran irigasi. (Zona A dan B). Sementara sedimen di permukaan sepanjang bagian timur longsor diyakini adalah deposit aluvial kipas yang berasal dari pegunungan dan diangkut ke cekungan melalui jaringan anak sungai, sedimen asli di Zona C diyakini adalah aluvial endapan banjir dari Sungai Palu (Gambar 2.4).



Gambar 3.47. Zona C: a.) Tampak blok yang terotasi balik arah tenggara (-1.146946, 119.919843); b.) Tampak blok yang terotasi balik arah selatan (-1.146946, 119.919843); c.) Tampak arah tenggara blok yang terotasi balik dan sand boil (-1.146575, 119.919432); d.) sand boil (-1.146419, 119.920662); e.) likuifaksi dekat batas Zona C dan D (-1.146422, 119.919374); f.) sand boil besar (-1.147622, 119.921125).

Pergeseran blok dan lebar area yang tertekan antar blok umumnya lebih besar dari pegeseran masa tanah di sebelah barat bagian ini, dan sebagai fitur utama yang membantu menggambarkan perbedaan zona ini dari zona lainnya (yaitu Zona D dan E). Selain dari survei darat, ekstensi dapat dilihat dari foto udara yang ditandai dari

penurunan kerapatan vegetasi (sawah) dan terlihat dengan jelas adanya pasir diantara blok (Gambar 3.44). Di beberapa dasar ekstensi lateral ini terlihat jaringan (misalnya garis putus-putus hitam pada Gambar 3.44) yang terisi dengan material yang terbawa oleh air banjir dari saluran irigasi, terutama di dekat pusat zona ini. Sejumlah besar sand boil terlihat di daerah-daerah yang tertekan ini di seluruh Zona C, menunjukkan bahwa likuifaksi tersebar luas (Gambar 3.43 dan Gambar 3.47c- f).

Ejecta terdiri dari pasir berlumpur halus, mirip dengan material yang dikeluarkan dari sand boil di Zona B. Sand boil yang ada di lokasi ini mengindikasikan bahwa tegangan air pori melebihi tekanan overburden. Kondisi ini secara prevalensi mungkin menunjukkan bahwa lapisan yang terfluidisasi adalah dekat (atau pada) dasar antara blok ekstensi di zona ini.

Zona D – Tumbukan Blok dan Massa tanahblok rakit

Beberapa pengamatan dan fitur di bagian ini menawarkan wawasan tentang evolusi gerakan dan perkembangan massa tanah longsor di zona ini. Massa tanah di lokasi ini bertransisi dari area ekstensi di Zona C ke kondisi kompresi, ditandai dengan penutupan celah dan fitur ekstensi, dan di mana blok mengalami pengangkatan (uplift) dan/atau rotasi ketika blok saling bertabrakan. Bukti ini diamati dari foto udara dengan bertambahnya kepadatan vegetasi dan lebar area dengan pasir terbuka, yang menunjukkan penutupan depresi ekstensional antar blok (Gambar 3.44). Sebagai contoh, di batas timur laut zona D jalan dan blok tampaknya dari awal sudah terputar searah jarum jam sebelum meluncur dan bertabrakan dengan batas utara longsor. Tabrakan batas utara longsor dengan Zona E tampaknya memiliki setidaknya sebagian retakan terkompresi dan fitur ekstensi. Selain dari pergeseran, orientasi utama jaringan aliran yang terkompresi diinterpretasikan dalam Gambar 3.44 untuk menggambarkan pergerakan umum longsor massa di wilayah timur laut Zona D. Selain itu, blok tidak lagi secara konsisten terputar, tetapi sebagian terangkat dan/atau terputar kedepan ban banyak contoh lainnya (Gambar 3.48a).

Kondisi perkerasan jalan dan rumah tinggal sangat bermanfaat dalam mengartikan perkembangan dari longsor massa tanah longsor tersebut di dekat pusat dan batas barat laut zona. Dekat bagian tengah Zona D, massa tanah longsor tampaknya telah secara efektif berperilaku seperti rakit yang mengalami ekstensi atau rotasi yang relatif terbatas saat berpindah. Pohon dan sistem akarnya bergeser bersama sepanjang batas

barat Zona D seperti massa tanah yang diperkuat dan bersama sama bergeser. Hal ini didukung oleh kondisi jalan asli, yang sebagian besar masih tersisa utuh. Retak ekstensi di dekat tepi bagian jalan yang utuh tampaknya telah tertutup (kiri sisi pada Gambar 3.48b), menunjukkan daerah ini mungkin telah mengalami tumbukan dan tekanan di tepi batas timur dari massa tanah longsor di Zona C. Selanjutnya, jalan dan massa tanah longsor di daerah ini berada pada elevasi yang lebih tinggi berdasarkan pengamatan visual, dan mungkin saja terangkat di tahap akhir dari proses longsor (mis . Gambar 3.48c).

Rumah-rumah hunian di dekat pusat zona dan bagian jalan yang utuh juga sebagian besar masih utuh, menunjukkan kerusakan yang lebih kecil dibandingkan dengan bangunan yang berkelompok di batas barat laut Zone D, yang semuanya runtuh (Gambar 3.48d vs. Gambar 3.48ef). Bagian tengah Zone D relatif datar dibandingkan dengan wilayah barat laut zona tersebut. Beberapa kondisi bergelombang dalam area ini menjadi bukti ekstensi awal yang lebih besar dan penutupan sebagian blok selama tahapan akhir longsor. Hipotesis ini juga menjelaskan kerusakan yang lebih besar atau keruntuhan total perumahan di sudut barat laut Zona D. Semakin sedikit, fitur ekstensi yang mudah dikenali dan meningkatnya vegetasi sepanjang batas selatan Zona D, mirip dengan bagian tengah massa tanah longsor di ini daerah. Pergeseran sekitar 50 hingga 100 m berdasarkan pergerakan yang terlacak di dekat sudut zona barat daya, yang secara signifikan hanya sedikit bergeser dilihat dari arah timur (tengah) dan bagian utara dari zona. Berdasarkan interpretasi batas Zona D dalam Gambar 3,44, bagian tengah Zona D tampaknya telah lepas dari bagian selatan terjadinya longsor. Kerapatan pohon yang lebih besar di dalam dan di luar batas selatan longsor mungkin disebabkan resistensi yang lebih besar dan pergeseran yang lebih kecil di daerah ini.

Pengamatan penting lainnya adalah pergeseran bidang di sudut barat daya Zona D, yang tampaknya hanya bergeser 25 hingga 50 m. Mengingat pergeseran di sudut tenggara adalah 50 hingga 100 m, ada kemungkinan lateral spreading di sudut tenggara sebagai awal longsor, dengan beberapa kemungkinan kompresi dan tumbukan selama tahap akhir dari longsor. Kerusakan yang lebih besarpada rumah hunian dan masjid di sudut tenggara Zona D (relatif terhadap struktur di bagian tengah Zona D) mendukung interpretasi ini dari perkembangan longsor, mirip dengan diskusi tentang sudut timur laut zona.

Zone E – Lapangan Luncuran Debris dan Blok

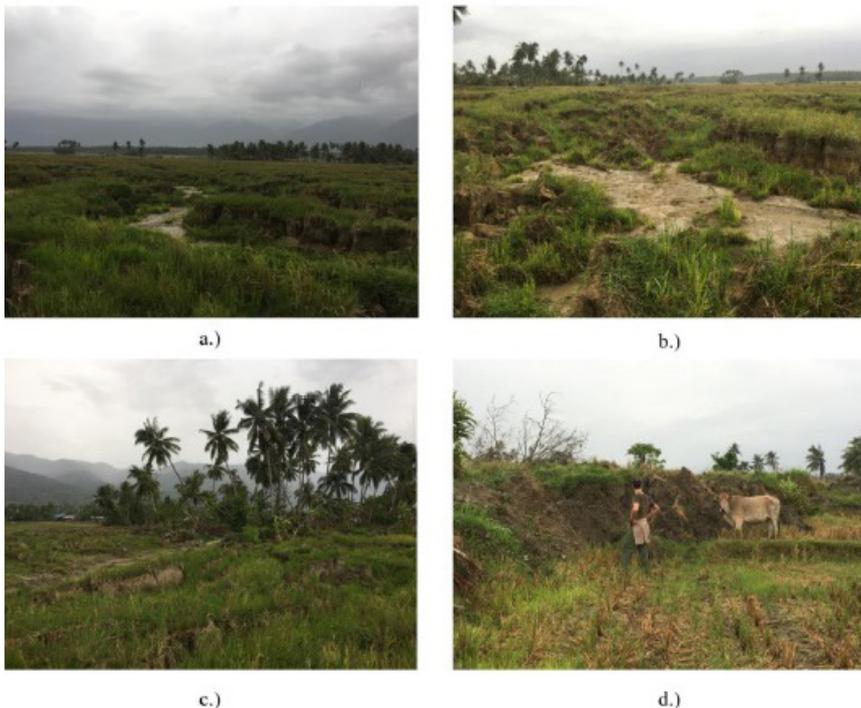
Zona luncuran debris terdiri dari blok-blok yang terpisah, yang terletak pada dasar pasir kelanauan yang terlihat pada alur yang memisahkan fitur-fitur ini (Gambar 3.49a, b). Lebar jalur, dimensi dan tinggi blok blok yang terpisah pada umumnya seragam di seluruh lapangan. Di daerah tertentu di mana lebar jaringan ekstensional lebih besar, ditemukan disintegrasi dari blok



Gambar 3.48. Zona D: a.) Blok terkompresi dan terangkat dekat margin utara zona C (-1.145940, 119.919559); b.) bagian jalan yang relatif utuh dan retak tertutu pada sisi kiri (-1.146440, 119.919162); c.) perbedaan ketinggian yang mencolok yang berbatasan langsung dengan depresi pada zona C (-1.146422, 119.919289); d.) rumah tinggal yang relatif utuh di dekat pusat zona D (-1.146385, 119.919055); e.-f.) kerusakan dan keruntuhan struktur yang lebih parah di dekat barat laut batas zona D (-1.145904, 119.919079 dan -1.145963, 119.918827).

. Material pembentuk dasar zona ini kemungkinan besar mewakili fluidisasi sedimen yang berfungsi sebagai pelumas dan memfasilitasi aliran dan pergeseran yang besar dari blok di daerah ini yang mempunyai sudut lereng yang kecil (lereng 1 hingga 2 persen). Jauh dari batas longsoran, bermacam orientasi blok menunjukkan fitur ini terputar karena kekuatan global dan lokal dari aliran sedimen yang terfluidisasi yang berasal dari sawah dan ladang di Zona E. Dispersi sedimen terfluidisasi yang melintasi daerah longsoran ini kemungkinan disebabkan oleh terbentuknya lapisan ini secara terus menerus dan menyebar di seluruh zona (Gambar 3.44) . Berdasarkan ekspresi geomorfologi di zona lainnya dan laporan saksi mata (dibahas kemudian), longsor tampaknya dimulai di bawah lapangan blok ini, yang dipindahkan dari daerah sebelah

barat jalan lama (sekarang Zona C). Blok yang terangkat dengan rotasi pohon kearah depan dan blok blok memberikan bukti tumbukan di dekat margin distal zona di mana longsor berakhir (Gambar 3.49c,d).



Gambar 3.49. Zona E: a.) Bidang luncuran blok dan lapisan sedimen yang terfluidisasi di lapisan antar blok (-1.144891, 119.917555); b.) sedimen pada lapisan yang tertekan diantara blok (-1.14496, 119.91769); c.) tumbukan blok yang memutar ke depan dan terangkat di dekat ujung longsor (-1.144893, 119.917708); d.) ketebalan debris pada ujung longsor (-1.144651, 119.915743).

3.4.2 Interpretasi dan Hipotesa Perkembangan Longsor

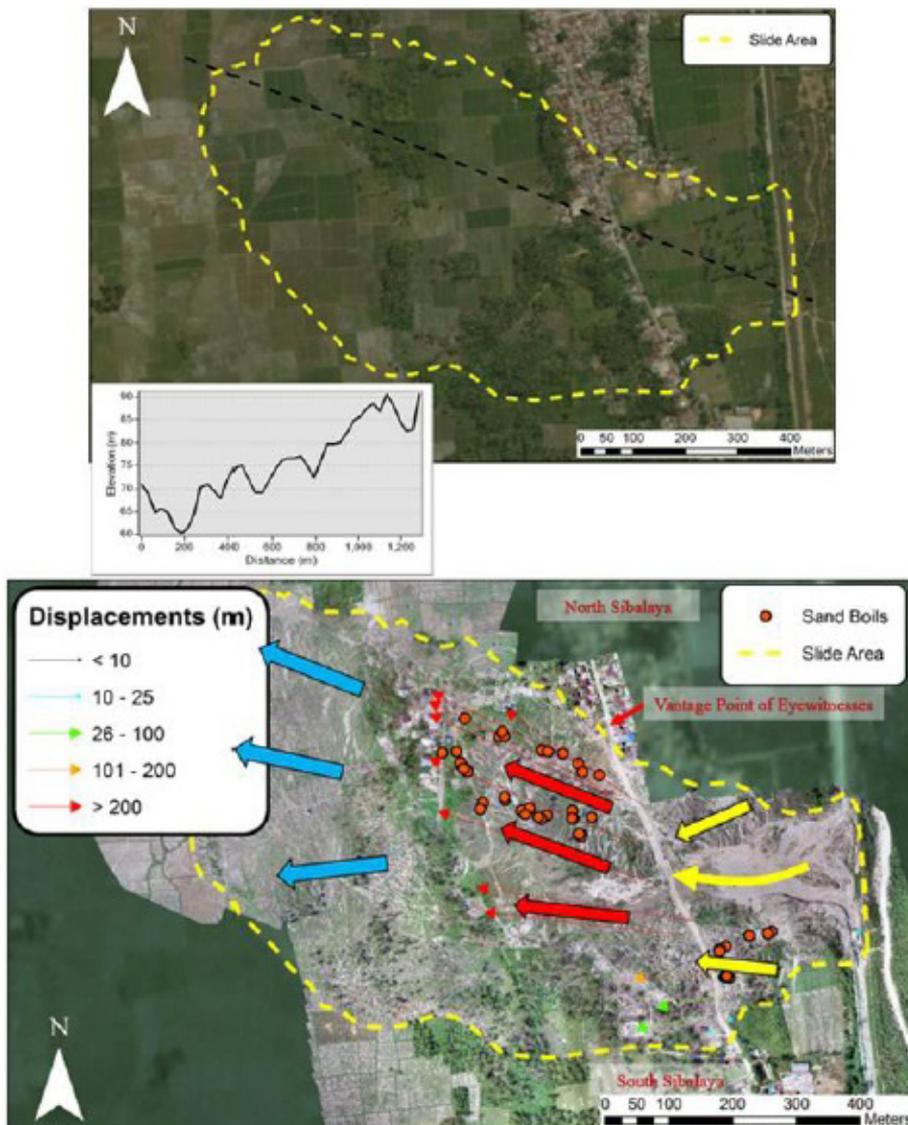
Tafsiran terhadap evolusi dan perkembangan terhadap aliran longsor (flowslide) di Sibalaya dibuat dengan menguatkan laporan saksi mata, pada citra sebelum dan sesudah gempa, dan ekspresi geomorfik yang didokumentasikan oleh tim investigasi. Tanah longsor di Sibalaya memotong desa-desa padat penduduk Sibalaya Utara dan Selatan, dan beberapa orang yang selamat memberikan keterangan sebagai saksi mata dari berbagai pandangan yang berbeda. Keterangan keterangan ini diterjemahkan oleh kolega tim GEER Indonesia dan/atau mitra dari tim HATTI dan PusGen. Namun, hanya sedikit yang benar-benar memiliki perspektif yang baik dan melihat seluruh kejadian longsor, dengan pengecualian sekelompok pria muda (remaja

atau lebih tua) yang menyaksikan longsor tersebut secara keseluruhan di Sibalaya Utara (Gambar 3.50). Catatan saksi mata, yang diberikan secara sukarela, konsisten dan diberikan detail waktu secara signifikan, urutan, dan progres dari longsor. Mekanisme yang berkontribusi pada inisiasi dan perkembangan longsor mirip dengan deskripsi terperinci yang disampaikan pada bagian 3.1.3 untuk Petobo.

Kelompok pemuda yang menyaksikan peristiwa longsor di Sibalaya Utara (Gambar 3.50), yang dijelaskan oleh anggota kelompok yang tertua, menceritakan urutan guncangan kuat sebagai periode awal gerakan tanah horisontal yang intens dan kemudian diikuti oleh gerakan vertikal dan jatuh secara vertikal di akhir gempa, mirip dengan laporan saksi mata di lokasi longsor lainnya. Kelompok itu tidak menyaksikan awal pergeseran tanah secara besar sampai setelah guncangan berhenti. Gerakan tanah pertama kali diamati di bagian barat jalan utama dengan tumbangnya pohon kelapa pada lokasi yang sekarang diperkirakan menjadi tempat blok yang tergeser secara lateral (Zona C), diikuti oleh “rotasi” tanah searah jarum jam dari arah (timur dari jalan utama) menjauhi saluran irigasi. Saat tanah berputar dan tergeser dari saluran irigasi, terdengar suara yang sangat keras, mungkin kombinasi dari suara dari dinding saluran irigasi yang runtuh dan selanjutnya oleh hancurnya pintu air dan gorong-gorong kotak. Banjir kemudian terjadi dan menggenangi wilayah barat saluran irigasi. Seorang wanita, yang rumahnya pada awalnya berdekatan dengan jalan utama, mengingat kejadian retaknya lantai rumah dan diikuti dengan semburan tanah ke dalam rumah. Ketika dia berusaha melarikan diri, bangunan itu mulai bergeser dan dia terpaksa memegang bilah kayu di jendela rumahnya. Rumahnya tergeser sekitar 400 m dari lokasi sebelumnya. Dia tidak ingat ada banjir dan genangan sampai rumahnya runtuh. Kepala desa Sibalaya Selatan memberikan informasi kedua dari kejadian tersebut (dia tidak ada di lokasi saat kejadian) dan menyampaikan pergeseran bangunan di desanya secara umum, yang konsisten dengan pergeseran yang diperoleh dari pemetaan.

Berdasarkan keterangan saksi mata, pergeseran tanah yang dipetakan, dan ekspresi geomorfik, longsor di Sibalaya tampaknya dimulai dari sebelah barat jalan utama, diikuti oleh longsor sekunder yang mencakup rotasi dan ekstensi lateral dari bidang yang sebelumnya berdekatan dengan saluran irigasi (Gambar 3.50). Arah, inisiasi, dan berhentinya longsor tampaknya sebagian besar dipengaruhi kondisi topografi. Gerakan dimulai di daerah dekat kaki dari lereng lokal yang curam. Lokasi

ini berjarak sekitar 800 m dari ujung debris flow (Gambar 3.50), dan konsisten dengan laporan saksi mata tentang di mana pohon kelapa pertama kali diamati bergerak. Setelah gerakan awal terjadi tepat di sebelah barat jalan utama, maka bagian timur jalan kehilangan tegangan kekang yang menyebabkan terjadinya ekstensi lateral dan gerakan sekunder (Gambar 3.50). Aliran debris terhenti pada lokasi daerah datar atau sedikit bergelombang, atau di daerah yang mempunyai sedikit kemiringan.



Gambar 3.50. Topografi sebelum longsor dan progres longsor yang diinterpretasikan mengindikasikan awal (panah merah) dan gerakan sekunder (panah kuning) serta pergerakan longsor (panah biru).

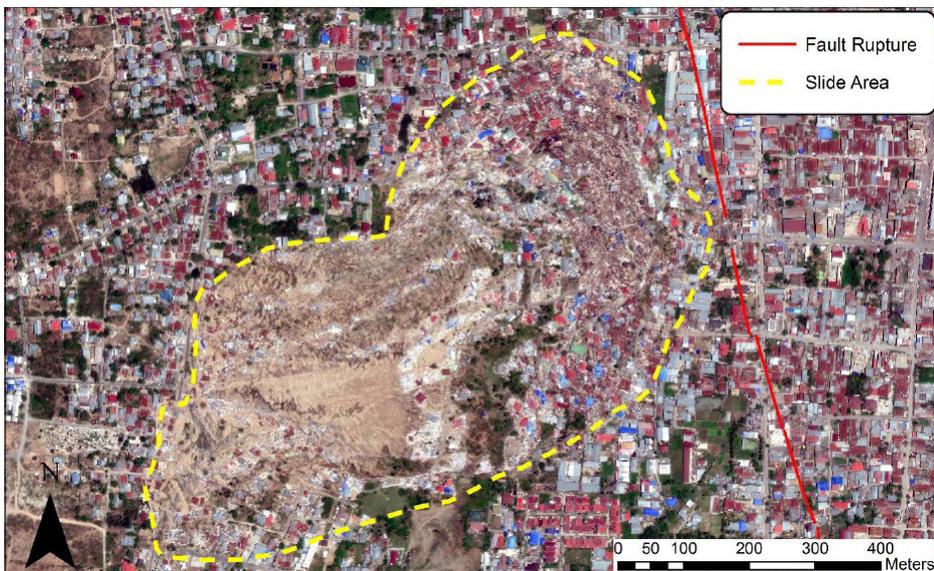
Mirip dengan aliran longsor di utara Sibalaya (Petobo dan Jono Oge), aliran air di dalam tanah dari saluran irigasi diyakini menjadikan sedimen aluvial jenuh, berkontribusi pada kondisi awal yang diperlukan untuk terjadinya tegangan air pori siklik, dan kehilangan kekuatan selama gempa. Prevalensi sand boil yang diamati di zona blok ekstensi lateral diyakini memberikan tambahan bukti yang kuat yang mendukung mekanisme yang memicu terjadinya tanah longsor. Menariknya, flowslide di Sibalaya juga terjadi pada perpotongan antara kipas aluvial dan endapan dataran oleh banjir, sama seperti longsor besar di tempat lainnya seperti di Petobo, Jono Oge, dan Balaroa (dibahas di bagian berikut). Sekali lagi, ini menunjukkan kondisi geologi dan endapan aluvial kemungkinan memainkan peran penting dalam kondisi awal yang berkontribusi destabilisasi material ini. Catatan lain yang penting dari longsor ini adalah longsornya dinding barat saluran irigasi, dan erosi serta degradasi material di dekat saluran irigasi. Longsor di Sibalaya ini adalah yang terjadi pada daerah paling selatan yang diselidiki oleh tim GEER, dan juga paling dekat dengan keberadaan air. Volume air yang besar dari saluran irigasi yang mengalir dari dua arah (hulu dan hilir) saat runtuhnya dinding saluran di Sibalaya, membuat erosi yang dalam (sekitar 4 sampai 6 m) melalui formasi deposit kipas aluvial. Kedalaman erosi oleh longsor di bagian selatan jauh lebih besar daripada bagian utara Sibalaya, mungkin karena volume (dan sumber) air yang lebih besar mengalir dari bagian hulu saluran irigasi. Banjir cenderung mengikis dan merusak fitur geomorfologi yang ada segera setelah flowlide terjadi.

3.5. Tanah Longsor di Balaroa

Longsor di Balaroa adalah satu-satunya longsor yang dijumpai di sisi barat cekungan Palu. Tanah longsor mencakup 0,4 km² dengan panjang sekitar 980 m. Longsor terjadi pada pemukiman yang sangat padat penduduk (Gambar 3.51) dan BNPB memperkirakan terdapat 2.895 bangunan yang rusak atau hancur. Ujung tanah longsor terletak di sebelah pergeseran sesar, sehingga memang sangat sulit untuk membedakan kerusakan oleh karena longsor atau karena pergeseran sesar di permukaan pada beberapa lokasi (Gambar 3.51).

Tim GEER mengunjungi lokasi ini pada tanggal 14 November 2018, banyak bangunan rusak yang telah diratakan dengan alat berat di Balaroa. Upaya pembersihan itu membuat pemetaan rinci dari lokasi Balaroa dan interpretasi morfologi menjadi

sangat sulit (Gambar 3.52). Arah utama pergerakan tanah longsor Balarooa adalah ke arah barat laut (Gambar 3.53). Pemetaan pergeseran akibat tanah longsor dilakukan dengan mencocokkan titik pada struktur individu dalam citra satelit sebelum dan sesudah gempa bumi (Digital Globe 2018). Peta pergeseran menunjukkan bahwa pergeseran bangunan maksimum tidak lebih dari 350 meter di bagian tengah dari longsor (Gambar 3.53). Banyak bangunan yang tidak dapat diidentifikasi dari citra pasca-gempa, sehingga menyebabkan pemetaan keruntuhan menjadi tidak lengkap. Tim GEER mengamati tinggi air tanah selama kunjungan lapangan, termasuk genangan air dalam di dekat ujung longsor (Gambar 3.54).

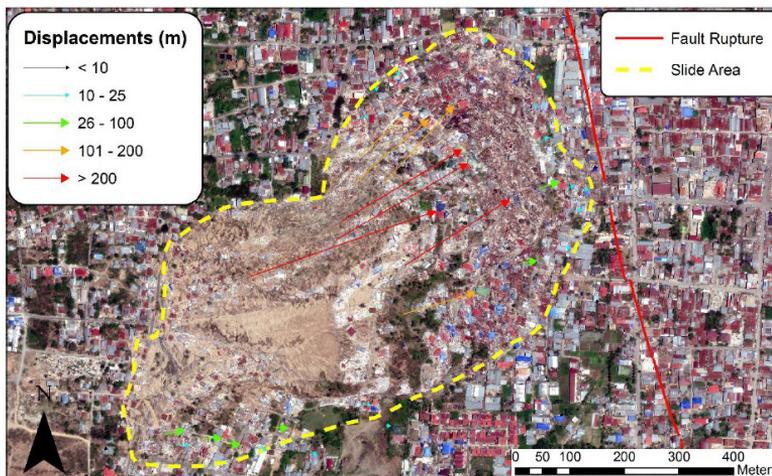


Gambar 3.51. Tanah longsor di pemukiman Balarooa.



Gambar 3.52. Foto-foto lereng longsor di Balarooa (kiri $-0,906689^{\circ}$, $119,839557^{\circ}$) dan dari badan longsor (kanan, $-0,906687^{\circ}$, $119,839372^{\circ}$) setelah pembersihan dilakukan.

Saksi mata yang diwawancarai oleh tim investigasi menggambarkan longsor dimulai di dekat kaki dari puncak longsoran. Longsor awal digambarkan dengan bangunan yang tenggelam. Orang-orang di daerah ini punya waktu untuk lari menjauh meninggalkan lokasi sejak longsor awal, sampai kemudian pergeseran tanah terjadi. Video yang direkam saat longsor di dapat ditemukan di (<https://twitter.com/i/status/1046445010231603200>; yang diakses pada 1 April 2019); meskipun video asli tidak dapat ditemukan dan suara menunjukkan bahwa video ini mungkin telah dilakukan editing dengan memperlambat gamabr.



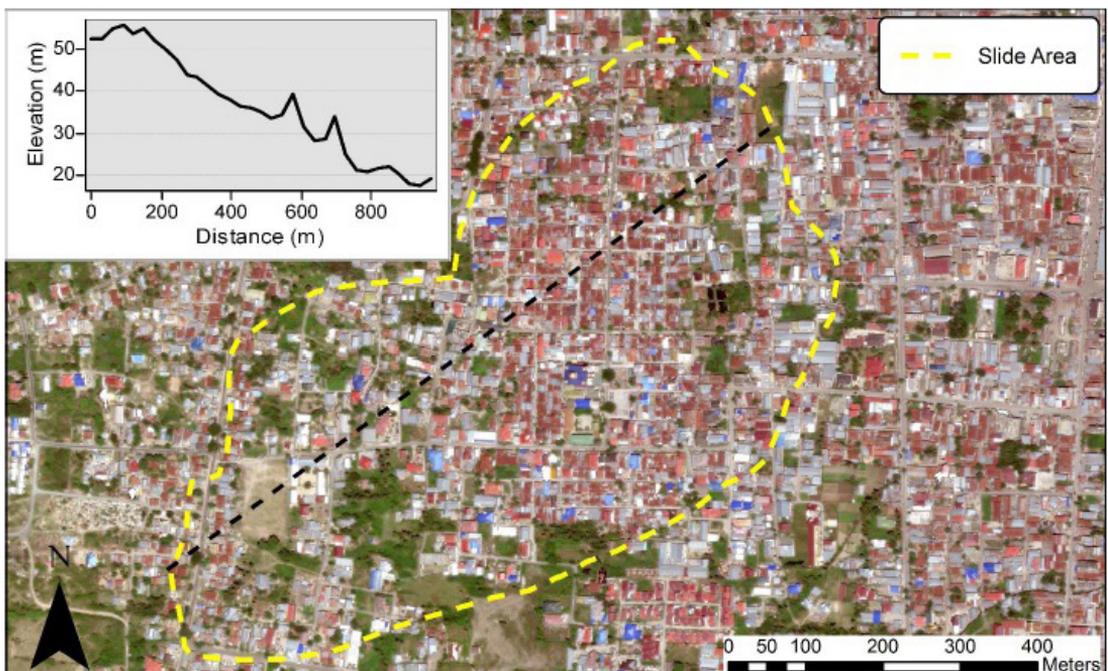
Gambar 3.53. Peta pergeseran tanah longsor di Balaroa.



Gambar 3.54. Ujung tanah longsor Balaroa, menunjukkan beberapa bangunan yang saling bertumpuk (-0,904367, 119,846528).

Perbandingan dibuat antara bangunan dan kendaraan yang ditunjukkan dalam video dengan citra satelit sebelum dan sesudah gempa untuk menentukan awal (-0,90447, 119.84291) dan lokasi akhir (-0.90334, 119.84431) dari tanah kosong di mana video tersebut dibuat. Lokasi pengambilan video menunjukkan rekaman di sepanjang tepi utara tanah longsor di Balaroa. Pada awal video, kamera tampak mengarah ke barat daya (yang berupa bukit besar yang menjadi latar belakang). Kamera kemudian bergerak ke arah selatan, di mana bangunan bisa terlihat runtuh dan mulai meluncur. Sekitar 20 detik dalam video tersebut, bangunan di sepanjang sisi longsor terlewati. Meskipun tidak jelas berapa lama setelah gempa rekaman ini dibuat, video tersebut memberikan bukti bahwa longsor yang terjadi bersifat progresif, yang menjadi awal dari longsor yang terjadi di bagian tengah Balaroa.

Tanah longsor di Balaroa berbeda dari tanah longsor yang telah disampaikan sebelumnya dalam beberapa hal yang penting. Yang pertama adalah tidak ada saluran irigasi di sisi lembah ini. Pertanian padi masih terdapat di daerah ini dalam skala yang lebih kecil, sawah terletak di dekat ujung tanah longsor Balaroa (Gambar 3.55). Gambar satelit dari tahun 2005 menunjukkan bahwa luas sawah di masa lalu masih luas, tetapi sebagian besar telah berubah menjadi pemukiman.



Gambar 3.55. Topografi pra-longsor di Balaroa.

Perbedaan penting kedua pada tanah longsor Balaroa ini adalah bahwa tidak ada sand boil yang ditemukan dan dilaporkan. Sand boil mungkin terjadi, tetapi tim GEER tidak menjumpai di tempat ini. Perbedaan penting ketiga adalah topografi di lokasi ini adalah longsor terjadi pada lereng yang relatif seragam, yang menyebabkan longsor relatif panjang. Tanah longsor di Balaroa terjadi di daerah dengan kemiringan yang lebih curam daripada yang diamati di lokasi lain, tetapi ujung longsoran terdapat pada daerah yang sangat datar. Hal ini menyebabkan puing puing bangunan tertumpuk di lokasi ini. Dalam beberapa kasus, beberapa bangunan menjadi tertumpuk satu diatas yang lain (Gambar 3.54) .

4. RINGKASAN DAN KESIMPULAN

Gempa Palu dengan magnitude Mw 7,5 terjadi pada tanggal 28 September 2019 pada jam 18:02 WITA menyebabkan kerusakan struktural dan geoteknis yang signifikan di Palu, Sulawesi Tengah. Banyak kerusakan di sepanjang wilayah pesisir disebabkan oleh tsunami. Penjelasan tentang kerusakan yang disebabkan oleh tsunami disampaikan oleh Robertson et al. (2019) dan Yalciner et al. (2018). Di luar daerah pesisir, kerusakan terjadi terutama disebabkan oleh longsor dan likuifaksi yang terjadi di sepanjang tepi cekungan Palu. Semua longsor dan likuifaksi, dengan pengecualian Balaroo, terjadi di dekat saluran irigasi, yang menyediakan air irigasi untuk mengairi sawah. Tiga dari longsor dan likuifaksi ini terjadi di dalam zona tanah mengalami deformasi yang besar yang luas yang membentang lebih dari 6 km di sebelah selatan Bandara Palu.

Tim survei investigasi awal, yang terdiri dari anggota GEER, HATTI dan PuSGeN telah melakukan survei di Palu, Sulawesi Tengah pada 13 sampai dengan 18 November 2018. Tim ini mengumpulkan berbagai data menggunakan kamera digital, peralatan survei GPS, dan UAV (drone). Data ini dilengkapi dengan wawancara saksi mata dan gambar satelit dari Digital Globe (2018) dan Planet. Geomatik dan data fotogrametri yang dikumpulkan melalui gambar drone dan satelit digunakan untuk menilai pergeseran tanah dan menghasilkan model elevasi digital yang membantu interpretasi fitur geomorfologi.

Catatan dari saksi mata memberikan wawasan tentang pergerakan tanah longsor dan likuifaksi. Berdasarkan uraian dalam buku ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Konsekuensi dari bencana geoteknik paling dahsyat yang berkontribusi hampir 80 persen dari total korban fatal, adalah longsor dan likuifaksi yang terjadi di perumahan padat penduduk. Daerah pemukiman ini terletak di bagian lembah yang digunakan sebagai tanah persawahan atau pernah digunakan untuk persawahan masa lalu.
- b. Semua longsor dan likuifaksi yang terjadi di dekat pertemuan antara endapan kipas alluvial yang berasal dari bukit dan endapan fluvial dari Sungai Palu. Daerah ini memiliki kemiringan yang relatif datar (2 hingga 3 persen), meskipun longsor tampaknya telah dimulai di lokasi yang lebih curam secara lokal dengan lereng antara 4 hingga 6 persen.

- c. Saluran irigasi yang tidak berpelindung lereng, yang digunakan untuk mengalirkan air untuk irigasi sawah menjadi batas timur dari longsor atau deformasi tanah yang besar di sisi timur lembah Palu. Di mana pada transisi antara saluran irigasi yang memiliki pelindung lereng diamati tidak terjadi deformasi yang signifikan.
- d. Untuk ketiga longsor di selatan bandara Palu (Petobo, Jono Oge dan desa Lolu), pergeseran terbesar dan/atau inisiasi longsor terjadi pada elevasi antara +60 sampai dengan +80 m, dan kemiringannya secara lokal lebih besar daripada kemiringan rata-rata (Gambar 3.4) .
- e. *Sand boil* diamati terjadi di dalam batasan semua longsor, dengan pengecualian longsor di Balaroa. Pada daerah luncuran longsor di di Balaroa telah dioperasikan alat berat berupa excavator pada saat tim survei ke lokasi, yang mungkin menghilangkan bukti adanya *sand boil*. *Sand boil* yang diamati secara umum terjadi di daerah rendah di antara blok tanah yang longsor. Ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tegangan air pori di kedalaman dan hanya bisa mencapai permukaan saat blok tanah tergeser secara lateral oleh deformasi dan kehilangan kekangan.
- f. Saksi mata yang diwawancarai di masing-masing lokasi longsor dan likuifaksi mengatakan kepada tim, bahwa longsor dan likuifaksi terjadi setelah gempa bumi berhenti. Jeda ini sepertinya terjadi pada kisaran menit, tetapi sebagian besar saksi mengalami kesulitan menggambarkan yang tepat jeda waktu antara gempa bumi dan awal terjadinya longsor dan likuifaksi. Di Jono Oge dan Balaroa, jeda itu cukup lama bagi orang untuk keluar dari bangunan/rumah dan berlari menuju lapangan terbuka di mana beberapa orang mampu bertahan dari longsor dan likuifaksi dengan naik di blok tanah, tanaman atau di atap bangunan.
- g. Longsor dan likuifaksi menyebabkan runtuhnya saluran di Petobo, Jono Oge dan Sibalaya. Di Jono Oge, lumpur menggenangi banyak pemukiman di bagian hilir yang tidak mengalami longsor. Seorang saksi mata menggambarkan bagaimana keluarganya bisa bertahan hidup dari longsor dan likuifaksi dengan mengendarai rakit terbentuk dari sekelompok pohon pisang, tetapi putranya tersapu oleh aliran lumpur yang mengikuti. Anak tersebut menjadi salah satu dari banyak orang yang dilaporkan hilang setelah gempa bumi.

5. REFERENSI

- ASEAN Coordinating Center for Humanitarian Assistance on Disaster Management (AHA). (2018). *Situation Update No. 15 M7.4 Earthquake and Tsunami Sulawesi, Indonesia*. Situation Report, AHA Center, Jakarta, Indonesia, [https://ahacentre.org/situation-update / situasi-update-no-15-sulawesi-gempa-26-oktober-2018 /](https://ahacentre.org/situation-update/situasi-update-no-15-sulawesi-gempa-26-oktober-2018/), diakses 1 April 2019.
- Antara Foto. (2018). "Dampak Likuifaksi Tanah Pascagempa Sigi." <https://www.antaraneews.com/foto/754873/dampak-likuifaksi-tanah-pascagempa-sigi/2>, diakses 19 Maret, 2019.
- Bellier, O., Sebrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R. Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., Pratomo, I. (2001). "High slip rate for a low seismicity along the Palu-Koro active fault in Central Sulawesi (Indonesia)". *Terra Nove* , 13, 463-470.
- Bellier, O., Sebrier, M., Seward, D., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Putranto, E. (2006). "Fission track and fault kinematics analyses for new insight into the Late Cenozoic tectonic regime changes in West-Central Sulawesi (Indonesia)." *Tectonophysics* , 413, 201-220.
- Boulanger, RW (1990). Liquefaction behaviour of saturated cohesionless soils subjected to uni-directional and bi-directional static and cyclic simple shear stresses. Disertasi, Universitas California, Berkeley.
- Copernicus Emergency Management Service (CEMS) (2018). "[EMSR317] Earthquake in Indonesia. "Grading Maps, CEMS, <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-komponen/EMSR317>, diakses 1 April 2019.
- Digital Globe (2018). "Open Data Program: "Indonesian Earthquake and Tsunami." <https://www.digitalglobe.com/ecosystem/open-data/indonesia-earthquake-tsunami>, diakses 19 Maret 2019.
- Gu, WH, Morgenstern, NR, Robertson, PK (1993). "Progressive Failure of lower San Fernando dam." *Journal of Geotechnical Engineering* , 119 (2), 333-349.
- Hamilton, W. (1979). "Tectonic of the Indonesia Region." *US Geological Survey*, Professional Paper, 1078, 345 pp.
- Hanifa, R. (2018). GEER - HATTI - PuSGeN Joint Survey on Palu Earthquake 2018 (M7.4) 13-18 Nov 2018. Presentasi, Indonesian Ministry of Research, Technology and Higher Education, Jakarta, Indonesia, 12 November 2018.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). " The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. " *Landslides* , 11 (2), 167-194.
- Jakarta Post (2019). "Central Sulawesi disaster killed 4,340 people, final count reveals." <https://www.thejakartapost.com/news/2019/01/30/central-sulawesi-disasters-killed-4340-orang-final-count-reveals.html>, diakses 2 April 2019.

- Joint Research Center (JRC). (2018). "M w 7.5 Earthquake in Indonesia, 28 Sep 2018." JRC Emergency Reporting - Activation # 02, Global Disaster Alert and Coordination System, European Commission. <http://www.gdacs.org/Public/download.aspx?type=DC&id=74>, diakses 1 April 2019.
- Maulana A., Imai, A., van Leeuwen, T., Wantanabe, K., Yonezu, K., Nakano, T., Boyce, A., Page, L., Schersten, A. (2016). "Origin and geodynamic setting of late Cenozoic granitoids in Sulawesi, Indonesia." *Journal of Asian Earth Sciences* , 124, 102-125.
- Robertson, I., Esteban, M., Stolle, J., Takabatake, T., Mulchandani, H., Kijewski-Correa, T., Prevatt, D., Roueche, D., Mosalam, K. (2019). *StEER – Palu Earthquake and Tsunami, Sulawesi, Indonesia: Field Assessment Team 1 (FAT-1) Early Access Reconnaissance Report*. Structural Extreme Events Reconnaissance, DesignSafe-CI, doi:10.17603/DS2JD7T.
- Seed, HB (1979). "Consideration in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams». *Geotechnique* , 29 (3), 215-263.
- Seed, RB, Harder, LF, Jr. (1990). "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength." Proc., HB Seed Memorial Symp., Bi-Tech Publishing Ltd., 351–376.
- Soquet, A. Hollingsworth, J., Pathier, E., Bouchon, M. (2019). "Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7,5 Palu from space geodesy." *Nature Geoscience* , 12, 192-199.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., Spakman, W. (2006). "Microblock rotation and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data." *Journal of Geophysical Research*, 111, B08409.
- Tehusijarana, KM (2018). "Central Sulawesi quake, tsunami inflicted US \$ 911 million in losses: Govt." *The Jakarta Post* , Jakarta, Indonesia.
- Thein, PS, Pramumijoyo, S. Brotopuspito, KS Kiyono, J., Wilopo, W., Furukawa, A., Setianto, A. (2014). "Estimation of Seismic Ground Motion and Shaking Parameters based on Micrometer Measurements at Palu City, Central Sulawesi Province, Indonesia." *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 8 (5), 308-319.
- Valkaniotis, S., Ganas, A., Tsironi, V., Barberopoulou, A. (2018). *A preliminary report on the M7,5 Palu earthquake co-seismic ruptures and landslides using image correlation techniques on optical satellite data*. Eropa-Mediterrania Seismological Center , 1-15.
- van Leeuwen, TM, Muhardjo. (2005). "Stratigraphy and Tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary succession in Northwest Sulawesi, Indonesia: implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi." *Journal of Asian Earth Science*, 25, 481-511.
- Walpersdorf, A., Vigny, C., Subarya, C., Manurung, P. (1998). "Monitoring of the Palu-Koro Fault (sulawesi) by GPS". *Geophysical Research Letters*, 25 (13), 2313-2316.

-
- Watkinson, IM (2011). "Ductile flow in the metamorphic rocks of central Sulawesi." *The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Austria-Asia Collision*, Geological Society of London, 355, 157-176.
- Yalciner AC et al. (2018). *The 28th September 2018 Palu Earthquake and Tsunami: ITST, 07-11 November 2018 Post Tsunami Field Survey Report (Short)*. International Tsunami Survey Team, Internasional Tsunami Information Center, Honolulu, Hawaii.
- Youd, TL, Hoose, SN (1977). "Liquefaction susceptibility and geologic setting." Proc., 6th World Conf. on Earthquake Engineering, Roorkee, India, Indian Society of Earthquake Technology.



RAPID NHERI
Natural Hazards Reconnaissance



Printed in hard cover by :



PuSGeN
National Center
for Earthquake Studies

Kesekretariatan :
Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Gedung Grha Wiksa Praniti, Jl. Turangga No. 5-7, Bandung

ISBN 978-602-5489-19-8



9 786025 489198