

## IMPLEMENTASI DATA MINING UNTUK PEMETAAN DAN PREDIKSI LIQUEFACTION AKIBAT GEMPA PALU

Andri Irfan Rifai<sup>1)</sup>, Eko Prasetyo<sup>2)</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan, Universitas Internasional Batam

email: andrirfan@yahoo.com

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Tadulako

email: prasetyo.eko.galih@gmail.com

### Abstract

*The 2018 Palu-Sigi-Donggala earthquakes in Center Celebes have caused significant damage to many residential houses due to varying degrees of soil liquefaction over a very wide extent of urban areas unseen in past destructive earthquakes. While soil liquefaction occurred in Palu and Sigi, thus providing researchers with wide range of characterize soil and site response to large-scale earthquake shaking. One of important learn issues is prediction of liquefaction. Prediction of liquefaction is also a complex problem as it depends on many different physical factors, and the relations between these factors are highly non-linear and complex. Most of these approaches are based on classical statistical approaches and neural networks. In this paper a new approach which is based on classification data mining (DM) is proposed. The proposed approach is based on historical data from the field and sciences portal. The proposed algorithm is also compared with several other DM algorithms based on rminer. It is shown that the proposed algorithm is very effective and accurate in prediction of liquefaction.*

**Keywords:** liquefaction, data mining, prediction

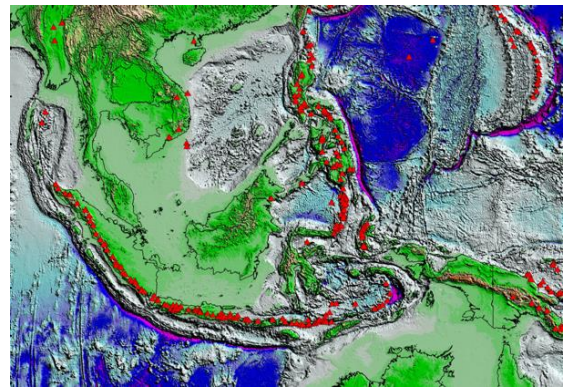
## 1. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Pulau Sulawesi adalah salah satu pulau besar yang tersebar di perairan Indonesia. Pulau berbentuk huruf K ini berada di bagian timur Indonesia yang merupakan pertemuan lempeng tektonik Eurasia, Indo Australia dan Pacific. Pertemuan ketiga lempeng tersebut menimbulkan subduksi dan tumbukan yang sangat aktif sehingga menimbulkan permasalahan yang cukup kompleks.

Lempengan di wilayah Asia Tenggara tersebut merupakan hasil evolusi tektonik yang berjalan puluhan ribu tahun. Aktifitas tektonik berlangsung dan berpusat di Indonesia, Malaysia, New Guinea, dan Australia bagian utara (Hall & Spakman, 2015). Kawasan geologi yang kemudian terbentuk, sampai saat ini tetap menyisakan kondisi yang masih sangat menarik untuk dipelajari. Berbagai aktifitas tektonik terus berlangsung. Selain itu, aktifitas vulkanik turut tidak mau ketinggalan seperti dapat dilihat pada gambar 1 yang memperlihatkan sebaran vulkanik yang memanjang dari Pulau Sumatera, Selat Sunda,

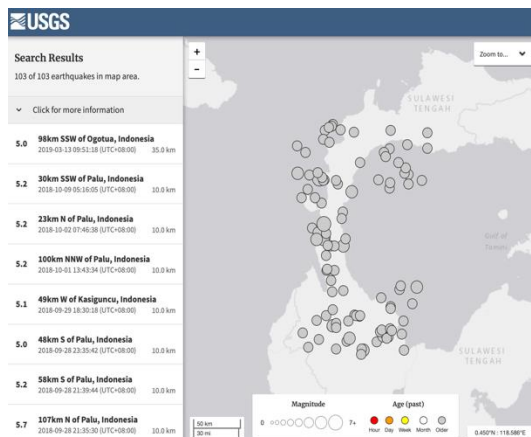
Pulau Jawa, Pulau Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan menerus ke Kepulauan di Kawasan Negara Philipina.



Gambar 1. Sebaran tiga lempeng utama  
Hall & Spakman (2015)

Aktifitas vulkanik dan tektonik di area Pulau Sulawesi tersebut mendorong aktifitas gerakan lempeng yang dikombinasikan dengan patahan Koro membuat area ini sangat aktif (Thein et al., 2015). Dari penelusuran di *sciences portal* USGS dalam 100 tahun terakhir terjadi 104 kali gempa dengan magnitudo >5. Sebaran wilayah yang tidak terlalu luas seperti

terlihat pada gambar 2 menyebabkan intensitas pengaruh yang diterima oleh satu titik cukup signifikan.

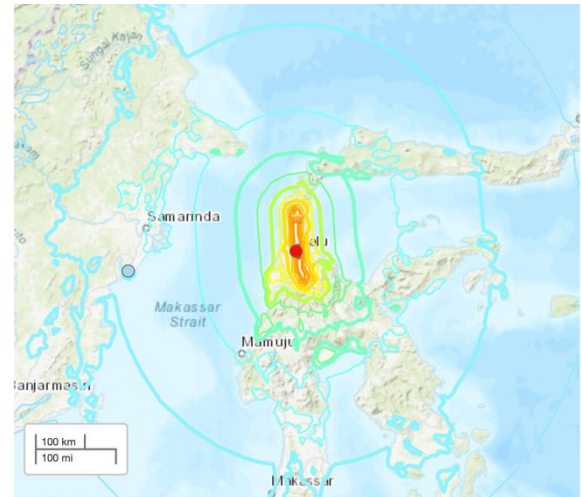


Gambar 2. Gempa dalam 100 tahun terakhir USGS (2019)

Dari sejumlah gempa tersebut, apabila dikelompokkan kedalam skala terbesar maka dapat dilihat beberapa dengan karakteristik yang cukup menarik untuk dipelajari, yaitu

1. Terjadi pada tanggal 28 September 2018 Jam 10:02:45 (UTC); dengan lokasi 0.256°S 119.846°E; Skala 7,5; dengan kedalaman 20 km.
2. Terjadi pada tanggal 10 Oktober 1998 Jam 16:32:19 (UTC); dengan lokasi 0.403°S 119.840°E; skala 6.0 kedalaman 33 km
3. Terjadi pada tanggal 6 April 1965 Jam 09:42:29 (UTC); dengan lokasi 0.463°S 120.039°E; skala 6.3; kedalaman 25 km.

Gempa yang terjadi pada tanggal 28 September cukup mengagetkan seluruh kalangan, karena gempa tersebut diiringi oleh gelombang tsunami dan *liquefaction* dengan korban jiwa ribuan orang. Pengaruh gempa tersebut cukup besar karena pusat gempa terjadi tidak terlalu dalam dan frekuensi gempa cukup intens. Pada gambar 3, dapat dilihat sebaran gempa yang terjadi. Serva et. al., (2016) menyatakan bahwa intensitas gempa yang terjadi dapat diukur melalui skala dengan pertimbangan kejadian, ukuran dan distribusi luas efek lingkungan gempa. Selain itu salah satu hal yang menarik adalah bentuk epistrium gempa yang terbentuk adalah mengarah ke Kota Palu.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL. (cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Gambar 3. Instrumental intensity gempa Palu USGS (2019)

Wilayah Palu mendapatkan pengaruh terbesar saat gempa tersebut terjadi, selain karena intensitas gempa yang cukup tinggi hal ini juga dipengaruhi oleh keberadaan sesar palu-koro yang membelah dua area kota ini. Sesar ini merupakan sesar aktif yang memanjang dari Sulawesi bagian tengah hingga selat karimata (Mallick, 2018). Socquet et. al.,(2019) memperkirakan sesar ini bergerak secara aktif dengan pergeseran 41-45 mm/tahun.

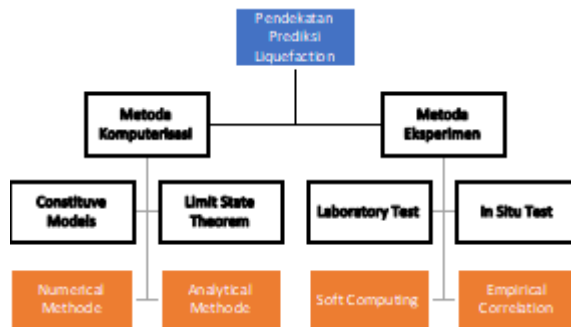
*Liquefaction* yang terjadi sesaat setelah gempa terbesar mengguncang Kota Palu masih menyisakan berbagai pertanyaan yang menarik, mulai dari area yang terkena serta bentuk *liquefaction* yang terjadi juga cukup bervariasi. Ada 4 (empat) area dengan pengaruh *liquefaction* terbesar, yaitu Petobo, Balaroa, Jono Oge dan Sibalaya. Dalam teori baku disebutkan bahwa *liquefaction* dapat terjadi apabila tanah pasir (*sand*, *silty sand*, *clayey sand*) yang sedikit mengandung lempung dan bergradasi cenderung seragam.

## B. Kajian Metoda Prediksi

Beberapa pendekatan prediksi *liquefaction* terus berkembang dalam beberapa dekade terakhir ini. Salah satunya Al Bawwab (2005) mulai mengelompokkan beberapa pendekatan yang dapat digunakan dalam melakukan prediksi kejadian *liquefaction*, yaitu:

1. Analisis numerik elemen hingga;
2. *Simplified analytical methods*;

3. *Soft computing methods*;  
 4. Metoda empiris, berbasis test lapangan, laboratorium dan statistik.  
 Selanjutnya pada tahun 2013, Kalantari et. al., menyederhanakan berbagai pendekatan di atas kedalam bentuk diagram seperti dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Klasifikasi pendekatan prediksi  
 Kalantari et. al. (2013)

Mengikuti alur berpikir pendekatan konsep yang disajikan pada gambar 4, ada dua pendekatan mendasar yang dijelaskan, yaitu pendekatan komputasi dan pendekatan eksperimental. Pendekatan yang terakhir, diuraikan bahwa hasil uji laboratorium dan lapangan digunakan sebagai satu rangkaian data *history* yang dapat digunakan untuk mengembangkan korelasi empiris. Sedangkan dalam metoda komputasi, parameter dasar dimasukkan ke dalam model analitik atau numerik untuk melakukan prediksi terhadap tren yang terjadi.

Pendekatan *numerical method* dan *analytical method* sudah sangat banyak dikembangkan dan digunakan dalam melakukan perhitungan dan prediksi fenomena geoteknik. Tingkat keberhasilan dengan metoda ini cukup tinggi, namun memerlukan langkah perhitungan yang cukup rumit dan memerlukan analisa berulang. Salah satu metoda yang dapat digunakan adalah metoda elemen hingga (*finite element*) (Galavi, Petalas & Brinkgreve, 2013; Mohammadnejad & Andrade, 2015).

Dinamika karakter geoteknik yang terjadi dalam *liquefaction* cukup tinggi, sehingga diperlukan metoda yang lebih dapat akomodatif dibandingkan sekedar analisa numerik atau sejenisnya. Menyikapi hal tersebut, berbagai pendekatan *soft computing* dan *empirical correlation* mulai dikembangkan.

Beberapa pendekatan yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya adalah model untuk menilai *liquefaction lateral spreading*.

(Javadi, Rezanah, & Nezhad, 2006; Goh & Zhang 2014). Selanjutnya model model empiris dengan pendekatan *lateral displacement index* (Zhang, Robertson & Brachman 2004; Franke, et al., 2016).

Terakhir, pendekatan terkini berupa metoda populer berupa model *fuzzy logic*, *neuron computing*, *probabilistic reasoning* and *genetic algorithms* (Goharriz & Marandi, 2016). Pendekatan fuzzy logic tersebut kemudian dikembangkan dan dipertajam dengan *artificial neural networks* (Shahri, 2016; Sulewska 2017).

Memperhatikan keberadaan data serta pencatatan fenomena gempa dan *liquefaction* yang cukup massif belakangan ini, maka diperlukan pendekatan teknologi terkini agar sekumpulan data yang telah dikumpulkan tersebut dapat dimanfaatkan secara terstruktur dan terukur guna mendukung sistem mitigasi risiko yang lebih baik melalui interpretasi dan prediksi data yang akurat. DM merupakan salah satu pendekatan terkini yang mampu melakukan interpretasi yang cukup akurat dalam memprediksi tren teknis terkini (Rifai, et al., 2015).

Setelah proses interpretasi data dan prediksi tren dilakukan, selanjutnya perlu dilakukan optimasi mitigasi sejak awal, sehingga faktor keberhasilan yang mempengaruhinya berupa data teknis dapat dicatat, diarsip, dan dievaluasi. Berkaitan dengan hal tersebut Rifai, et al. (2016) telah menyusun model optimasi dengan memanfaatkan teknologi informasi yang didukung kombinasi pendekatan matematika dan optimasi *genetic algorithm*. Walau pendekatan tersebut untuk pendekatan teknis lain, namun konsep pendekatannya tetap dapat diacu sebagai pembentuk tren.

Dari berbagai uraian perkembangan metoda prediksi di atas, dalam paper ini diusulkan pendekatan baru yang mengusulkan manfaat kombinasi metoda empiris dan metoda optimasi dengan mempertimbangkan berbagai *variable independent* yang menjadi satu kesatuan dengan keilmuan geoteknik.

## 2. METODA PENELITIAN

Dalam penelitian ini diperlukan sebuah pendekatan untuk mengintegrasikan data empiris kejadian *liquefaction* dan *test in situ* kondisi tanah serta hasil pengukuran *topographic*. Tujuan pemodelan yang

dikembangkan dapat membuat perubahan rencana mitigasi yang lebih akurat pada saat yang diperlukan, pada lokasi yang ditetapkan, dan jenis penanganan yang ingin diterapkan secara interaktif dan dapat menunjukkan dampaknya terhadap dinamika kondisi geoteknik. Hal ini memungkinkan *stake holder* dapat melakukan analisa secara lebih efektif agar bisa mendukung proses mitigasi dengan lebih baik.

#### A. *Data Entry dan Acquisition*

Data merupakan salah satu komponen penting dalam DM, metoda yang tersedia untuk menambah atau memperoleh data adalah hal yang terpenting. Metoda untuk mencapai hal tersebut adalah:

1. *Import* informasi digital yang tersedia dengan format yang kompatibel;
2. Menggunakan data tersedia [salah satunya dapat menggunakan USGS];
3. Digitalisasi data analog.

Di satu sisi, perkembangan teknologi informasi dengan munculnya informasi digital dan pangkalan data telah membuat akses data menjadi lebih mudah, khususnya yang berbasis GIS, *science data catalog*, *geologic map*. Selain itu kompatibilitas antara perangkat lunak semakin umum, yang memungkinkan untuk mengkonversi data yang berasal dalam satu perangkat lunak untuk digunakan dalam format lain. Format seperti CAD (misalnya, DWG, DXF), *vectorial* dan raster, data yang secara luas digunakan GIS komersial (ARC/Info, ARC/View, Intergraphe MGE, dan lain lain), dan data citra umum (misalnya, tiff, bmp, dan lain lain).

Disamping itu saat ini dikenal secara luas sebuah metoda untuk akuisisi data *geological map* adalah dengan penggunaan *DM-bridge*. Metoda tersebut dilakukan dengan berbagai keperluan, seperti pemetaan, menentukan koordinat penanganan, menentukan luasan kejadian dan sebagainya. Data yang digunakan untuk melakukan simulasi kejadian adalah data gempa di Palu dan sekitarnya, sedangkan untuk simulasi *interface* menggunakan pemetaan gempa sesar palu-koro..

#### B. *Implementasi dan Analisa Pemetaan*

Di antara berbagai kemampuan DM, analisa *neural* adalah tahapan penting dalam penelitian ini. Analisis terbatas dilakukan pada

data yang *vectorial*, karena penggunaannya dapat menggambarkan prediksi atas historis yang ada, yang didefinisikan sebagai serangkaian fitur yang saling berhubungan, mewakili karakteristik geologi. Pemetaan, penggambaran, dan presentasi cakupan wilayah dengan metoda konvensional dapat menyebabkan kurang akuratnya pengambilan keputusan. Aplikasi *open source* yang digunakan ini memiliki kemampuan dan fasilitas dalam berintegrasi dengan berbagai sistem.

Perangkat lunak aplikasi sistem informasi yang digunakan dalam penelitian ini diimplementasikan dari *data import* pada portal USGS *science for a changing world*, kemudian menggunakan algoritma *rminer* dilakukan analisa lanjutan.

#### C. *Tahapan Analisis dan Prediksi*

Dalam melakukan analisis dan prediksi, tahapannya melalui beberapa langkah, yaitu sebagai berikut:

1. Kriteria histories  
Informasi kejadian gempa yang kemudian diikuti oleh kejadian *liquefaction* dapat diperoleh dari catatan data lapangan, data satelit atau data yang disediakan pada *portal sciences* tertentu. Kejadian *liquefaction* memang berhubungan dengan besaran magnitude gempa, namun hal tersebut bukan jaminan kepastian akan terjadi *liquefaction*.
2. Kriteria geologi  
Proses geologi yang membentuk tanah terdiri dari distribusi butiran yang seragam dan endapan tanah dalam kondisi lepas memiliki kerentanan *liquefaction* yang tinggi. Timbunan, tanah tersaturasi, reklamasi, bendungan hidrolik dan sejenisnya perlu digambarkan secara utuh, untuk mengetahui potensi *liquefaction* yang mungkin akan terjadi.
3. Kriteria komposisi  
Tanah dengan gradasi yang baik umumnya memiliki potensi yang rendah terjadinya *liquefaction*. Kriteria gradasi, komposisi, bentuk partikel, dan sejenisnya diperlukan sedetail mungkin.

#### D. *Data Mining Task*



*DM task* disusun berdasarkan kemampuan DM dalam menyelesaikan berbagai permasalahan dengan interpretasi dan operasi statistik lainnya terhadap data (Freitas, Tergantung pada jenis pola yang ditemukan, DM task biasanya diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu prediktif dan deskriptif. Pendekatan prediktif melakukan inferensi pada data untuk memprediksi nilai-nilai yang tidak diketahui dari variabel output, dengan mempertimbangkan nilai-nilai yang diketahui dari variabel input (Wu et al., 2014). Sedangkan pendekatan deskriptif untuk mengkarakterisasi dan merangkum berbagai sifat umum dari data dalam rangka meningkatkan pemahaman dan pemberian informasi yang luas. Kemampuan DM task sangat tergantung dari kemampuan pengguna dalam melakukan identifikasi awal sebuah permasalahan dan tujuan penyelesaiannya.

#### E. R Tools untuk DM

R adalah unit software yang terintegrasi dengan beberapa fasilitas untuk melakukan rekayasa komputasi dengan kemampuan perhitungan dan kinerja grafis yang handal. R adalah kelompok dari bahasa pemrograman S, dikembangkan oleh AT & T Bell Laboratories (sekarang Lucent Technologies) pada akhir 1970an. R adalah versi gratis dari bahasa S *software* yang mirip dengan S-PLUS, yang secara luas digunakan oleh para peneliti dan akademisi dalam kegiatan ilmiah. Lingkungan R adalah *open source* dan merupakan bahasa pemrograman matrik tingkat tinggi, secara luas digunakan untuk analisis data dan statistik. R memiliki kemampuan melakukan operasi statistik (*linier* dan pemodelan *non-linier*, uji statistik klasik, klasifikasi, *clustering*, dan lain sebagainya), grafis, *object oriented design*, pemrograman *flexible*. Aplikasi ini juga dibuat mudah *extensible* dengan penciptaan aplikasi baru yang dapat diterapkan melalui pengembangan package. Komunitas R sangat aktif dan package baru terus dikembangkan. Sehingga dalam perspektif ini, R dapat *open source* untuk berbagi algoritma di seluruh dunia (Cortez, 2010). Salah satu package tersebut adalah *r-miner* yang tersedia di <http://www3.dsi.uminho.pt/pcortez/rminer.html>, dengan tujuan memfasilitasi penggunaan algoritma DM untuk menjalankan klasifikasi dan regresi.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dalam menyusun konsep pendekatan prediksi *liquefaction* dapat diuraikan sebagai berikut.

#### A. *Liquefaction Potential Index*

*Liquefaction Potential Index* (LPI), yang dikembangkan mulai tahun 1970-an oleh Iwasaki et al. (1984) untuk memprediksi potensi *liquefaction* pada permukaan tanah, yang dapat dikorelasikan secara langsung dengan potensi kerusakan dan respon kumulatif dari endapan tanah. Iwasaki et al., menyebutkan bahwa LPI dapat diinterpretasikan dengan resiko *liquefaction* sangat rendah apabila  $LPI=0$ ; rendah apabila  $0 < LPI < 5$ ; tinggi apabila  $5 < LPI < 15$ ; dan sangat tinggi apabila  $LPI > 15$ . Selain itu potensi *liquefaction* juga memperhitungkan beberapa hal, yaitu :

- 1 Proporsi dari ketebalan lapisan yang *liquefaction*,
- 2 Proporsi dari kedekatan lapisan yang *liquefaction* dengan permukaan tanah, berhubungan dengan faktor keamanan terhadap inisiasi *liquefaction*, tetapi hanya tanah dengan  $FS < 1$  yang memiliki potensi *liquefaction*.

#### B. *Liquefaction Severity Index (LSI)*

*Liquefaction Severity* (S) didefinisikan sebagai pergerakan tanah horizontal dalam satuan inci. S mulai diteliti oleh Youd & Perkins (1987) dilanjutkan oleh beberapa peneliti berikutnya, termasuk Sonmez & Gokceoglu (2005). Penelitian tersebut menunjukkan kerusakan yang sangat kecil ditunjukkan oleh bangunan biasa dengan nilai  $S < 5$ , akan tetapi kerusakan rendah hingga tinggi memiliki nilai  $S=5$  s.d. 20 dan kerusakan major memiliki nilai  $S > 30$ .

Saat ini dikembangkan nilai S maksimum untuk *lateral spread* yang ditimbulkan oleh area banjir yang luas, delta, atau area lain dengan kemiringan landai sedimen *holocene fluvial*. Dengan memilih lingkungan geologi yang spesifik. Selanjutnya disederhanakan dengan *liquefaction severity index (LSI)* yang dapat dinormalisasi dengan memperhitungkan keadaan *seismologic*, *gologic*, *topographic*, *hydrologic* dan *factor geotechnical*. Regresi final dari persamaan Youd and Perkins adalah sebagai berikut :

$$\text{Log(LSI)} = -3.49 - 1.86(\log) + 0.98 \quad (1)$$

Dimana, R adalah jarak episentris dalam kilometer dan  $M_w$  adalah *moment magnitude*.

### C. *Liquefaction Displacement Index*

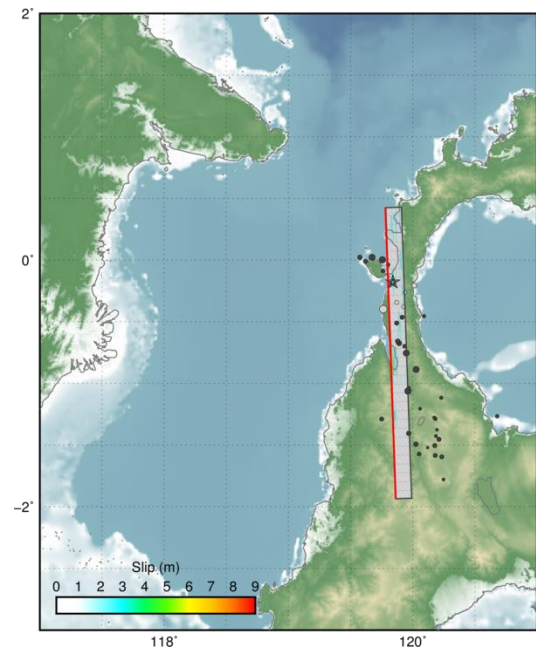
*Lateral displacement index* (LDI) menurut Zhang et al., (2004) dan Faris et al., (2006) adalah terintegrasinya *lateral displacement* melalui pendekatan *permanent shear strain* terhadap kedalaman untuk menghitung pergerakan *lateral spreading* pada permukaan tanah. Faris et al. (2006), menggunakan LDI untuk mengembangkan persamaan untuk pergerakan horizontal maksimum dari *laterally spreading area* yang menjadi fungsi yang *equivalent* terhadap jumlah *blow* pada pasir bersih, kemiringan lereng,  $\alpha$ , dan *moment magnitude*, M.

### D. Studi Kasus *Liquefaction* Palu 2018

Sebagai permulaan dapat dilakukan *liquefaction mapping* berdasarkan data observasi lapangan. Data investigasi yang digunakan adalah merupakan data dari 14.040 *borehole* diperoleh dari Integrated DB Center of National Geotechnical Information of Korea Institue of Construction Technology. Pada data DB, koordinat dan hasil standard penetration test digunakan (<http://www.geoinfo.or.kr>).

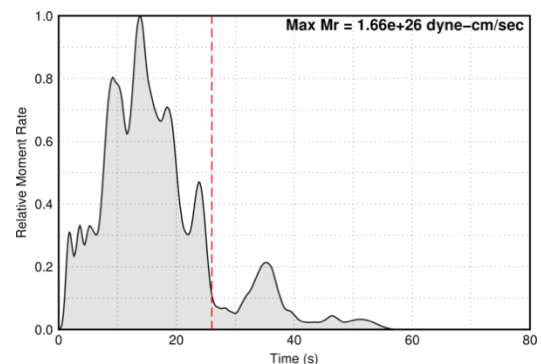
#### 1. Analisis potensi *liquefaction*

Hasil import data dari USGS didapatkan bahwa *cross-section of slip distribution* atas kejadian gempa terbesar pada tanggal 28 September 2018 memanjang dari pusat gempa kearah selatan, seperti dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Slip distribution USGS (2019)

Apabila data gempa diperluas dengan *custom* magnitude  $M > 5$  dari tahun 1900 sampai dengan 2018 maka data kegempaan sekurangnya terdapat 4 data gempa yang mengindikasikan kota Palu dapat mengalami dampak *liquefaction*. Data gempa maksimal pada 2018 cukup meyakinkan bahwa potensi *liquefaction* dapat terjadi dalam amplitudo menengah saja. Data tersebut dapat dilihat pada gambar 6.

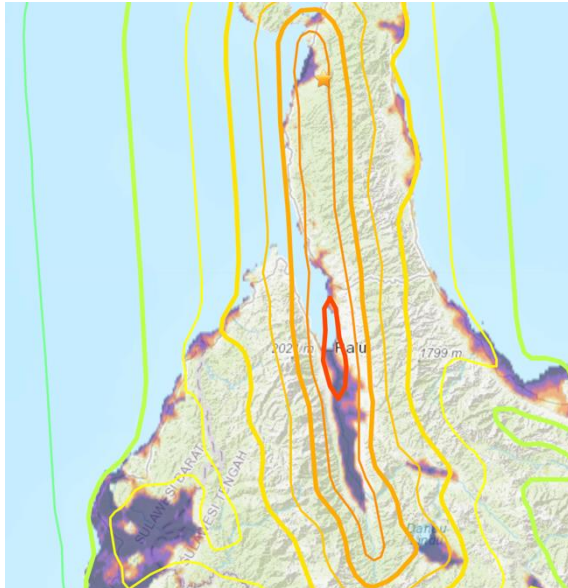


Gambar 6. *Relative moment rate*

#### 2. Pemetaan dan kriteria geologi

Kondisi geologi Palu hampir seluruhnya berupa aluvium muda yang berpotensi mengalami *liquefaction*. Gambar kondisi potensi akibat kondisi geologi yang dikorelasikan dengan slip distribution menunjukkan bahwa area lembah Palu yang persis ada di area sesar palu-koro ini harus mendapatkan perhatian yang lebih serius.

Potensi *mapping*, *slip distribution*, kriteria dan relative moment rate yang sudah dianalisa memperlihatkan seluruh variable potensi *liquefaction* dapat digambarkan dengan baik. Uraian tersebut dapat dilihat pada gambar 7 berikut.



Gambar 7. Peta potensi *liquefaction*

Bagian akhir dari pembahasan penelitian ini adalah mengukur seluruh data dan mapping yang sudah dikompilasikan dengan tools yang dimiliki oleh *rminer*. Hasil yang didapatkan cukup signifikan pada tahap validasi, fitur library *rminer* digunakan untuk menggambarkan dan mendapatkan nilai kontribusi relatif dari setiap nilai masukan. Pada tahap validasi prediksi model terkonfirmasi memiliki nilai  $R^2$   $0,89 \pm 0,02$ , MAD  $0,59 \pm 0,01$  dan RMSE  $0,53 \pm 0,03$  dengan 20 runs performed, sedangkan *hyperparameters* terbaik untuk mencapai model SVM yang fit menggunakan  $\epsilon = 0.08 \pm 0.02$  dan  $\gamma = 0.04 \pm 0.01$ . Sedangkan *hyperparameters* untuk ANN adalah  $H = 3 \pm 1$ .

#### 4. KESIMPULAN

Pemanfaatan DM untuk pemetaan dan analisis *big data* potensi *liquefaction* melalui pendekatan algoritma *rminer* memiliki kapasitas yang sangat baik untuk melakukan interpretasi terhadap data tersedia. Hal ini juga memungkinkan untuk memprediksi tingkat

risiko dengan beberapa faktor penentu lainnya. Model yang diusulkan juga memungkinkan untuk mengidentifikasi parameter lanjutan guna keperluan mitigasi bencana akibat gempa yang lebih detail lagi.

#### 5. REFERENSI

- Al Bawwab, W. M. (2005). Probabilistic assessment of liquefaction-induced lateral ground deformations (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis (C. Özgen. Advisor), Department of Civil Engineering, Middle East Technical University).
- Cortez, P. (2010). Data mining with neural networks and support vector machines using the *rminer* tool. *Advances in Data Mining: Applications and Theoretical Aspects*, 10th Industrial Conference on Data Mining, 83. Berlin, Germany: J In P. Perner, editor.
- Faris, A. T., Seed, R. B., Kayen, R. E., & Wu, J. (2006). A semi-empirical model for the estimation of maximum horizontal displacement due to liquefaction-induced lateral spreading. In *Proc. 8th US Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 3, pp. 1584-1593).
- Franke, K. W., Ulmer, K. J., Ekstrom, L. T., & Meneses, J. F. (2016). Clarifying the differences between traditional liquefaction hazard maps and probabilistic liquefaction reference parameter maps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 240-249.
- Freitas, A. A. (2013). *Data mining and knowledge discovery with evolutionary algorithms*. Springer Science & Business Media.
- Galavi, V., Petalas, A., & Brinkgreve, R. B. J. (2013). Finite element modelling of seismic liquefaction in soils. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 44 (3), 2013.
- Goharriz, M., & Marandi, S. M. (2016). An optimized neuro-fuzzy group method of data handling system based on gravitational search algorithm for evaluation of lateral ground displacements.
- Goh, A. T., & Zhang, W. G. (2014). An improvement to MLR model for predicting liquefaction-induced lateral spread using multivariate adaptive regression splines. *Engineering geology*, 170, 1-10.

- Hall, R., & Spakman, W. (2015). Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, 658, 14-45.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. I. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49-58.
- Javadi, A. A., Rezania, M., & Nezhad, M. M. (2006). Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming. *Computers and Geotechnics*, 33(4-5), 222-233.
- Kalantary, F., MolaAbasi, H., Salahi, M., & Veiskarami, M. (2013). Prediction of liquefaction induced lateral displacements using robust optimization model. *Scientia Iranica*, 20(2), 242-250.
- Mallick, R., Lindsey, E. O., Kuo, Y. T., Zeng, H., Feng, G., Wang, T., & Hill, E. (2018, December). Large Shallow Slip Along the Palu-Koro Fault Associated with Supershear Rupture. In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Mohammadnejad, T., & Andrade, J. E. (2015). Flow liquefaction instability prediction using finite elements. *Acta Geotechnica*, 10(1), 83-100.
- Patton, J. (2018). Earthquake Report: Sulawesi (Celebes), Indonesia. *UPDATE*, 23, 00.
- Rifai, A. I., Hadiwardoyo, S. P., Correia, A. G., Pereira, P., & Cortez, P. (2015). Data Mining Applied for The Prediction of Highway Roughness under Overloaded Traffic. *International Journal of Technology* 5:751-761
- Rifai, A., Hadiwardoyo, S. P., Correia, A. G., & Pereira, P. (2016). Genetic Algorithm Applied for Optimization of Pavement Maintenance under Overload Traffic: Case Study Indonesia National Highway. *Applied Mechanics and Materials* ISSN: 1662-7482, Vol. 845, pp 369-378 Trans Tech Publications, Switzerland
- Serva, L., Vittori, E., Comerci, V., Esposito, E., Guerrieri, L., Michetti, A. M., & Tatevossian, R. E. (2016). Earthquake hazard and the Environmental Seismic Intensity (ESI) scale. *Pure and Applied Geophysics*, 173(5), 1479-1515.
- Shahri, A. A. (2016). Assessment and prediction of liquefaction potential using different artificial neural network models: a case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(3), 807-815.
- Socquet, A., Hollingsworth, J., Pathier, E., & Bouchon, M. (2019). Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nature Geoscience*, 12(3), 192.
- Sonmez, H., & Gokceoglu, C. (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48(1), 81-91.
- Sulewska, M. J. (2017). Applying artificial neural networks for analysis of geotechnical problems. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*, 18(4), 231-241.
- Thein, P. S., Pramumijoyo, S., Brotopuspito, K. S., Kiyono, J., Wilopo, W., Furukawa, A., & Putra, R. R. (2015). Estimation of S-wave velocity structure for sedimentary layered media using microtremor array measurements in Palu City, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 595-605.
- USGS.gov, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>, August 09, 2019, 14.55.30
- Wu, X., Zhu, X., Wu, G. Q., & Ding, W. (2014). Data mining with big data. *Knowledge and Data Engineering*, IEEE Transactions on, 26(1), 97-107.
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1987). Mapping of liquefaction severity index. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(11), 1374-1392.
- Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I. (2004). Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(8), 861-871