

Pengaplikasian Olah Data Penginderaan Jauh, Pendekatan dan Permodelan Geologi dalam Kajian Bencana Likuifaksi di Wilayah Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah

Sinatrya Diko Prayudi^{1,2,*}, Rino Dwi Hutama^{1,2}, Aska Zakiya¹, Thomas Triadi Putranto¹, Devina Trisnawati¹

Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro¹, North East Java Research Section, Universitas Diponegoro², Penulis Koresponden*
geologi@ft.undip.ac.id¹, nejrs@gmail.com², sinatrya.diko@gmail.com

Abstract—Liquefaction is a natural phenomenon on the earth surface of the earth that quite dangerous to deadly if occurs in area with high population density. The case of Sigi Regency which took place on 28 September 2018 as a domino effect of 7,4 magnitude earthquake with an epicenter distance of 80 km from Palu City or 90 km from Petobo area, Sigi Regency. The aftershock that occur propagate below the surface, condensing and mixing loose material that accumulates with ground water when reaches target area. Those disasters had been predicted since 2012 by a number of researchers opened society mind about after impact phenomena from a main disaster that followed. The main result of this research focused on giving simple explanation about how the liquefaction occur in timescale using combination of remote sensing, geoscience data, and 3D-modelling. Through the analyzing of Landsat 8 as main remote sensing data from different acquisition time, it was found that there were significant changes in land use appearance between before and after the disaster. The topography shown through Digital Elevation Model (DEM) data presented both 3D and cross section increase the potential indication for liquefaction material movement that tends to descend the slope, from east to west. The geological approach taken refers to the literature study related to regional condition of study area which includes lithology – sedimentology, and structural geology. The result of the regional geology study found the combination of unconsolidated rocks in form of alluvium (Qa) – Pakuli Formation (Qp) and interaction of Palu – Koro fault line as deriving factor of liquefaction. Another factor such hydrogeology and geotechnical aspect indicated to play a role as a sufficiently strong trigger factor for the disaster to occur. From some aspect above are further overlaid in simple geological 3D-modelling to explain the sequence of events that occur and the role of each factor in causing liquefaction in the case study area.

Index Terms—liquefaction, Sigi Regency, remote sensing, geology approach, simple modelling

I. PENDAHULUAN

Proses geologi yang terjadi di Bumi merupakan sebuah proses alamiah dan membentuk suatu siklus. Siklus yang dimaksudkan mencakup beberapa hal seperti siklus batuan, siklus air, siklus biogeokimia, dan siklus interaksi antara makhluk hidup dengan lingkungan geologi [1]. Dalam proses yang berlangsung, tenaga endogenik atau internal bumi yang bersifat konstruktif seperti vulkanisme dan orogenik selalu diimbangi dengan proses eksogenik dari luar yang cenderung bersifat destruktif seperti pelapukan dan erosi; dimana dalam prosesnya membentuk sebuah siklus.

Permasalahan utama yang terjadi dewasa ini adalah apabila proses geologi tersebut

mempengaruhi aktivitas di sekitarnya. Ketika proses geologi yang berlangsung, terutama yang bersifat destruktif, maka akan dikaitkan dengan fenomena bencana alam. Secara garis besar, bencana alam digambarkan sebagai sebuah fenomena alam yang cenderung membahayakan atau berbahaya apabila menjangkau manusia di sekitarnya, dalam satuan ruang maupun waktu serta dapat membentuk suatu konsekuensi jangka panjang apabila prosesnya masih terus berlangsung secara intensif [2].

Berkaitan dengan bencana alam, negara Indonesia merupakan salah satu yang sering dijuluki negara yang paling rawan bencana. Peninjauan dalam berbagai perspektif seperti: secara klimatologis berada pada kondisi iklim tropis yang memiliki intensitas hujan tinggi dan

geologis dengan latar belakang interaksi 3 lempeng besar (Eurasia – Indo Australia – Pasifik). Beberapa bencana alam yang sering dijumpai kasusnya dan tercatat dalam pendataan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) seperti banjir, tanah longsor, gelombang pasang/abrasi, puting beliung, kekeringan, kebakaran hutan, gempa bumi, tsunami, dan letusan gunungapi.

Salah satu bencana alam yang baru-baru ini terjadi dan cukup mengejutkan Indonesia adalah peristiwa likuifaksi yang terjadi di Provinsi Sulawesi Tengah, tepatnya pada wilayah Kabupaten Sigi dan Kota Palu. Pada tanggal 28 September 2018, gempa dengan kekuatan 7,4 SR menguncang wilayah timur laut Donggala dan memicu dua aktivitas alam yang mematikan, yaitu tsunami dan likuifaksi. Penelitian yang dilakukan berfokus pada kajian likuifaksi yang terjadi.

Likuifaksi sendiri adalah sebuah fenomena yang terjadi saat massa tanah yang kehilangan sebagian besar tahanan geser akibat adanya suatu faktor pembebanan maupun getaran yang bersifat mendadak sehingga menyebabkan bergerak seperti material cair [3]. Dalam prosesnya, beberapa faktor terutama kondisi geologi daerah terkait berperan besar dalam menghasilkan likuifaksi yang menghancurkan wilayah seluas >400 hektar yang umumnya berupa wilayah pemukiman. Dalam penelitian ini, akan dikaji dengan penginderaan jauh mengenai fenomena likuifaksi yang terjadi pada wilayah Kabupaten Sigi secara spesifik. Likuifaksi di wilayah Provinsi Sulawesi Tengah sendiri pada hakikatnya telah diprediksi dari adanya penyelidikan kondisi geologi teknik pada tahun 2012, dimana distribusi daerah yang terdampak secara signifikan masuk dalam wilayah potensinya [4].

Kajian yang dilakukan mencakup analisis perubahan kondisi sebelum, saat, dan setelah kejadian bencana menggunakan pendekatan penginderaan jauh dengan tujuan memahami perubahan kenampakan spektralnya. Selain itu, penggunaan pendekatan geologi sederhana bertujuan untuk memahami karakteristik khas daerah bencana guna lebih mendalami akar masalah yang ditimbulkan. Dari perubahan kondisi permukaan dan karakteristik geologi yang ditemukan, kedua hasil kemudian ditampalkan dengan data DEM untuk menghasilkan permodelan sederhana untuk lebih

menjelaskan terkait pola kejadian yang terjadi pada saat bencana berlangsung maupun yang terjadi setelahnya. Permodelan 3 dimensi sederhana yang dilakukan secara khusus bertujuan untuk memudahkan orang awam dalam memahami perubahan kenampakan permukaan, hubungan kondisi geologi dengan proses yang terjadi, serta gambaran proses yang berlangsung saat sebelum hingga setelah bencana.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian yang dilakukan terkait kajian likuifaksi di Kabupaten Sigi, penggunaan metode yang diaplikasikan mencakup 3 tahapan: analisis data penginderaan jauh, identifikasi kondisi geologi regional, dan permodelan sederhana. Analisis penginderaan jauh yang dilakukan mencakup pengolahan data citra Landsat 8 yang berfokus pada daerah telitian pada Kabupaten Sigi yang diambil pada 3 waktu berbeda [5]: sebelum bencana (20 Maret 2018), beberapa hari pasca kejadian (10 Oktober 2018), dan setelah kejadian dengan rentang panjang (03 September 2019). Fokus analisis ini untuk memahami perubahan tampilan citra yang dihasilkan serta kaitannya dengan likuifaksi. Analisis berikutnya terkait kajian geologi regional sederhana yang mencakup identifikasi kondisi topografi yang berdasarkan data citra *Digital Elevation Model* (DEM), kondisi formasi batuan ditinjau dari data peta geologi dan keadaan struktur geologi yang berkaitan dengan aspek tektonik regional yang berhubungan dengan pemicu terjadinya likuifaksi. Melalui hasil yang telah dipaparkan di atas, permodelan sederhana secara tiga dimensi (3D) dilakukan dengan mengacu gabungan tiap basis data terkait dengan mekanisme kejadian likuifaksi tersebut. Dalam pemrosesan datanya, digunakan tiga jenis perangkat lunak: *ENVI 5.1*; *Google Earth Pro*; dan *ArcGIS 10.3*.

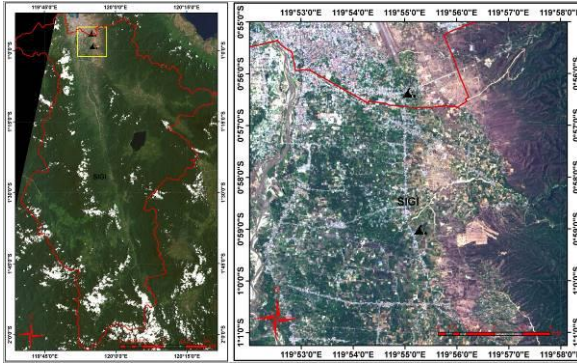
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Data Penginderaan Jauh

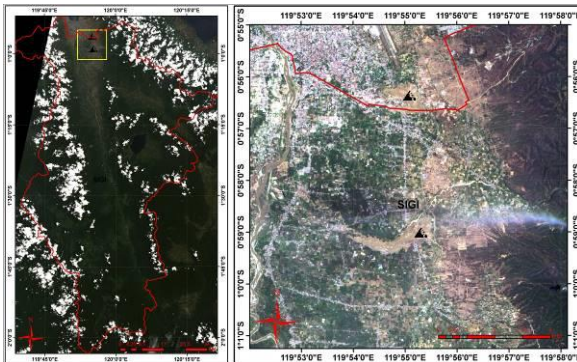
Data penginderaan jauh yang digunakan dalam analisis terkait adalah data citra Landsat 8 dari 3 waktu yang berbeda. Masing-masing data memiliki basis *metadata*: LC08_L1TP_114061_20180308_20180320_01_T1_MTL, LC08_L1TP_114061_20181002_20181010_01_T1_MTL, & LC08_L1TP_114061_20190903_20190903_01_RT_MTL. Data yang diolah menggambarkan kondisi daerah yang terdampak pada sebelum (Gambar 1), setelah (Gambar 2), dan selang beberapa bulan pasca kejadian (Gambar 3).

Berdasarkan analisis data yang dilakukan, terdapat perubahan signifikan dari kenampakan citra pada waktu sebelum kejadian (20 Maret 2018) dengan beberapa saat setelah kejadian (10 Oktober 2018). Simbol titik longsor berwarna hitam pada gambar menunjukkan titik terjadinya likuifaksi pada kejadian 28 September 2018 lalu. Kenampakan yang berubah adalah munculnya aliran material rombakan berwarna kecoklatan yang seperti mengalir dari arah timur ke barat.

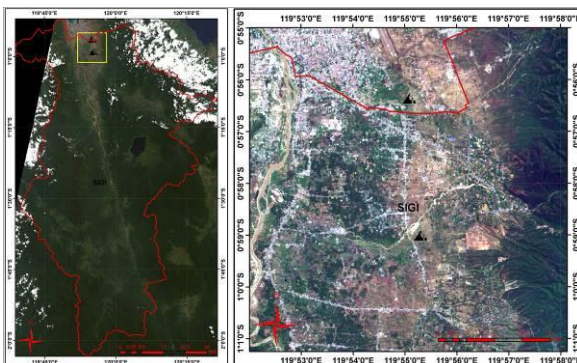
Karakteristik aliran material hasil likuifaksi



Gambar 1. Inset peta (kiri) dan kenampakan hasil olah data citra Landsat 8 pada 20/03/2018; dimana kenampakan permukaan belum mengalami perubahan pada lokasi yang ditandai (kanan)



Gambar 2. Inset peta (kiri) dan kenampakan hasil olah data citra Landsat 8 pada 10/10/2018; dimana muncul kenampakan aliran likuifaksi berwarna kecoklatan pada lokasi yang ditandai (kanan)



Gambar 3. Inset peta (kiri) dan kenampakan hasil olah data citra Landsat 8 pada 03/09/2019; dimana kenampakan aliran permukaan yang mulai berubah warna kehijauan akibat ditumbuhi vegetasi di permukaan

yang muncul pada dua titik secara spesifik berbeda, baik kedudukan administrasi maupun bentukannya. Wilayah yang masuk dalam titik di bagian utara bukan menjadi bagian dari Kabupaten Sigi, namun bagian dari Kota Palu secara administratif. Selain itu, kenampakan aliran dari material “tanah cair” yang membawa beragam komponen baik bangunan, vegetasi, hingga manusia tersebut berbeda secara tampilan. Hasil likuifaksi pada bagian utara terlihat lebih besar nilainya secara dimensi lebar (1,05 km), namun pendek secara dimensi panjang (1,12 km). Sebaliknya, untuk hasil dari proses likuifaksi di bagian selatan (wilayah Kabupaten Sigi) secara dimensi lebar lebih pendek (0,9 km) dan dimensi panjangnya bernilai besar (2,95 km).

Melalui identifikasi arah dari kedua hasil likuifaksi memiliki kesamaan kinematik, yaitu dari bagian timur dan bergerak relatif ke arah barat. Meskipun demikian, hasil likuifaksi di bagian selatan mengalami sedikit perubahan kinematik dari titik awal di timur kemudian menuju barat daya sejauh 1,75 km dan membelok ke arah barat laut sejauh 1,2 km (total panjang 2,95 km). Adanya mekanisme pembelokan arah tersebut memunculkan adanya dugaan faktor khusus yang berpengaruh.

Perbandingan kenampakan hasil olah data citra berikutnya adalah antara hasil perekaman tanggal 10 Oktober 2018 dengan perekaman tanggal 03 September 2019. Terdapat kenampakan kontras dimana wilayah yang sebelumnya terdapat material likuifaksi berwarna kecoklatan kemudian berubah warna menjadi berwarna kehijauan. Perubahan warna tersebut memberikan indikasi bahwa material sisa bencana tersebut seiring berjalannya waktu mulai ditumbuhi vegetasi. Hal ini terlihat kontras antara warna hijau vegetasi baru yang mengikuti arah aliran material hasil dari likuifaksi sebelumnya yang lebih muda dibandingkan vegetasi hijau di sekitarnya dengan warna yang lebih tua.

B. Identifikasi Kondisi Geologi Regional

Dalam kajian mengenai kondisi geologi regional daerah Kabupaten Sigi yang mengacu pada data studi literatur, terdapat beberapa hal yang secara langsung maupun tidak langsung berhubungan dengan proses likuifaksi yang berlangsung pada tanggal 28 September 2018 lalu. Tidak dapat dipungkiri bahwa bencana ini melibatkan adanya peran kondisi alam yang menjurus pada karakteristik geologi daerah

sekitarnya. Pada bagian ini, terdapat beberapa aspek geologi yang dikaji: geomorfologi, formasi batuan, struktur tektonik, dan beberapa aspek tambahan seperti kondisi airtanah dan keteknikan.

Aspek pertama yang dikaji terkait dengan karakteristik geomorfologi yang berhubungan dengan likuifaksi pada wilayah telitian. Dalam prosesnya, digunakan basis data *Digital Elevation Model* (DEM) yang bersumber dari DEMNAS dengan resolusi 5 meter [6]. Target utama analisis data geomorfologi berada pada batasan wilayah seluas 130 km². Rentang nilai dari elevasi pada fokus daerah yang terdampak likuifaksi berada pada nilai 1,21 sampai 573 meter di atas muka laut. Hasil dari proses *slope analysis* didapatkan dua variasi hasil nilai kelerengan: *percent rise* dan *degree* yang mana nilai rentang tiap kelas kelerengannya didasarkan pada klasifikasi kelerengan [7]. Dari hasil nilai yang dihasilkan dari *slope analysis* (2 – 16° dan 2 – 70%) maupun tampilan dari nilai elevasinya seperti pada tampilan Gambar 4, daerah yang difokuskan tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan namun secara relatif mengalami penurunan.

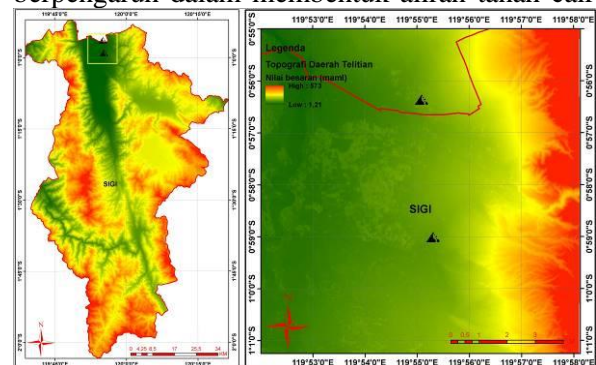
Berdasarkan hasil pembuatan profil penampang melintang (Gambar 5 dan 6), dapat dilihat bahwa titik puncak terjadinya likuifaksi berada pada nilai yang lebih tinggi pada bagian timur dan lebih rendah pada bagian barat; membentuk sebuah lereng yang menyebabkan material tersebut bergerak turun ke arah barat. Keberadaan anomali tinggi pada titik likuifaksi di bagian selatan diduga kuat yang memicu adanya pembelokan arah materialnya dari semula berarah Baratdaya menjadi Baratlaut.

Aspek kedua yang dikaji adalah kondisi litologi regional, dalam hal ini formasi batuan pada wilayah telitian. Berdasarkan peta geologi lembar Palu [8], Poso [9], dan Pasangkayu [10]; terdapat 13 formasi batuan yang secara garis besar berupa variasi batuan beku intrusi maupun ekstrusi, batuan sedimen klastik, batuan malihan, dan endapan sedimen. Fokus daerah penelitian mencakup 4 unit formasi batuan, yaitu Aluvium dan Endapan Pantai (Qa), Formasi Pakuli (Qp), Formasi Latimojong (Kls), dan Kompleks Batuan Metamorfik (Km). Titik lokasi terjadinya bencana likuifaksi berada pada dua karakteristik formasi, dimana bagian utara yang diduga pada endapan aluvium dengan komposisi material berukuran pasir, lempung, kerikil dan kerakal; sedangkan bagian selatan yang berupa Formasi Pakuli dengan karakter batuan berupa

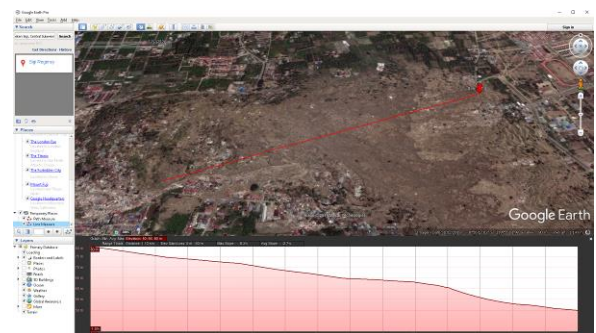
konglomerat dan batupasir, serta setempat batulempung karbonan (Gambar 7).

Aspek ketiga yang dikaji dalam kaitan dengan likuifaksi adalah struktur tektonik regional. Dalam aspek ini, keberadaan struktur geologi aktif dalam wilayah penelitian diduga kuat berpengaruh dalam memicu likuifaksi. Mengacu pada kondisi struktur regional yang terdapat pada daerah telitian (Gambar 8), terdapat struktur aktif berupa sesar Palu – Koro dengan arah Utara – Selatan dan beberapa Barat daya – Timur laut. Keberadaan sesar ini apabila ditinjau pada Gambar terletak pada bagian tengah dari daerah rendahan pada wilayah Kabupaten Sigi [11].

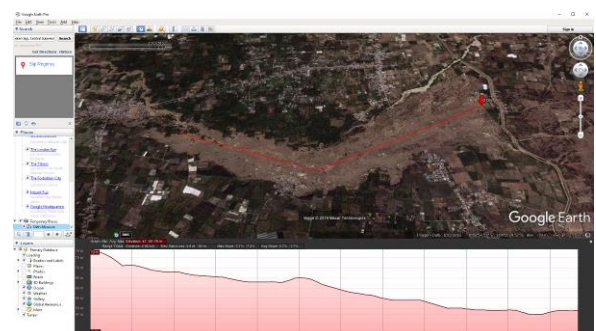
Selain aspek geologi utama yang berperan dalam memicu bencana likuifaksi, terdapat beberapa komponen lain yang tidak kalah berpengaruh dalam membentuk aliran tanah cair



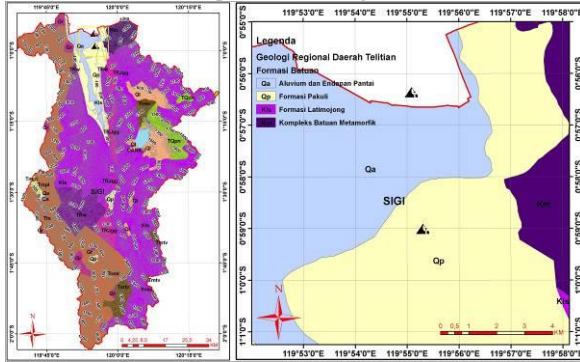
Gambar 4. Karakteristik topografi daerah Kabupaten Sigi (kiri) dan fokus daerah yang terdampak likuifaksi (kanan) dimana kondisinya relatif landau hingga miring



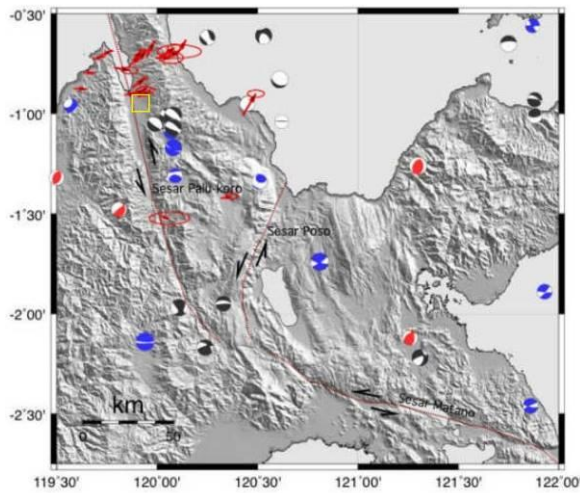
Gambar 5. Kenampakan profil melintang dari bencana likuifaksi pada titik di bagian utara



Gambar 6. Kenampakan profil melintang dari bencana likuifaksi pada titik di bagian selatan



Gambar 7. Kondisi formasi batuan regional dari Kabupaten Sigi (kiri) dan wilayah fokus daerah studi yang terdampak likuifaksi (kanan) yang secara umum tersusun atas batuan berumur muda



Gambar 8. Kondisi struktur aktif yang ada pada wilayah Palu dan fokus daerah terdampak likuifaksi (kotak kuning) yang relatif dekat dengan jalur patahan

pada tanggal 28 September 2018 lalu. Aspek tambahan pertama adalah kedalaman muka air

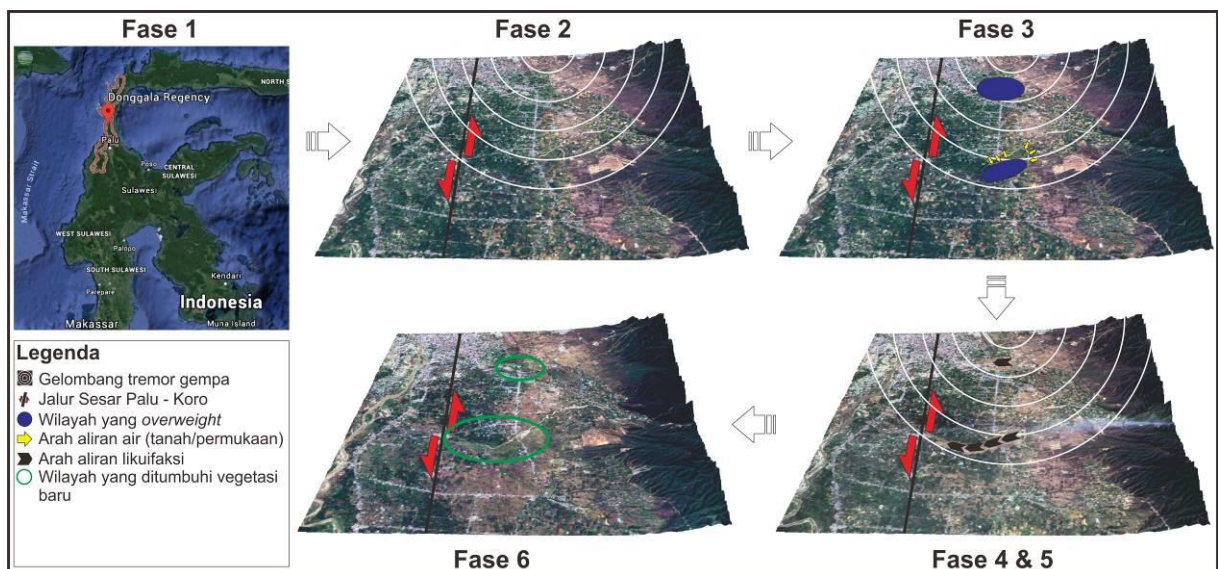
tanah pada kedua formasi batuan di atas yang relatif dangkal pada kisaran 0,5 – 16 meter [4].

Aspek tambahan kedua adalah nilai daya dukung yang diijinkan kemungkinan terlampaui batas, dimana antara satu satuan dengan satuan lain berbeda. Untuk kedua formasi batuan, satuan endapan pasir bernilai 10,958 – 60,767 ton/m², lanau bernilai 7,717 – 18,493 ton/m², dan lempung bernilai 9,944 – 18,744 ton/m² [4].

C. Permodelan Sederhana Terkait Likuifaksi

Dalam memahami mekanisme yang menyebabkan terjadinya likuifaksi di wilayah Provinsi Sulawesi Tengah, khususnya Kabupaten Sigi; disusunlah beberapa runtutan kejadian dari mulai kondisi asal hingga berlalunya bencana disesuaikan dengan dugaan aspek yang berpengaruh pada bahasan sebelumnya. Berikut adalah urutan kejadian yang dijabarkan serta dimodelkan dalam Gambar 9.

- Munculnya aktivitas gempa pada tanggal 28 September 2018 yang berpusat di wilayah sebelah Utara fokus telitian (Fase 1)
- Getaran dari gempa merambat dengan cepat di permukaan secara horizontal dan mempengaruhi wilayah sekitarnya bahkan yang jauh dari pusat gempa (Fase 2)
- Getaran yang dihasilkan ditambah permukaan serta pembebanan pada permukaan/*overburden* memicu proses pencairan material tidak terkonsolidasi baik kode Qa maupun Qp (Fase 3)



Gambar 9. Permodelan sederhana dari sistematika terjadinya likuifaksi di bagian wilayah Kabupaten Sigi mulai dari kejadian awal (Fase 1) hingga kondisi terbaru (Fase 6) dengan pola perubahan yang tergambar dari kenampakan spektral serta basis menggunakan data citra dan DEM

- Material cair tersebut bergerak mengikuti arah kemiringan lereng sehingga membentuk aliran material likuifaksi (Fase 4)
- Material yang mengalir berhenti pada kondisi dimana kelerengan menjadi landai atau pada kondisi kembalinya tahanan geser material hasil likuifaksinya yang sebelumnya hilang (Fase 5)
- Seiring berjalannya waktu pasca kejadian, material hasil aliran likuifaksi mulai ditumbuhi vegetasi baru pada bagian permukaannya (Fase 6).

Hasil permodelan yang dilakukan di atas secara spesifik memperkuat peneliti terdahulu [4] yang melakukan kajian terkait dengan bahaya likuifaksi pada wilayah penelitian. Dalam penelitian yang dilakukan sebelumnya, peneliti berfokus memberikan data geosains terkait dengan asumsi penyebab likuifaksi. Hasil penelitian yang dijabarkan di atas memberikan gambaran sederhana terkait hubungan data yang telah dikumpulkan sebelumnya, dikomparasi dengan data penginderaan jauh serta dibuat permodelan tiga dimensi sebagai media informasi yang lebih membantu dalam menjelaskan masalah yang terjadi secara mudah.

IV. SIMPULAN

Bencana likuifaksi yang terjadi pada beberapa wilayah di Sulawesi Tengah, terutama Kabupaten Sigi pada 28 September 2018 lalu merupakan salah satu bencana yang cukup mengejutkan namun bukan menjadi hal baru di Indonesia dan menarik untuk dikaji proses terjadinya. Penggunaan metodologi yang meliputi analisis data penginderaan jauh, identifikasi kondisi geologi regional, dan permodelan sederhana. Melalui olah data citra penginderaan jauh, dapat diketahui bahwa dari tiga data citra yang diolah, terjadi perubahan signifikan pada saat sebelum (20 Maret 2018), beberapa hari setelah (10 Oktober 2018), maupun selang beberapa bulan setelah kejadiannya (03 September 2019). Lebih lanjut, dengan memahami aspek geologi regionalnya; dapat diketahui kondisi – kondisi yang mempengaruhi likuifaksi seperti pola kelerengan morfologi yang melandai ke barat, karakter formasi batuan yang belum terkonsolidasi, dan kedekatan lokasi bencana

dengan jalur sesar Palu – Koro. Aspek lain seperti kondisi air tanah yang dangkal dan kondisi keteknikan juga ikut mempengaruhi bencana terkait. Melalui permodelan yang dilakukan terkait kondisi tersebut dapat dirumuskan sistematika likuifaksinya dalam 6 fase.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih terutama kepada dosen pembimbing penelitian dari Departemen Teknik Geologi Universitas Diponegoro atas nama Bapak Thomas Triadi Putranto dan Ibu Devina Trisnawati. Selain itu, ucapan terima kasih juga disampaikan kepada setiap pihak yang menjadi referensi dalam riset yang dilakukan penulis serta pihak lain yang tidak dapat disebutkan nama serta gelarnya satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R.J. Hugget, 2007. *Fundamental of Geomorphology (2nd edition)*. USA and Canada: Routledge.
- [2] I. Alcantara-Ayala, 2002. "Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries", *J. Geomorphology*, 47. 107-124.
- [3] J.A. Sladen, R.J. D'Hollander, dan J. Krahn, 1985. The liquefaction of sands, a collapse surface approach, *Canadian Geotechnical Journal*, 22, No.4, 564-578.
- [4] R. Widyaningrum, 2012. *Penyelidikan geologi teknik potensi likuifaksi daerah Palu, Provinsi Sulawesi Tengah*, Badan Geologi.
- [5] USGS. 2019. Earth Explorer. earthexplorer.usgs.gov, diakses pada 1 September 2019.
- [6] Anonim, 2019. DEMNAS Seamless Digital Elevation Model (DEM) dan Batimetri Nasional, <http://tides.big.go.id/DEMNAS/Sulawesi.php>, diakses pada 1 September 2019.
- [7] R.A. van Zuidam, 1985. *Aerial photo – interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Netherland: Smits Publishers, The Hague.
- [8] R. Sukamto, H. Sumadirdja, T. Suptandar, S. Hardjoprawiro, dan D. Sudana, 1994. *Peta geologi lembar Palu, Sulawesi*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- [9] T.O. Simandjuntak, Surono, dan J.B. Supandjono, 1997. *Peta geologi lembar Poso, Sulawesi*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

- [10] Sukido, D. Sukarna, dan K. Sutisna, 1993. *Peta geologi lembar Pasangkayu, Sulawesi*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- [11] M. Irsyam, dkk., 2010. *Peta Zonasi Gempa Indonesia*, Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.