

JURNAL GEOSAINS TERAPAN

GEOSCIENCE GIGANTIC COMPETITION

2020



JGT

JURNAL GEOSAINS TERAPAN GEOSCIENCE GIGANTIC COMPETITION (GGC UI) 2020

DEWAN REDAKSI JURNAL GEOSAINS TERAPAN

Penasehat : Dekan FMIPA UI
Pengarah : Manajer Riset dan
Pengabdian Masyarakat
FMIPA UI

Penanggung Jawab

Pimpinan Redaksi : Dr. Supriatna, M.T
Wakil Pimpinan Redaksi : Eko Waludi, ST, M.Si.

Dewan Editor

Ketua : Dr. Eng. Supriyanto, M.Sc.
Anggota :

Prof. Dr. Jan Sopa Heluwakan, LIPI
Dr. Idwan Suhardi, Kemenristek RI
Dr. Agus Guntoro, Universitas Trisakti
Dr. Ildem Safri, Unpad
Dede Djuhana, M.Si., Ph.D., FMIPA UI
Dr. Supriyanto, FMIPA UI
Dr. Suryantini, ITB
Dr. rer. nat. Abdul Haris, FMIPA UI
Dr. Khasani, ST, M.Eng., UGM
Dr. Yuni Krisyuningsih Krisnandi, FMIPA UI

Dosen Geologi FMIPA UI :

Asri Oktavioni Indraswari S.T., M.Sc.
Dyah Nindita Sahdarani S.Si., M.Energy.
Felix Mulia H. Sihombing S.T., MMinRes
Rezky Aditiyo, S.T., M.T.

Dosen Geofisika FMIPA UI:

Agus Riyanto M.Si.
Iskandarsyah M.Si.
Maryadi S.Si., M.Eng.

Redaktur Pelaksana :

Reza Syahputra, M.Si
Octria Adi Prasajo, B.Sc., M.Sc.
Faris Zulkarnain, S.Si
Oscar Riansyah Tilman, S.Si

Keuangan Staf Administrasi :

Agus Riyanto M.Si.

Penata Letak dan Desain Grafis :

Fira MSC, Raffi Putera, M. Fachry, Ahmad
Rayan, Putri Muthia, Hafidz Djawawi,
Nadhiffa Azzura

JURNAL GEOSAINS TERAPAN

ISSN : 977-2502

Kantor: Pusat Studi Geosains Gedung A,
Lantai Dasar, FMIPA UI
Kampus UI Depok 16424

<http://www.sci.ui.ac.id/jgt>; <http://journal.ui.ac.id/jgt>
Telp. (021) 7866732; e-mail: jgt@sci.ui.ac.id

THE APPLICATION OF OUTLIERS-OUT STACKING FOR SEISMIC NOISE REDUCTION IN SYNTHETIC AND REAL DATA

Agus Riyanto^{1,a)}, Novrizal¹, Supriyanto¹, and Abdul Haris²

¹ *Geophysics Program, FMIPA Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Indonesia.*

² *Geology Program, FMIPA Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Indonesia.*

Email: ^{a)}agus.riyanto@sci.ui.ac.id

ABSTRACT

Seismic data processing is an important stage to improve the signal-to-noise (S/N) ratio and the seismic resolution in the seismic method. The invention of new methods for seismic data processing needs to be examined for its effectiveness and its implications to the whole sequences in the seismic data processing. Outliers-Out Stack (OIO Stack) is a new alternative for stacking method. This method is claimed more effective in eliminating bad sample data, which is contaminated by the outliers. Further, this method is able to improving stacking methods to become optimum. In this study, we applied the OIO Stack method to the synthetic and real data set by comparing its result with 2 other stacking methods, i.e., Mean Stack and α -Trimmed Stack. The three methods are applied to 2D seismic marine data, which have been varied at some processing stages. The results show that the application of OIO Stack in seismic data processing is less effective to reduce seismic random noise compared to the two other methods. However, the application to the synthetic data set with the NMO case, the OIO stack shows better quality, which is indicated by a high correlation coefficient of 0.892196 and a lower RMS error of 0.109851. These results were confirmed by the real data set, where the OIO Stack data is able to reduce ringing and suppress multiple energy better than the other two methods.

Keywords: Outliers-Out Stack (OIO Stack), Seismic Noise, Seismic Data Processing.

INTRODUCTION

The main objective of seismic processing in general is to improve the signal-to-noise ratio (S/N ratio) and improve the resolution of seismic data [1]. The problem is the data that obtained from the acquisition not only contains the desired signal but also contaminated by various types of noise. Furthermore the recorded seismic data contain the source signal (wavelet), which is required to be compressed to increase the resolution. This means that the main sequence of seismic data processing can be divided into three sequences: deconvolution, stacking, and migration [1]. In addition to the three main sequences, there are also several other sequences such as filtering, Normal Move-Out (NMO), amplitude correction, and static correction.

Based on the three main sequences of seismic data processing, in this work, we only focus on stacking step. The stacking process is useful for improving the S/N ratio by reducing random noise [2]. One type of stacking that is still newly developed is Outlier-Out Stack (OIO Stack) [3]. Where in the OIO Stack, the stacking process is carried out based on statistical principles to eliminate 'outliers' in a data distribution. Since this method is newly developed, the use of OIO Stack in seismic data needs to be evaluated for its effectiveness compared to other stacking methods. Furthermore, the evaluation needs to be examined in terms of its implications in the seismic processing sequence to find out its advantages or disadvantages.

In this study, we demonstrate the comparison among three stacking methods; Mean Stack, α -Trimmed Stack, and OIO Stack. The comparison was conducted by comparing their performance in handling the synthetic and real seismic data set. The synthetic data contains two cases, synthetic with the random noise, and synthetic with a combination of undercorrected, stretching and jiggling. For the real seismic data, the processing sequence was performed in the time domain and limited to the stacking sequence.

METHODS

Stacking is the process of adding or averaging seismic data based on common mid point (CMP) gather. The CMP recording technique [4] is used to increase the S/N ratio by a factor \sqrt{N} where N is the CMP fold. This means that the S/N ratio gets higher as fold increases. The stacking sequence is preceded by a normal moveout (NMO) correction which requires velocity to correct the recorded seismic data. This velocity value is obtained by velocity analysis of the CMP gather. NMO correction changes a hyperbolic-shaped of the reflection signal become straight, then the stacking process is performed to increase the S/N ratio.

Many stacking methods have been developed to reduce noise even further and get a higher S/N ratio. There are Local-Correlation Stack [5], Velocity-Stack [6], Smart-Stack [7], LMO Stack [8], and α -Trimmed Stack [9]. From the several types of stacking methods that have been mentioned, in this work, three stacking methods i.e., Mean Stack, α -Trimmed Stack, and Outliers-Out Stack are compared in term their performance. Mean Stack is the first stacking method introduced, with uniform weighting and no data elimination. Calculation of the Mean Stack method is conducted using Equation 1.

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t) \quad (1)$$

N for the samples number or CMP fold, $a_i(t)$ is a trace amplitude at the time t. α -Trimmed Stack is a stacking method with symmetric elimination of data, which is performed by first sorting the amplitude in descending order then eliminate the data symmetrically at both ends with a fixed proportion. In α -Trimmed Stack, the stacking process follows Equation 2.

$$A_{\alpha}(t) = \frac{1}{N - 2L} \sum_{i=L+1}^{N-L} a_i(t) \quad (2)$$

α is the trimming parameter that controls the fixed portion of the elimination and L equals to αN . Outliers-Out Stack (OIO Stack) is a fairly new stacking method that uses a data elimination strategy based on the statistic approach. To determine the outliers, the sorted data is divided into percentiles then the upper percentile and lower percentile are defined to eliminate the outliers. The calculation of the OIO Stack method is performed using Equation 3.

$$Outliers \geq [UP + (IPR * FF)] \text{ and } \leq [LP - (IPR * FF)] \quad (3)$$

UP for the upper percentile, LP for the lower percentile, IPR for the inter-percentile range, and FF for the fencing factor. The use of 3 parameters in OIO Stack makes it more flexible in eliminating outliers compared to α -Trimmed Stack so it will not eliminate the data.

The data used in this study are synthetic data and real 2-dimensional (2D) marine seismic data with the detailed information is shown in Table 1. Furthermore, the data processing consisting of:

- 1) The synthetic data processing
 Synthetic data consists of two types: synthetic data of 24 fold wavelets with random noise; and 24-fold trace synthetic data with 3 layers that have NMO problem (stretching, undercorrected, and jiggling). The synthetic data are shown in Fig. 1.
- 2) The real seismic processing
 The real 2D marine seismic data was processed through the following sequence: Pre-processing (geometry, band-pass filtering, trace editing, and gain recovery); F-k filtering to eliminate direct arrival and guided waves; Deconvolution for increasing the data resolution temporally; Radon filtering to attenuate multiple and reverberation; Velocity analysis and followed by NMO correction; Stacking with 3 types of stacking methods.

Table 1. Detailed information about the real 2D marine seismic data

Parameters	Value
<i>CDP number</i>	1-5784
<i>Shotpoint (SP) number</i>	1001
<i>Sampling rates</i>	4 ms
<i>Record length</i>	5000 ms

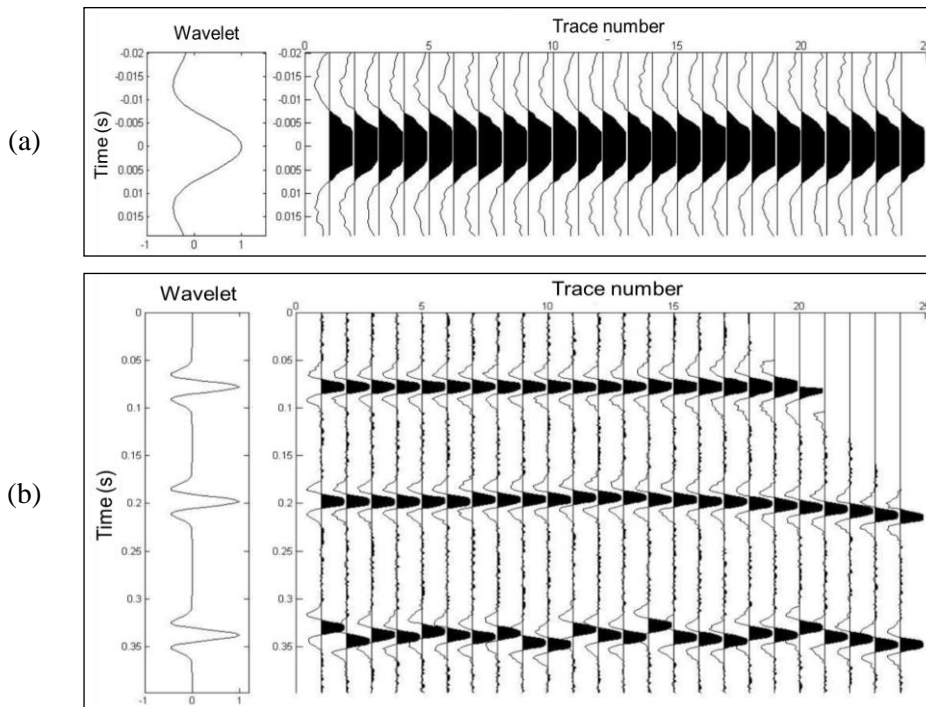


Figure 1. Two types of synthetic data, a) 24 folds wavelet with 10% random noise, b) synthetic of three layers with the NMO problem of stretching, undercorrected, and jiggling.

RESULTS AND DISCUSSION

The three stacking methods have been tested on two types of datasets, synthetic data, and real data. In synthetic data, the accuracy of the results is analyzed using the parameter of correlation coefficient and RMS error. Whereas for real data the analysis is carried out directly by observing the quality of the stacked data.

Synthetic Data

In the synthetic data Case-1, the three stacking methods are tested on 24-fold wavelets and with different noise levels 10%, 30%, 60%, and 100%. Figure 2 shows synthetic data testing with a 10% random noise. In this initial test, the UP, LP, and FF parameter values for OIO Stack use the values of 0.65, 0.40, and 0.5, respectively, which are considered optimum at the Rashed comparison [3]. While the α parameter value used for the α -Trimmed Stack is 0.2 which is considered optimum in this test. The results of stacking using Mean Stack show the correlation value of 0.99986 to the original wavelet without noise. Whereas for α -Trimmed Stack and OIO Stack each has a correlation value of 0.99977 and 0.99960. The results of the three stacking show the correlation coefficient value of OIO Stack is smaller than the others, and the error value is greater than the others. However, these values tend to be similar and the wavelet form of the stacking results from OIO Stack is not too significantly different from the other two methods as shown in Fig 2.

There are differences in the number of samples used by the three methods for stacking at each time (Figure 2 right column), which shows that with a smaller sample, OIO Stack can provide correlation values and error values that are almost the same as the other two stack methods. So OIO Stack can be said to be able to eliminate samples that are considered to have high noise.

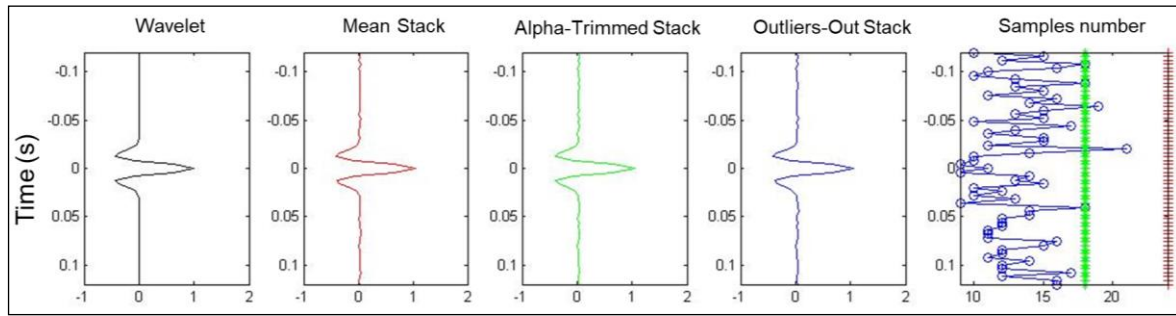


Figure 2. The comparison of the three stacking methods for wavelet with 10% random noise, the right track was the Fold number used for stacking.

In testing synthetic data at 10% noise level with OIO Stack method for different LP, UP, and FF values, the correlation coefficient, and RMS error values are shown in Table 2. It can be seen that the correlation coefficient becomes optimum when LP = 0.35 and UP = 0.65 although the smallest error RMS value is not obtained from that value. While the FF value variation, both the correlation coefficient and the RMS error become optimum by focusing on the FF = 0.5 value. With the optimum correlation coefficient value, the stacking results are expected to have a shape that is more similar to the initial conditions even though it still contains noise.

Table 2. Parameter testing of LP, UP, and FF for synthetic data with 10% random noise.

LP	Correlation	Error	UP	Correlation	Error	FF	Correlation	Error
0.25	0.997864	0.026406	0.55	0.997961	0.023242	0.4	0.997864	0.029940
0.3	0.997870	0.028177	0.6	0.997665	0.027194	0.45	0.997843	0.030391
0.35	0.997904	0.030297	0.65	0.997904	0.030297	0.5	0.997904	0.030297
0.4	0.997282	0.032704	0.7	0.997896	0.033537	0.55	0.997874	0.030301
0.45	0.997715	0.036656	0.75	0.998212	0.035634	0.6	0.997800	0.030688

In synthetic data with higher noise percentage, the three stacking methods show a decreasing correlation as shown in Table 3. In OIO Stack, the value of the correlation coefficient has a greater decrease compared to other methods. This means that OIO Stack requires different UP, LP, and FF parameter values from the previous one to work optimally.

In Figure 3 it can be seen that the number of samples for stacking with OIO Stack is getting less at higher noise levels. OIO Stack discards more samples at higher noise levels because many samples do not meet statistical parameters and are classified as outliers. As a result, the samples used for stacking are less and the noise contained in these samples is not reduced to the optimum. Therefore, the correlation coefficient tends to decrease more than other methods.

Table 3. The comparison of correlation coefficient and RMS Error for the three stacking methods with various noise levels.

Noise (%)	Correlation			RMS Error		
	Mean	Alpha-Trimmed	OIO	Mean	Alpha-Trimmed	OIO
10	0.999174	0.998804	0.997256	0.029608	0.030153	0.032823
30	0.992413	0.989188	0.975751	0.089267	0.091033	0.098934
60	0.970980	0.958871	0.912139	0.176931	0.179814	0.194889
100	0.925432	0.897188	0.803388	0.295806	0.301457	0.327934

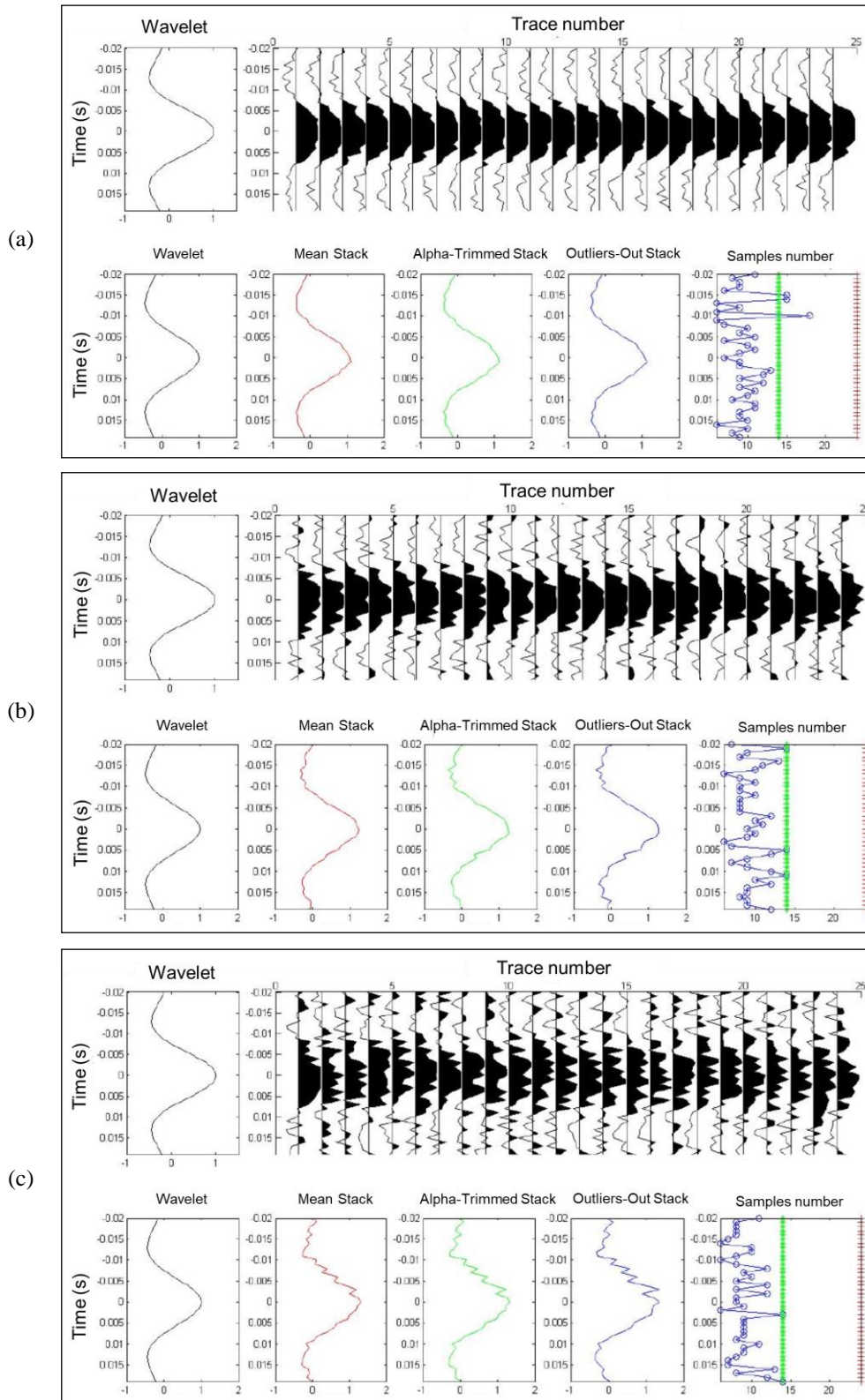


Figure 3. Stacking results for the noise level a) 30%, b) 60%, and c) 100%.

Synthetic data with 3 boundaries of rock layers, the results of the three stacking are shown in Fig. 4 and Table 4. The correlation coefficient value for OIO Stack is higher than other methods 0.892196. Furthermore, the RMS error from OLO Stack has a smaller value than the other two methods, namely 0.109851. From this, it can be said that OIO Stack can minimize the effects of NMO that are not perfect, such as undercorrected, stretching, or jiggling.

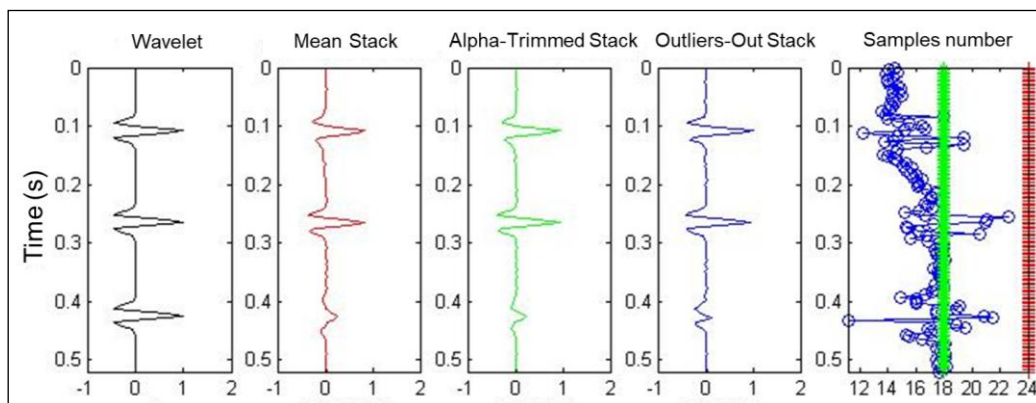


Figure 4. Stacking results for the synthetic with three layers that have NMO problem of stretching, undercorrected, and jiggling.

Tabel 4. Comparison of correlation coefficient and RMS Error of the three stacking methods for synthetic with three layers.

Synthetic data	Correlation			RMS Error		
	Mean Stack	Alpha-Trimmed Stack	OIO Stack	Mean Stack	Alpha-Trimmed Stack	OIO Stack
3 Layers	0.846854	0.877098	0.892196	0.133093	0.120681	0.109851

Real Data

The results of the 2D marine seismic data are divided into two-part, the first was processing sequence that included Radon filtering and the second without Radon filtering. Stacking results through the Radon filtering shown in Figure 5. In general, the three results of the stacking data still contain noise. Among CDP 1000-1700 (marked with X), it appears that the signal is not too strong as in other parts. Then on the right side of the CDP 4500-5000 (marked with A) throughout 1.5-3 s, the OIO Stack data results tend to be cleaner than the results of the Mean Stack which tends to ringing and the α -Trimmed Stack which is also still noisy. Layering on Mean Stack and α -Trimmed Stack also shows the stretching effect that can be suppressed by OIO Stack optimally.

OIO Stack results look weak in the upper layers at 0.6 seconds (marked with B). Nevertheless, the OIO Stack layer tends to be cleaner and clearer than the other two methods due to the stretching effect of NMO which was successfully suppressed on OIO Stack. Weak signals on OIO Stack results are also seen at CDP 2000-3500 (marked D) which can be caused by increased ambient noise. This can be caused by the parameters used by OIO Stack not optimum at the lower part. In general, the results from OIO Stack are not ringing as in the other two methods.

In the data with undercorrected and overcorrected conditions, it can be seen that the results of Mean Stack and α -Trimmed Stack become noisier as the layers tend to be ringing due to imperfect NMO correction. While the OIO Stack results are better in minimizing the ringing effect even though the signal looks to be weaker.

The results of stacking from data that do not go through Radon filtering are shown in Figure 6. In the Mean Stack, the area that shows ringing (marked with K) is more than OIO Stack. Furthermore, between the main layers at the upper part of the Mean Stack and the α -Trimmed Stack, there is multiple noise (marked with L). In OIO Stack ringing, multiple noise and stretching effects have been successfully attenuated.

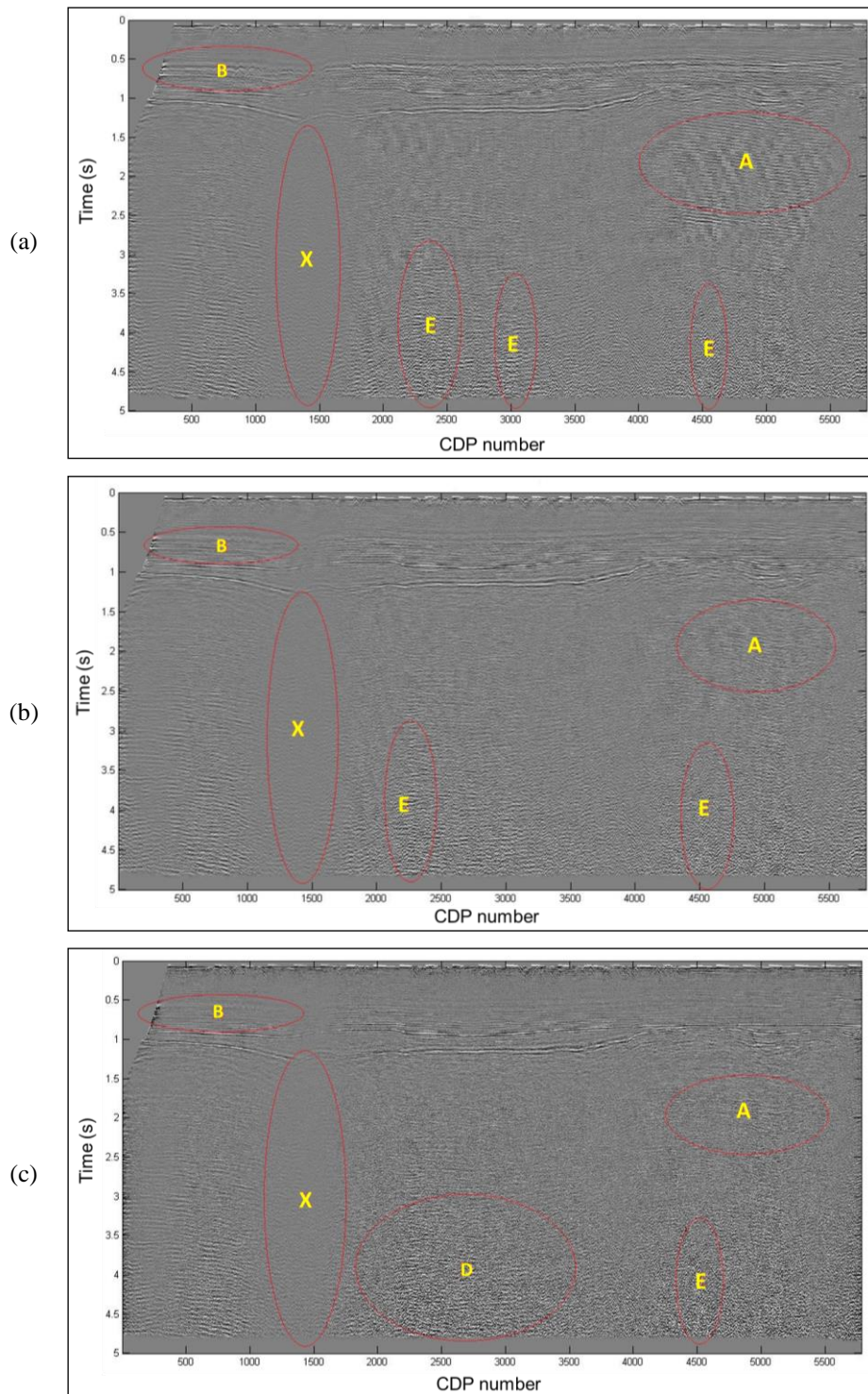


Figure 5. Stacking results of the 2D marine seismic data with the processing sequence included Radon filter, a) mean stack, b) α -Trimmed Stack and c) OIO Stack.

In data that is undercorrected, layers tend to be wavy. In Mean Stack and α -Trimmed Stack, the multiple layers at the upper part also become very noisy, whereas in OIO Stack multiple layers have been successfully suppressed. This also happens to overcorrected data where the layer multiple layers appear that can be minimized by OIO Stack. So that in general OIO Stack can minimize multiple noise more than the two other methods. Furthermore, it can also be said that the OIO Stack method can minimize noise ringing and stretching. OIO Stack is also able to suppress multiple as well as minimizing the effects of imperfect NMO better than the other two methods.

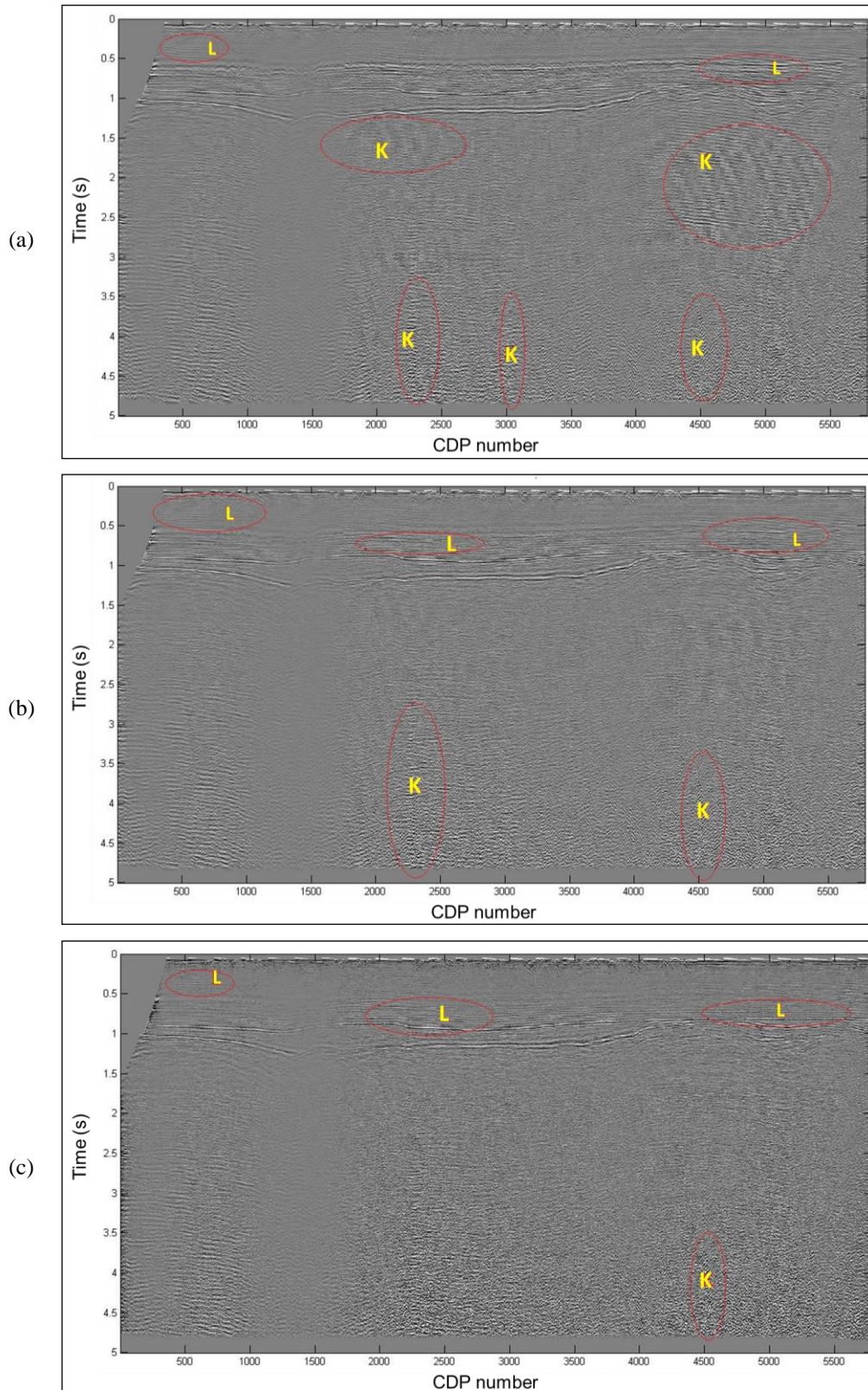


Figure 6. Stacking results of the real 2D marine seismic data with the processing sequence without Radon filter, a) mean stack, b) α -Trimmed Stack and c) OIO Stack.

CONCLUSIONS

The analysis of the effectiveness of the new stacking method of OIO stack was successfully carried out in the synthetic and real data. Based on the results it can be said that the OIO stack less effective for reducing random noise. The synthetic of the random noise with various noise levels showed that the OIO stack has a lower correlation coefficient and higher RMS error compared to the two others method. Furthermore, it was also confirmed by the real data set that increasing the ambient noise makes the signal becomes weak on the OIO stack. However, the OIO stack is more effective to overcome the NMO problem that was shown by a higher correlation coefficient of 0.892196 and a lower RMS error of 0.109851 for the case of synthetic data. This result was confirmed by the real data set that the OIO Stack is able to reduce ringing and suppress multiple energy better than the other two methods. The experiment to data set that is not applied Radon filtering, OIO Stack is more acurat to suppress multiple layers that appear between the main layers than the two other methods.

REFERENCES

- [1] Yilmaz, Ozdogan, 1987, *Seismic Data Processing*, Tulsa: Society of Exploration Geophysics.
- [2] Ruckemann, C.-P., 2012, Comparison of stacking methods regarding processing and computing of geoscientific depth data: *Geoprocessing 2012: The Fourth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services*, 35–40.
- [3] Rashed, Mohamed, 2016, Outliers-out stack: a new algorithm for processing seismic data, *Exploration Geophysics*, 49(1), 42-49.
- [4] Mayne, W.H., 1962, Common-reflection point horizontal data stacking techniques: *Geophysics*, 27, 927-938.
- [5] Liu, G., Formel, S., Jin, L., and Chen, X., 2009, Stacking seismic data using local correlation: *Geophysics*, 74, V43-V48. doi: 10.1190/1.3085643
- [6] Lee, Myung W., Agena, Warren F., 1994, Applications of Velocity-Stack Methods to Seismic Data Processing, *U.S. Geological Survey Bulletin* 2102.
- [7] Rashed, M.A., 2008, Smart stacking: A new CMP stacking technique for seismic data: *The Leading Edge*, 27, 462-467.
- [8] Neelamani, R., Dickens, T.A., Deffenbaugh, M., 2006, Stack-and-denoise: A new method to stack seismic datasets: 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2827-2831.
- [9] Watt, T., Bednar, J., 1983, Role of alpha-trimmed mean in combining and analyzing seismic common depth point gathers: *Technical Program Abstracts and Biographics*, Society of Exploration Geophysicists, 276-277.
- [10] R.A. Young, and R.D. Lo Piccolo, A comprehensive AVO classification. *The Leading Edge*, (2003). **22(10)**, pp.1030-1037.
- [11] A.M. Dziewonski, and D.L. Anderson, Preliminary reference Earth model. *Physics of the earth and planetary interiors*, (1981). **25(4)**, pp.297-356.

ANALISIS MATEMATIS PENENTUAN KONSTANTA KOREKSI BOUGUER BARU PADA GRAVITASI SATELIT TOPEX DALAM IMPLIKASI KONDISI GEOLOGI STUDI KASUS SESAR PALU KORO, SULAWESI TENGAH

Aji Darma Maulana^{1*}, Danang Aji Prasetyo² dan Aprillia Frinanda Setiawan¹

¹Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

²Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

*ajiedarma16@gmail.com

ABSTRAK

Ketepatan dalam memahami sifat koreksi pengolahan gravitasi sangat diperlukan agar data yang didapatkan merepresentasikan sirkumstansi bumi yang sebenarnya. Penelitian dilakukan dengan menggunakan data gravitasi observasi satelit TOPEX dengan luas area sebesar 37.530 km² berupa *Free Air Anomaly*. Penelitian berbasis analisis ini berlandaskan ketidaksesuaian antara dinamika geologi dengan data pengolahan gravitasi *conventional*. Dengan menekankan pada pengolahan gravitasi secara *unconventional*, analisis ini bertujuan untuk mendapatkan besaran yang dapat mereduksi efek topografi tanpa menghilangkan informasi litologi. Pengolahan dilakukan dengan cara membandingkan beberapa variasi perlakuan koreksi *Bouguer* pada nilai *Free Air Anomaly*. Perlakuan tersebut berupa analisis matematis yang diterapkan dengan cara memperkecil rentang nilai koreksi *Bouguer* yang terlalu signifikan sebagai efek dari ketidakcocokan antara konstanta *Bouguer conventional* terhadap jarak ukur antara satelit dengan massa batuan. Dihasilkan beberapa peta *complete bouguer anomaly* dengan pola ekspresi yang berbeda sebagai efek dari variasi analisis matematis. Representasi data yang memiliki kesesuaian dengan fenomena geologi sebenarnya dapat dilihat pada *complete bouguer anomaly map* yang telah diperkecil rentang nilai koreksi *Bouguernya* dengan konstanta baru yaitu **0.04193/2.5** atau **0.016772**. Terlihat kemenerusan utama anomali gravitasi dengan orientasi relatif utara-selatan yang diinterpretasikan sebagai sesar mendatar serta beberapa kemenerusan lainnya dengan orientasi relatif barat laut-tenggara yang diinterpretasikan sebagai sesar penyerta. Anomali tersebut berada pada kisaran nilai 7.1 – 39 mGal pada peta *complete bouguer anomaly* serta pada area *low degrees* pada peta *tilt derivative* dengan nilai -1.5 – 0.5 derajat. Keberadaan dan persebaran densitas yang mencerminkan litologi maupun sesar pada daerah penelitian telah tervalidasi oleh peta geologi dan ekspresi topografi data SRTM berdasarkan analisis anomali gravitasi.

Kata Kunci : Analisis Matematis, Konstanta Baru, Koreksi Bouguer, Satelit Gravity, Sesar Mendatar

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara Asia yang berada tepat pada batas-batas lempeng paling aktif di dunia. Hal tersebut menyebabkan Indonesia sangat rentan terhadap bencana gunung api, gempa bumi dan bencana rendutan lain yang berhubungan dengan kegempaan seperti tsunami dan likuifaksi. Salah satu bencana tsunami terbesar yang melanda Indonesia adalah tsunami yang diakibatkan letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883 (Harris & Major dalam (Cummins, 2017). Symons menyatakan bahwa pada 27 Agustus terjadi empat letusan besar yang merupakan

puncak dari aktivitas Gunung Krakatau pada masa itu. Letusan terjadi pada 05:30, 06:44, 10:02, dan 10:52, dengan letusan terbesar terjadi pada pukul 10:02 (Symons dalam (Nomanbhoy & Satake, 1995)). Letusan tersebut terdengar hingga sekitar 4000 km menyebrangi Samudra Hindia. Abu vulkanik tersebar ke berbagai daerah dan suhu di berbagai tempat di belahan bumi menurun (Simkin dan Fiske dalam (Nomanbhoy & Satake, 1995). Bencana tersebut menjadi salah satu bencana terbesar di dunia.

Selain bencana tsunami akibat letusan gunung api, wilayah Indonesia juga sangat

rentan terhadap gempa bumi. Salah satu bencana gempa bumi yang baru terjadi, berdampak besar, serta menimbulkan rangkaian bencana selain gempa itu sendiri adalah gempa Palu 2018. Pada 28 September 2018, BMKG mengeluarkan *press release* yang cukup mengguncang penduduk Indonesia. Terdeteksi gempa dengan magnitudo 7.7 pada hari itu, pukul 17:02:44 WIB, berlokasi di 0,18 LS dan 119, 85 BT yang berjarak sekitar 26 km dari Kabupaten Donggala, Provinsi Sulawesi Tengah (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2018). Berdasarkan hasil pemodelan yang dilakukan oleh BMKG, tsunami dengan ketinggian maksimum 3 meter beresiko terjadi di daerah Palu sekitar 10 menit setelah gempa (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2018). Pada hari yang sama BMKG mengeluarkan sebuah ulasan yang membahas dan meralat informasi gempa tersebut. Gempa tersebut ternyata memiliki *magnitude* 7.4 dengan OT 17:02:45 WIB, terjadi pada kedalaman 11 km (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi Utara Donggala Sulteng, 2018). Bencana tersebut menyebabkan 2.256 korban jiwa, 1.309 laporan orang hilang, lebih dari 4.600 orang luka berat, lebih dari 36.000 orang luka ringan dan lebih dari 223.000 orang mengungsi.

Fakta di atas menggambarkan tingkat urgensi yang tinggi pada bidang mitigasi bencana. Sehingga diperlukan integrasi dari berbagai bidang keilmuan untuk dapat mengenali resiko-resiko bencana. Pada penelitian ini digunakan metode geofisika berupa gaya berat (*gravity*), untuk mengetahui geometri dan posisi sesar-sesar penyebab gempa serta menganalisis daerah-daerah yang memiliki resiko likuifaksi tinggi.

Dengan memanfaatkan data sebaran gravitasi satelit TOPEX penelitian ini bertujuan untuk mendeleniasi area yang memiliki nilai gaya berat rendah sebagai perwujudan depresi anomali pada *Complete Bouguer Anomaly Map*. Dimana depresi anomali tersebut merepresentasikan respon dari rendahnya lito-densitas. Dengan melakukan pengolahan secara *unconventional* menggunakan konstanta **Bouguer Baru** pada data observasi satelit TOPEX FAA (*Free Air Anomaly*), diterapkan koreksi *Bouguer* yang telah menggunakan konstanta tersebut sebagai hasil *output* dari proses derivasi pada variabel geometri dalam persamaan Hukum Newton.

Penelitian ini berfokus pada *data processing* menggunakan analisa matematis pada persamaan Hukum Newton untuk menghasilkan nilai variasi gaya berat yang menggambarkan sirkumstansi geologi daerah penelitian. Dengan menghilangkan pengaruh topografi tanpa menghilangkan informasi lito-densitas. Penelitian ini dilakukan atas dasar ketidaksesuaian antara nilai variasi gaya berat pada data gravitasi *satellite* TOPEX yang dihasilkan menggunakan konstanta *bouguer* yang biasa digunakan (**0.04193**) terhadap kenampakan geologi seperti stuktur berupa sesar dan lito-densitas

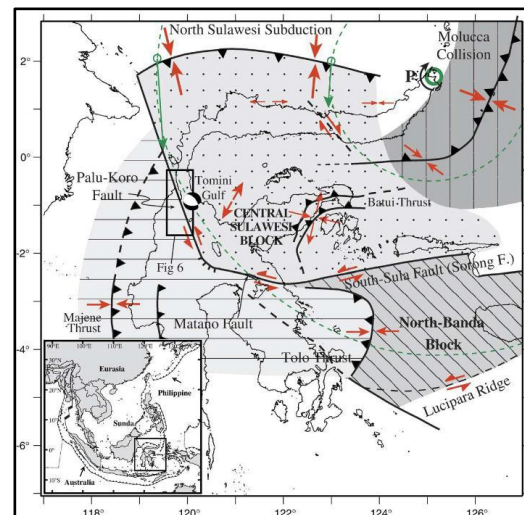
Menggunakan temuan baru yaitu konstanta *bouguer* khusus TOPEX, *Complete Bouguer Anomaly Map* didapatkan sehingga menghasilkan peta yang representatif terhadap fenomena geologi yang ada pada daerah penelitian. Selanjutnya, dilakukan analisis zona-zona dengan densitas rendah untuk menentukan area yang memiliki potensi akan bahaya likuifaksi sebagai dampak rendutan dari proses tektonik tersebut.

Tektonik Regional dan Potensi Bencana Alam

Sulawesi, sebuah pulau di bagian timur Kepulauan Indonesia dengan luas area sekitar 172.000 km² (pulau utama) dan 188.000 km² dengan kepulauan di sekitarnya (Van Bemmelen, 1949), merupakan area yang sangat kompleks secara tektonik. Kompleksitas tersebut menghasilkan fisiografi yang unik. Van Bemmelen membagi fisiografi Sulawesi ke dalam tujuh zona: *North Arm*, *East Arm*, *Banggai Archipelago*, *Southeast Arm*, *Buton Archipelago* dan *Tukang Besi Island*, *South Arm*, dan *Central Besi* (Van Bemmelen, 1949). Sulawesi adalah hasil dari konvergensi aktif tiga lempeng atau *triple junction* yang mempertemukan antara Lempeng Eurasia, Pasifik-Filipina, dan India-Australia (Bellier, et al., 2006; Hall, 2002; Prasetya, De Lange, & Healy, 2001; Socquet, et al., 2006). Sukanto dan Hamilton menyatakan dalam (Hall, 2002) bahwa secara tektonik Sulawesi dibagi menjadi beberapa bagian: *West Sulawesi magmatic arc*, *Central Sulawesi Methamorphic Belt*, *East Sulawesi Ophiolit*, dan *microcontinental blocks* of Banggai-Sula and Button-Tukang Besi. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh beberapa peneliti, didapati bahwa beberapa mikroblok di area Sulawesi telah mengalami rotasi akibat aktivitas lempeng-lempeng yang kompleks tersebut (Hall, 2002; Socquet, et al., 2006).

Menurut beberapa peneliti (co: Audley-Charles dkk., 1972; Katili, 1978; Bergman dll) dalam (Hall, 2002) pada Oligosen Akhir-Miosen Awal terdapat tumbukkan antara Blok Sulawesi Barat dan Blok Sulawesi Timur. Hal ini dibuktikan dengan ditemukannya ofiolit dan batuan metamorf ofiolitik yang mengindikasikan umur yang sama (Hall, 2002). Pada Miosen Awal, mikrokontinen dari Australia

bertumbukkan dengan Sulawesi di bagian tenggara. Pada Miosen Akhir berkembanglah fase ekstensional yang membentuk beberapa cekungan di area Banda menurut Hall dan Wilson, 2000; Hall, 2002 dalam (Bellier, et al., 2006). Pada Awal Pliosen terjadi kolisi tahap akhir antara Sulawesi *East Arm* dengan blok Banggai-Sula yang menyebabkan berkembangnya struktur-struktur seperti lipatan, sesar naik, serta *uplift* di daerah Sulawesi bagian tengah dan barat (Hall dan Wilson, 2000; Hall, 2002; Van Leeuwen dan Muhandjo, 2005; Bergmen dkk., 1996; Polve dkk., 2001 dalam (Bellier, et al., 2006)). Fase ini juga diperkirakan menjadi tahap awal pembentukan Sesar Palu-Koro (Polve dkk., 2001 dalam (Bellier, et al., 2006)).



Gambar 1. Tektonik regional Sulawesi. Terjadi subduksi di utara Sulawesi oleh Lempeng Filipina-Pasifik yang menghasilkan North Sulawesi Subduction. Sesar Palu-Koro bercabang menjadi dua, yaitu Sesar Matano dan Sesar Lawanopo.

Sesar Palu-Koro merupakan salah satu sesar terbesar di Sulawesi dengan pergerakan sekitar 42 mm/tahun (Socquet, et al., 2006). Sesar ini menerus dari arah barat laut - tenggara dari Palu hingga Poso dan bercabang menjadi Sesar Matano dan Sesar Lawanopo (Socquet, et al., 2006). Secara geomorfologi, kemenerusan Sesar Palu-Koro dimanifestasikan oleh adanya

Cekungan Palu yang dibatasi oleh pegunungan dengan arah relatif barat laut-tenggara (mendekati utara-selatan) yang membentuk *wine glass valley* dan *triangular facet* pada dasar pegunungan (Tjia dan Zakaria, 1974; Beaudouin, 1998 dalam (Bellier, et al., 2006)). Hal ini membuat daerah Sulawesi Tengah, terutama di area Sesar Palu-Koro memiliki resiko tinggi terhadap gempa dan bencana-bencana alam lain yang berhubungan dengan gempa seperti tsunami dan likuifaksi. Setidaknya 19 gempa bumi yang bersifat merusak telah terjadi dalam kurun waktu 1910 hingga 2013 (Supartoyo, Sulaiman, & Junaedi, 2014). Enam gempa berpotensi tsunami pernah terjadi di Selat Makassar dan beberapa di antaranya berhubungan dengan Selat Palu-Koro (Socquet, Hollingsworth, Pathier, & Bouchon, 2019).

Palu adalah salah satu kota yang memiliki resiko kegempaan yang tinggi. Terdapat delapan kecamatan di Kota Palu: Palu Barat, Palu Timur, Palu Selatan, Palu Utara, Tatanga, Mantikulore, dan Taweli dan Ulujadi, di mana semua kecamatan beresiko tinggi gempa dan hanya Kecamatan Ulujadi yang beresiko sedang (Rusydi, Efendi, Sandra, & Rahmawati, 2018).

2. Landasan Teori

Metode Gravitasi

Metode Gravitasi adalah salah satu metode geofisika yang mengukur variasi medan gravitasi bumi akibat perbedaan nilai densitas dari material dibawah permukaan (Reynolds, 2011). Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui distribusi rapat massa. Tujuan utama dari penelitian menggunakan metode gaya berat ini yaitu untuk memberikan gambaran lapisan bawah permukaan melalui pendekatan fisis. (Telford et al., 1990).

Teori yang mendasari Metode Gravitasi adalah Hukum gravitasi yang dikemukakan oleh Sir Isaac Newton (1642-1727), yang menyatakan bahwa gaya tarik-menarik antara dua partikel sebanding dengan perkalian kedua massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat keduanya, jadi semakin jauh jarak kedua benda tersebut maka gaya gravitasi semakin kecil dan sebaliknya. Hukum gravitasi Newton menyatakan bahwa gaya antara dua buah partikel bermassa m_1 dan m_2 berbanding langsung dengan hasil kali kedua massa tersebut dibagi dengan kuadrat jaraknya, seperti pada persamaan berikut:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

$$E(r) = -G \frac{m_1}{r^2} \hat{r} \quad (3.2)$$

$$F = mg \quad (3.3)$$

$$g = \frac{F}{m_2} = \frac{-G m_1 m_2}{R^2 m_2} \quad (3.4)$$

$$g = -G \frac{m_1}{R^2} \quad (3.5)$$

$$g = -G \frac{\rho V}{R^2} \quad (3.6)$$

Dari persamaan diatas diketahui bahwa nilai percepatan gravitasi sebanding dengan nilai densitas benda.

Keterangan :

F = gaya (N)

G = konstanta Gravitasi
= $6.673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

m_1 = massa benda m_1 (kg)

m_2 = massa benda m_2 (kg)

R = jarak antar pusat massa benda (m)

g = percepatan (m/s^2)

V = Volume (m^3)

ρ = Densitas Batuan (g/cc)

Data Satellite Gravity

Konsep dasar dari satelit gravimetri yaitu mendeteksi perubahan medan gravitasi bumi dengan cara memonitor perubahan jarak yang terjadi antara pasangan dua satelit gravimetri pada orbitnya. Kedua satelit ini saling melaju pada *track* orbit dengan jarak satelit satu ke satelit kedua sekitar 220 kilometer. Satelit

gravimetri mempunyai akurasi 1 cm untuk tinggi geoid, dan 1 mGal untuk *gravity* anomali, pada spasial grid 100 kilometer dipermukaan bumi bahkan kurang. (Chelton et al, 2001). Pada penelitian ini penulis menggunakan data dari satelit TOPEX/Poseidon.

Pada satelit *gravity* data yang didapatkan berupa FAA (*Free Air Anomaly*) yang mana data tersebut tidak membutuhkan *Free Air Correction* (FAC) dikarenakan pengukuran berada pada datum elevasi yang sama. Tidak membutuhkan koreksi lintang dalam pengolahan gravitasi satelit karena alat telah mengkalkulasi pengaruh nilai gravitasi terhadap perbedaan lintang. Selain itu, dengan jarak dari pusat massa bumi terhadap lintasan orbit satelit, perbedaan percepatan gravitasi yang ditimbulkan oleh perbedaan sudut lintang tidak terlalu berpengaruh. Sehingga hanya terdapat selisih yang sangat minimal akibat variasi posisi lintang dari pengukuran satelit gravitasi.

Koreksi topografi atau yang sering disebut dengan koreksi medan juga tidak diperlukan keberadaanya karena pengukuran berada jauh dari kontaminasi tarikan massa batuan yang bersifat mengurangi nilai pembacaan pada sumbu Y.

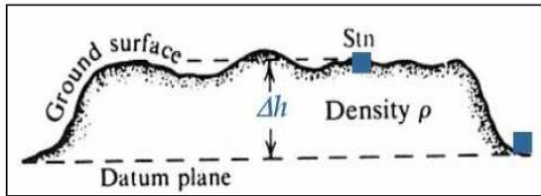
Koreksi-koreksi konvensional pada *Gravimeter La coste Romberg* pada pengukuran *Ground Gravity* seperti tinggi alat, koreksi *drift* atau kemuluran pegas juga tidak diperlukan dikarenakan prinsip pengukuran bukan menggunakan pegas. Koreksi yang diperlukan pada data *satellite gravity* hanya koreksi *bouguer* untuk mengkompensasi kelebihan atau kekurangan massa terhadap nilai pembacaan pada satelit TOPEX.

Penurunan Konstanta Koreksi *Bouguer* Baru

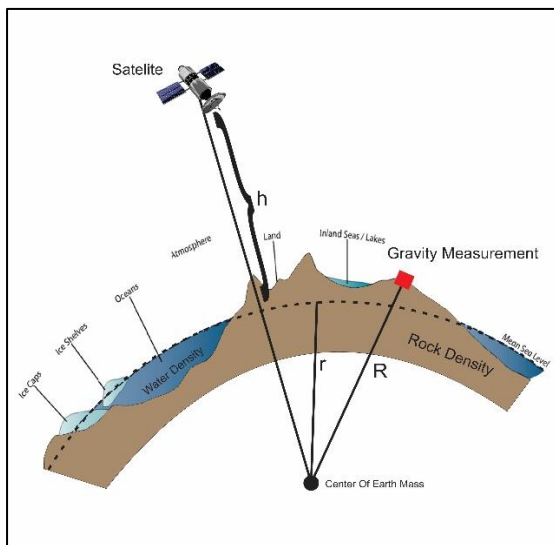
Berdasarkan Hukum Gravitasi yang telah dikemukakan oleh Newton (1642-1727), menjadi dasar utama pemikiran pada penelitian ini. Dalam penerapan pada bidang kebumihuman rumusan dari Hukum Newton tersebut telah dilakukan derivasi hingga menghasilkan gradien gravitasi terhadap perubahan jarak pengukuran dengan pusat massa bumi. Terdapat dua macam gradien gravitasi yang dihasilkan yaitu konstanta FAC (*Free Air Correction*), **0.3087** dan Konstanta BC (*Bouguer Correction*) **0.04193**. Kedua konstanta tersebut merupakan konstanta yang dihasilkan berdasarkan perhitungan *derivative* pada datum *mean sea level* atau pada keadaan teoritis jarak pengukuran dengan radius ($r = 6371$ km). Dimana FAC adalah sebuah koreksi nilai gravitasi yang mengkompensasi variasi nilai gaya berat yang tidak diperlukan, dikarenakan perbedaan ketinggian pengukuran. Pada FAC derivasi yang dilakukan hanya memperhitungkan ketinggian titik ukur saja dengan mengabaikan variasi kelebihan dan kekurangan massa batuan. Sedangkan Koreksi *Bouguer* adalah koreksi yang dihasilkan dari proses derivasi dengan memperhitungkan variasi tarikan massa batuan yang ada dipermukaan bumi.

Berdasarkan pernyataan Newton yang telah dikemukakan seharusnya konstanta *Bouguer* (**0,04193**) tidak relevan terhadap pengolahan data gravitasi satelit TOPEX dikarenakan semakin jauh titik pengukuran dari pusat massa bumi ataupun pusat massa batuan maka nilai gravitasi yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Oleh karena itu apabila menggunakan konstanta tersebut hasil anomali *Bouguer* yang didapatkan tidak merepresentasikan kondisi geologi yang sebenarnya baik berupa lito-densitas ataupun kelurusan-kelurusan sesar,

sehingga mengakibatkan data tersebut bersifat *overcorrected*. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk menemukan konstanta *Bouguer* baru yang diterapkan pada data satelit TOPEX yang akan dijelaskan pada **Gambar 2 dan 3**.



Gambar 2. Ilustrasi Penurunan Konstanta Koreksi *Bouguer Ground Measurement*



Gambar 3. Perbedaan pengukuran *ground gravity* dengan *satellite gravity*. Menunjukkan bahwa pengukuran gravitasi permukaan memiliki konstanta yang lebih besar dibandingkan pengukuran gravitasi satelit.

Pengukuran Gravitasi Permukaan

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G m}{r_1^2} dr \quad (3.7)$$

Dimana r_1 adalah elevasi dari pengukuran gravitasi permukaan.

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G \rho v}{r_1^2} dr \quad (3.8)$$

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G \rho \frac{4}{3} \pi r_2^3}{r_1^2} dr, \quad (3.9)$$

Dimana r_2 adalah radius dari geometri massa batuan

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G \rho 4 \pi r_2^2}{2 r_1} dr \quad (3.10)$$

$$g_B = 2 \pi G \rho r$$

$$g_B = 2 \pi G \rho H \text{ (mGal)} \quad (3.11)$$

$$g_B = 0.04193 \rho H \text{ (mGal)} \quad (3.12)$$

Dengan r_1 dan r_2 diganti dengan H dengan asumsi pada pengukuran gravitasi permukaan kedua radius tersebut adalah sama.

Pengukuran Gravitasi Satelite

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G m}{r_1^2} dr \quad (3.13)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G \rho v}{r_1^2} dr \quad (3.14)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G \rho \frac{4}{3} \pi r_2^3}{r_1^2} dr \quad (3.15)$$

Berdasarkan **Gambar 3** elevasi pengukuran *gravity satellite* adalah $(r + h)$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G \rho \frac{4}{3} \pi r_2^3}{(r+h)^2} dr \quad (3.16)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G \rho 4 \pi r_2^2}{2 (r+h)} dr \quad (3.17)$$

Dilakukan perbandingan antara persamaan (3.10) dan persamaan (3.17)

$$\frac{dg_1}{dr} = \frac{G \rho 4 \pi r_2^2}{2 r_1} dr$$

$$\frac{dg_2}{dr} = \frac{G \rho 4 \pi r_2^2}{2 (r+h)} dr \quad (3.18)$$

$$\frac{dg_1}{dr} = \frac{1}{r_1} dr$$

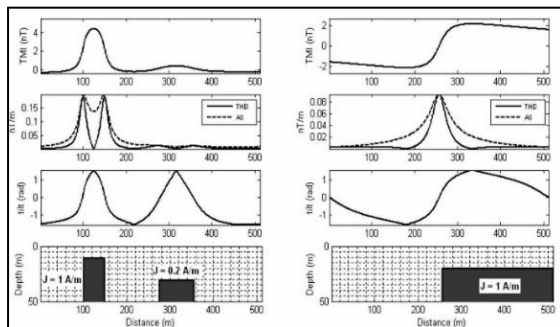
$$\frac{dg_2}{dr} = \frac{1}{(r+h)} dr \quad (3.19)$$

$$\frac{dg_1}{dg_2} = \frac{(r+h)}{r} \quad (3.20)$$

Dari persamaan (3.20) dapat diketahui bahwa pengukuran gravitasi permukaan (*ground measurement*) memiliki konstanta koreksi *Bouguer* yang lebih besar dibandingkan pengukuran gravitasi *satellite*. Namun terdapat suatu permasalahan yaitu tidak adanya informasi khusus mengenai data *altitude* dari pengukuran gravitasi *satellite* TOPEX.

Sehingga tidak dapat dilakukan perhitungan pada hasil derivasi secara pasti. **Filter Tilt Derivative**

Filter *tilt derivative* digunakan untuk mempertegas batas anomali gravitasi dimana pada kasus ini sangat berguna untuk melakukan identifikasi struktur-struktur yang berkembang di daerah penelitian.. Filter ini membatasi frekuensi anomali residual yang masuk dengan menerapkan fungsi tangensial. Dengan kata lain, filter ini memasukan dua keseimbangan efek pemfilteran yaitu *vertical derivative* dan *total horizontal derivative*. Whitehead & Musselman (2007), menganjurkan penggunaan filter *Tilt-Derivatives* untuk pemetaan struktur (**Gambar 4**).



Gambar 4. Penerapan filter *Tilt Derivative* menurut Arisoy, M. Ö., & Dikmen, Ü., 2013.

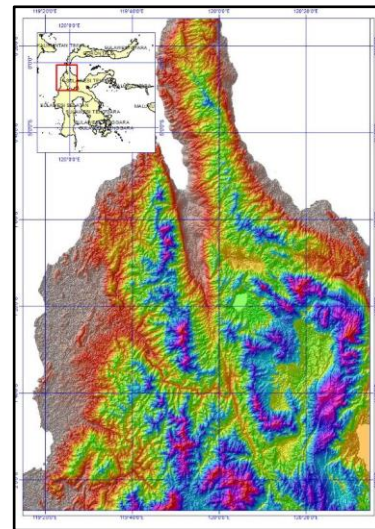
3. Metodologi Penelitian

Daerah Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode gaya berat (gravitasi) dengan cara memetakan variasi nilai gravitasi yang disebabkan karena variasi lito-densitas. Penelitian ini memanfaatkan data observasi gravitasi satelit TOPEX yang telah dilakukan oleh NASA dengan luas area penelitian sebesar 175.629 m x 215.199 m atau 37.274 km².

Penelitian dilakukan di daerah Sulawesi Tengah dengan tujuan mendeleniasi struktur sesar besar Palu Koro serta melakukan zonasi sebagai referensi area rawan bencana berdasarkan lito-densitas yang dicerminkan oleh variasi nilai

gravitasi pada daerah tersebut (**Gambar 5**). Selain itu penelitian ini menerapkan terobosan baru terkait konstanta koreksi *Bouguer* berdasarkan serangkaian proses derivasi yang telah dilakukan. Kemudian dilakukan serangkaian proses perbandingan peta serta grafik dan *try and error* untuk memvalidasi dari beberapa konstanta yang telah dikeluarkan untuk mendapatkan satu buah konstanta yang dapat menggambarkan sirkumtansi dan fenomena geologi berdasarkan informasi lito densitas.



Gambar 5. Topografi area penelitian. Peta ini dibuat berdasarkan data SRTM. Area berwarna ungu merupakan area dengan elevasi tinggi sedangkan area dengan warna abu-abu merupakan area dengan elevasi rendah.

Diagram Alir Pengolahan

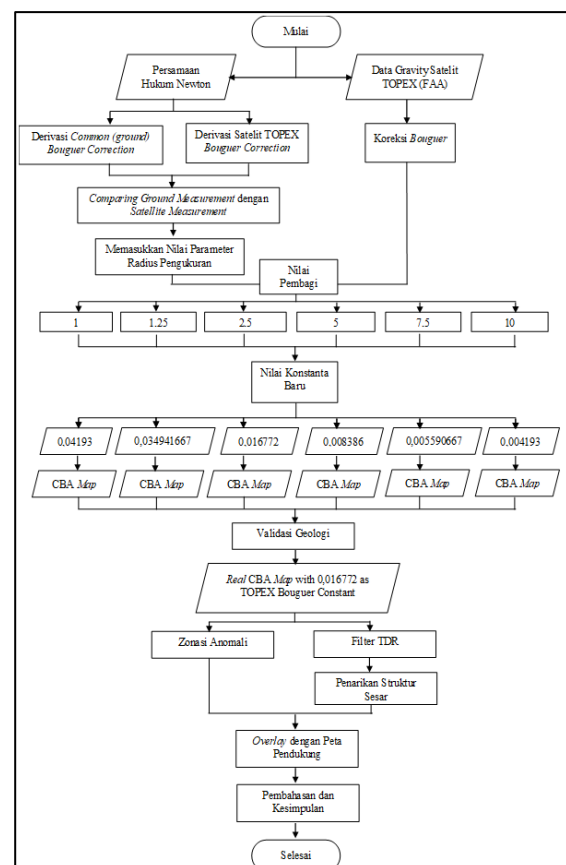
Data hasil pengukuran satelit TOPEX merupakan data yang berbentuk FAA (*Free Air Anomaly*) yang kemudian akan dilakukan pengolahan berupa koreksi *Bouguer* untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly*. Permasalahan utama muncul ketika pengolahan data gravitasi dilakukan secara konvensional. Dimana pengolahan secara konvensional tersebut menggunakan konstanta koreksi *Bouguer* yang telah ditemukan sebelumnya yakni **0,04193**. Pada data gravitasi *satellite* apabila pengolahan menggunakan

konstanta tersebut maka data CBA yang didapatkan tidak menggambarkan keadaan lito-densitas dan sirkumtansi geologi daerah penelitian sebagaimana mestinya. Melainkan data yang telah dihasilkan tersebut justru menjadi data rusak dan rancu, karena fungsi topografi pada koreksi bouguer tersebut terlalu dominan sehingga hasil reduksi justru menampilkan bentukan topografi yang terbalik. Hal tersebut terjadi karena operasi pengurangan atau reduksi nilai gravitasi pada koreksi *Bouguer* yang terlalu besar.

Daerah penelitian memiliki rentang nilai elevasi sebesar 4923 meter, dengan elevasi maksimal 2397 meter dan elevasi minimal -2526 meter. Hal tersebut yang menyebabkan nilai koreksi *Bouguer* menggunakan konstanta **0,04193** juga memiliki rentang yang cukup besar dengan nilai maksimal 241.21 mGal dan nilai minimal 254.19 mGal. Data FAA yang didapat memiliki rentang yang lebih kecil, yaitu 249.7 mGal hingga -74.3 mGal. Sehingga apabila dilakukan reduksi menggunakan nilai koreksi *Bouguer* pada data observasi gravitasi satelit TOPEX, malah menunjukkan ekspresi topografi yang terbalik. Hal dikarenakan nilai koreksi *Bouguer* yang terlalu besar akan mengurangkan nilai observasi. Sehingga nilai akhir yang didapatkan berubah menjadi sangat kecil.

Berdasarkan perbandingan persamaan hasil derivasi pada pengukuran gravitasi permukaan terhadap pengukuran gravitasi satelit, dengan memasukan nilai jari jari bumi (r) sebesar 6371 km dan ketinggian (h) stasiun pengukuran TOPEX sebesar 1340 km didapatkan nilai pembagi (*divider*) untuk *Common Bouguer Constant*. Nilai pembagi (*divider*) tersebut memiliki kisaran antara 1.25 sampai 10 satuan. Kemudian nilai tersebut digunakan sebagai referensi dalam menentukan

konstanta Bouguer baru khusus *satellite TOPEX*. Dimana konstanta baru tersebut merupakan hasil dari rentang nilai koreksi *Bouguer* (sebelumnya) yang telah diperkecil. Cara untuk memperkecil rentang koreksi *Bouguer* ialah dengan membagi nilai koreksi tersebut dengan beberapa nilai pembagi (*divider*) terhadap konstanta *Bouguer* yang telah ditemukan sebelumnya. Pada penelitian ini menggunakan nilai pembagi sebagai berikut, 1.25, 2.5, 5, dan 7.5 (**Gambar 6**).



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Selanjutnya nilai konstanta yang telah diperkecil digunakan untuk mereduksi FAA (*Free Air Anomaly*) yang mana data tersebut masih dipengaruhi nilai gravitasi akibat kelebihan massa. Koreksi *Bouguer* yang dilakukan merupakan pengurangan kelebihan massa batuan dan massa tubuh air laut. Hasil dari koreksi tersebut dilakukan pembuatan peta sebaran nilai gravitasi dengan pemerian skala warna

berdasarkan prinsip distribusi normal. Penggunaan prinsip distribusi normal bertujuan untuk mempermudah membedakan nilai *high anomaly* dan *low anomaly*. Dilakukan perbandingan kelima peta yang telah dihasilkan serta memvalidasi setiap peta terhadap data pemetaan geologi berupa litologi dan sebaran struktur. Dimana data CBA divalidasi dengan litologi dan data *tilt derivative* divalidasi dengan sebaran struktur.

Setelah dihasilkan satu konstanta yang dapat menggambarkan sirkumstansi dan fenomena geologi secara akurat, hasil pengolahan data gravitasi satelit tersebut diinterpretasi dan dianalisis. Interpretasi tersebut bertujuan untuk menghasilkan peta zonasi anomali dan peta deliniasi struktur. Analisis matematis juga dilakukan dengan menerapkan filter *tilt derivative* untuk mempertegas depresi anomali yang diinterpretasikan sebagai kemenerusan struktur sesar berdasarkan data gravitasi.

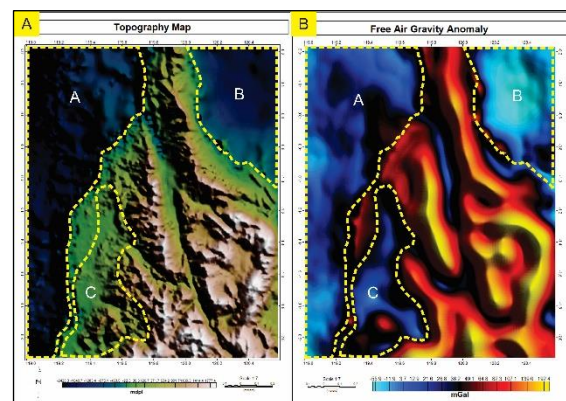
Selanjutnya, dari hasil analisis dan interpretasi dilakukan proses *Map Overlay* dengan citra satelit dan peta geologi untuk menguji kesesuaian hasil pemrosesan data gravitasi dengan keadaan geologi yang sebenarnya. Tahap terakhir adalah pembuatan kesimpulan dari hasil pengolahan, analisa, dan interpretasi yang telah dilakukan.

4. Hasil dan Pembahasan

Analisis FAA (*Free Air Anomaly*) dan Peta Topografi

Peta pada **Gambar 7** merupakan peta topografi dan peta FAA (*Free Air Anomaly*) dari pengukuran gravitasi dan *altitude* satelit TOPEX. Peta tersebut masih dipengaruhi efek topografi pada nilai pengukuran gravitasi, yang disebabkan oleh variasi kelebihan dan kekurangan massa. Topografi daerah penelitian masih

memberikan efek yang terlalu kuat sehingga peta yang dihasilkan kurang merepresentasikan lito-densitas dan fenomena geologi sebagaimana mestinya. Pengaruh topografi yang masih sangat kuat tersebut, dipresentasikan oleh geometri data gravitasi TOPEX yang menunjukkan kemiripan dengan pola ekspresi topografi. Dimana *High Anomaly* bertepatan dengan *High Altitude* dan *Low Anomaly* bertepatan pada *Low Altitude*.



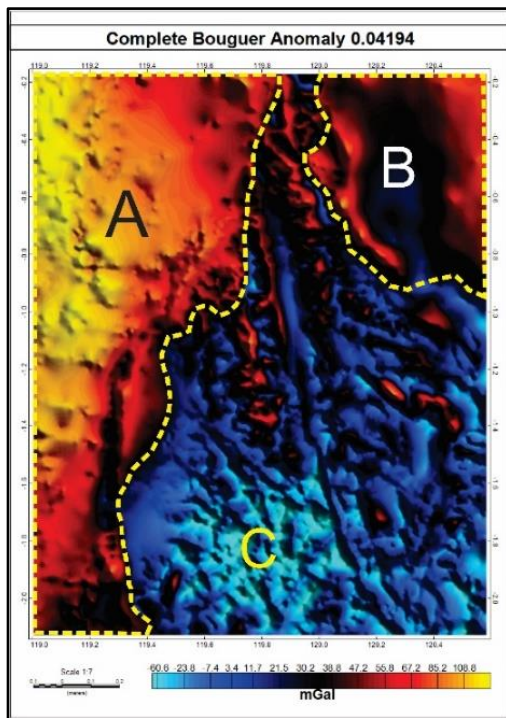
Gambar 7. Analisis *Free Air Anomaly* (A) Peta Topografi (B) Peta FAA (*Free Air Anomaly*).

Hal ini ditunjukkan dengan daerah laut yang berwarna biru hingga hitam pada peta topografi memiliki nilai gravitasi yang rendah pada peta FAA (*Free Air Anomaly*) dibandingkan daerah daratan yang digambarkan dengan warna hijau hingga coklat pada peta topografi yang memiliki nilai gravitasi yang relatif tinggi pada peta FAA. Area (A) pada peta topografi dan peta FAA memiliki elevasi yang lebih rendah dibandingkan area (B), namun pada hasil pengukuran TOPEX area (A) memiliki nilai gravitasi yang lebih tinggi dibanding area (B). Kemungkinan pada area (A) setelah dilakukan koreksi akan memiliki nilai gravitasi yang relatif tinggi dikarenakan operasi reduksi yang diaplikasikan.

Komparasi Peta dan Grafik Hasil Pengolahan

Setelah 2 buah rangkaian derivasi Hukum Newton diaplikasikan pada *Ground*

Gravity Measurement yang menghasilkan *Common Bouguer Constant*, juga pada *Satellite Gravity Measurement*, kedua persamaan tersebut dibandingkan. Ternyata nilai konstanta *Bouguer* untuk pengukuran permukaan lebih besar dibandingkan pengukuran satelit. Hal tersebut tertera dalam penurunan rumus pada bagian landasan teori.



Gambar 8. *Overcorrected Complete Bouguer Map*

Oleh sebab itu terjadi peristiwa *overcorrected* pada pengolahan gravitasi menggunakan konstanta *Bouguer* yang biasa digunakan (**0.04193**). Nilai *overcorrected* tersebut secara teori dikarenakan adanya ketidakcocokan operasi reduksi pada koreksi *Bouguer*. Dimana *altitude* pengukuran satelit menyebabkan nilai pembacaan gravitasi menjadi semakin kecil yang disebabkan oleh jarak pisah kedua benda bermassa. Pernyataan tersebut sesuai dengan prinsip gravitasi Newtonian.

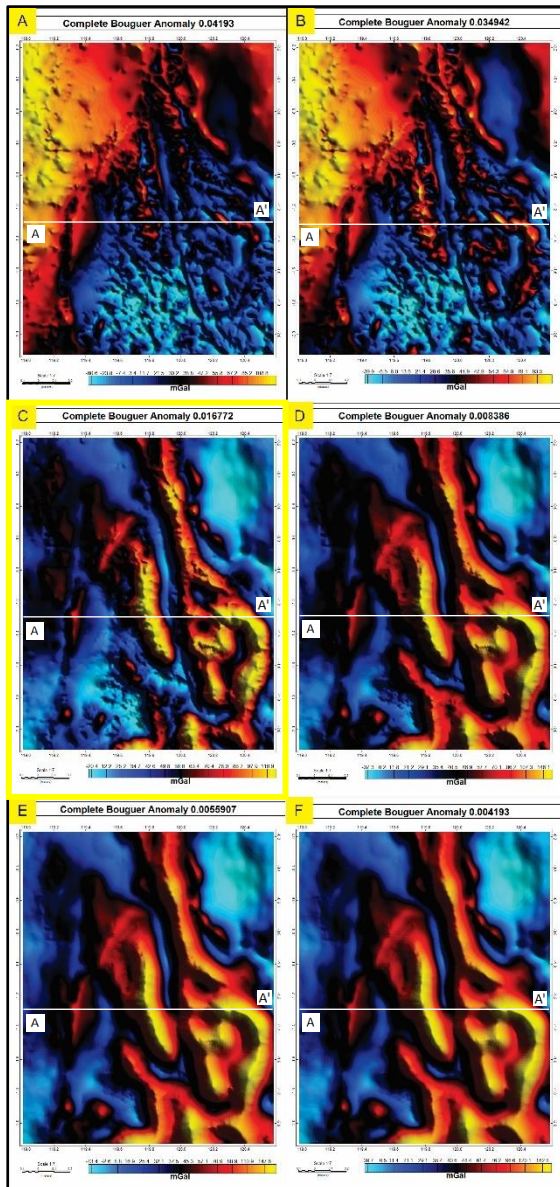
Pada pengukuran gravitasi satelit TOPEX, nilai koreksi pada *common Bouguer constant* tidak memperhitungkan perbedaan jarak antara stasiun TOPEX

dengan pusat massa bumi. Sehingga operasi koreksi *Bouguer* yang diberikan terlalu besar. Peristiwa *overcorrected* tersebut ditunjukkan pada **Gambar 8**.

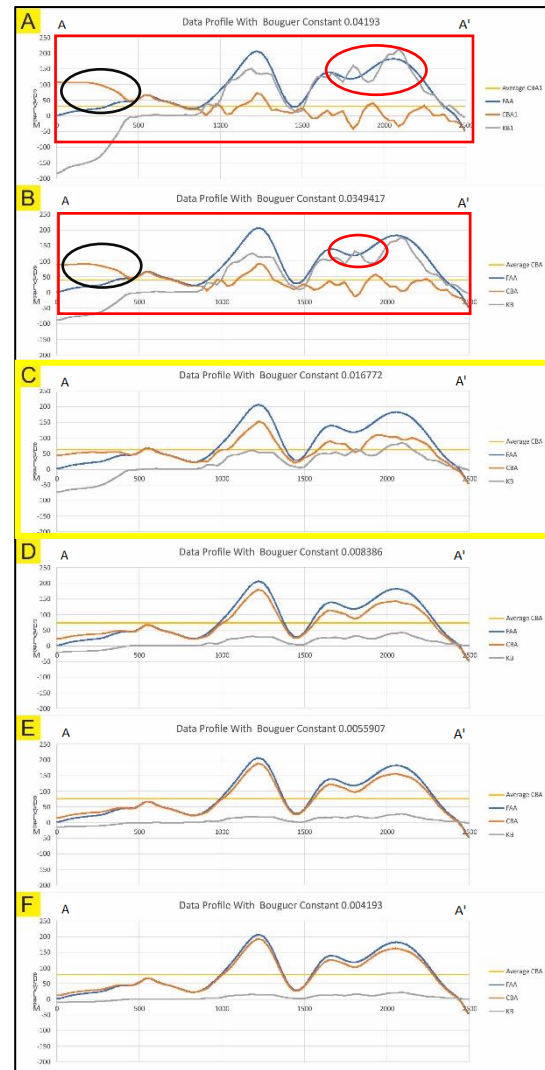
Pada peta yang ditunjukkan **Gambar 8**. diatas setelah dilakukan koreksi *Bouguer* menggunakan konstanta **0,04193** justru menampakkan sebuah bentuk yang menunjukkan topografi terbalik. Bentuk topografi terbalik tersebut ditunjukkan pada area (A) dan area (B) yang memiliki nilai variasi gravitasi yang tinggi secara signifikan. Dimana kedua area tersebut pada peta topografi adalah morfologi cekungan laut. Kemudian pada area (C) terlihat bentukan yang acak dan cenderung menampakkan sesuatu yang rancu dengan banyaknya *closure* (kontur tertutup) yang tercipta. Oleh sebab itu dilakukan pengecilan rentang koreksi *Bouguer* dengan beberapa nilai pembagi (*divider*) yang didapatkan dari perbandingan penurunan rumus pada pengukuran gravitasi permukaan dan pengukuran gravitasi satelit.

Terdapat 5 (lima) nilai pembagi diantaranya 1.25, 2.5, 5, 7.5, 10. Rentang angka tersebut didapatkan setelah memasukkan parameter radius (r) pengukuran pada *Ground Gravity Measurement* dan *Satellite Gravity Measurement*. Dimana nilai jari jari bumi (r) sebesar 6371 km dan ketinggian (h) stasiun pengukuran TOPEX berkisar pada ketinggian 1340 km. Kemudian berdasarkan nilai pembagi tersebut didapatkan konstanta *Bouguer* yang telah memperhitungkan jarak ukur satelit TOPEX diantaranya adalah 0.034941667, **0.016772**, 0.008386, 0.005590667, dan 0.004193. Namun, nilai konstanta tersebut masih harus dilakukan seleksi dengan cara dilakukan validasi *try and error* pada peta dan *slicing data*. Dimana analisis peta merupakan proses kualitatif dan *slicing*

data merupakan proses kuantitatif. Proses ini perlu dilakukan sehingga nilai konstanta tersebut dapat divalidasi dengan data kenampakan geologi yang telah dilakukan penelitian sebelumnya. Perbandingan peta dan *slicing data* tersebut ditampilkan pada **Gambar 9** dan **Gambar 10 (A)** sampai dengan (F) beserta keterangan yang telah disajikan.



Gambar 9. Perbandingan Peta Hasil Pengolahan Menggunakan Variasi Konstata *Bouguer* Baru (A) CBA Map dengan *common (ground) Bouguer constant* (0.04193), (B) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.034942), (C) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.016772), (D) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.008386), (E) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.005590667), (F) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.004193).



Gambar 10. Perbandingan Grafik Hasil Pengolahan Menggunakan Variasi Konstata *Bouguer* Baru (A) CBA Map dengan *common (ground) Bouguer constant* (0.04193), (B) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.034942), (C) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.016772), (D) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.008386), (E) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.005590667), (F) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.004193).

Berdasarkan **Gambar 9** dan **Gambar 10** terdapat berbagai macam perbedaan pada masing-masing peta dan grafik yang dihasilkan. Konstanta yang tepat adalah konstanta yang dapat mereduksi efek tarikan gravitasi yang diakibatkan oleh kelebihan dan kekurangan massa namun tidak menghilangkan nilai variasi gravitasi yang diakibatkan karena lito-densitas. Pada peta (A) dan peta (B) masih memperlihatkan bentukan yang acak yang merepresentasikan peristiwa *overcorrected*

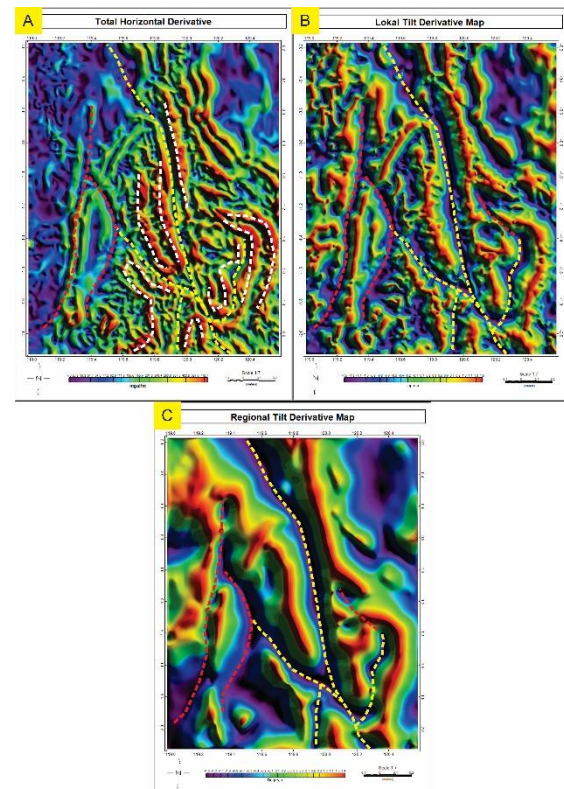
pada pengolahan. Hal tersebut juga diperlihatkan pada grafik *slicing data* yang ditunjukkan dengan kotak berwarna merah pada grafik (A) dan (B). Pada grafik tersebut nilai operasi koreksi melebihi nilai FAA (ditunjukkan dengan lingkaran merah), dimana hal tersebut merupakan penyebab terjadinya *overcorrected*. Selain itu area yang ditunjukkan dengan lingkaran hitam juga menggambarkan peristiwa *overcorrected* dimana pada area tersebut merupakan morfologi laut yang didominasi oleh batuan sedimen namun memiliki nilai variasi gravitasi yang sangat tinggi.

Pada peta (D), (E) dan (F) nilai konstanta yang dihasilkan belum merepresentasikan fenomena geologi daerah penelitian dikarenakan operasi koreksi pada nilai tersebut masih bersifat *undercorrected*. Dapat dikatakan *undercorrected* karena nilai CBA (*Complete Bouguer Anomaly*) yang dihasilkan masih menyerupai topografi daerah penelitian. Kemiripan terhadap bentukan topografi juga dapat dilihat pada grafik *slicing data* yang ditunjukkan oleh grafik (D), (E) dan (F). Hal tersebut dikarenakan konstanta *Bouguer* terlalu kecil yang menyebabkan nilai operasi koreksi *Bouguer* juga terlalu kecil. Sehingga pengaruh topografi masih belum bisa dihilangkan dan masih menutupi informasi lito-densitas. Dari hasil analisis kualitatif dan kuantitatif yang telah dilakukan selanjutnya dijalankan proses analisis kelurusan dan depresi anomali serta validasi pada data geologi permukaan.

Analisis Kelurusan dan Depresi Anomali

Dibutuhkan *processing* tambahan menggunakan filter matematis untuk menentukan area sesar. Dimana sesar pada data gravitasi dicerminkan oleh bentukan depresi anomali dengan geometri berupa kelurusan. Menggunakan filter *Tilt Derivative* yang berfungsi untuk menonjolkan bentuk depresi serta

punggungan anomali, penarikan sesar pada daerah penelitian dapat dilakukan. Filter ini merupakan filter lanjutan dari *gradient horizontal* yang memiliki prinsip perhitungan gradien atau nilai perubahan gravitasi pada sumbu horizontal. Dengan menerapkan filter THD (*Total Horizontal Derivative*) dan *Tilt Derivative* (**Gambar 11**) geometri anomali sesar serta batas litologi menjadi mudah digambarkan.



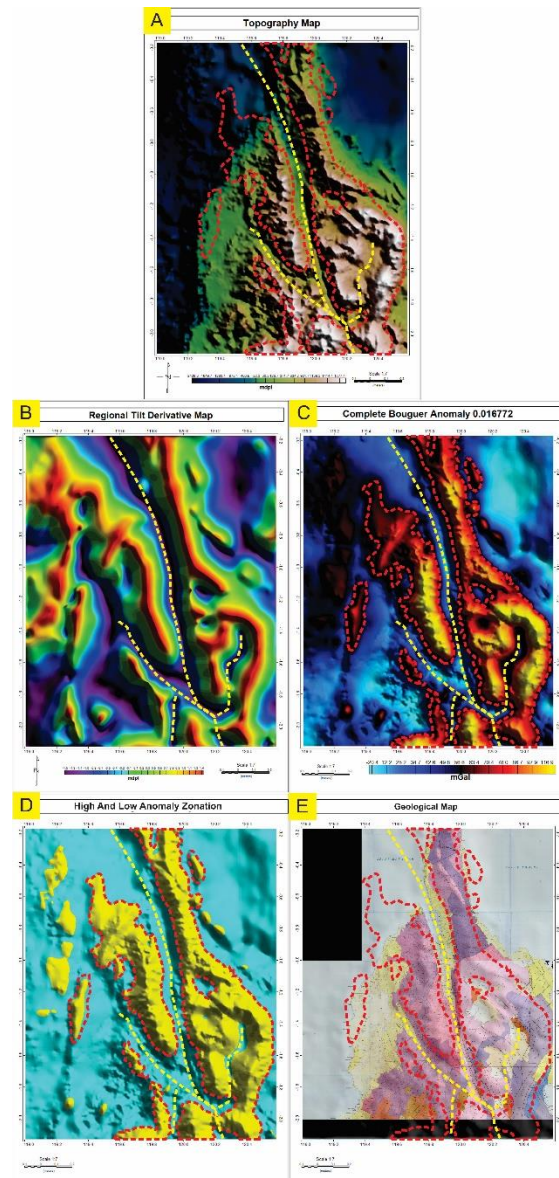
Gambar 11. Analisis Depresi dan Batas Anomali Berdasarkan *Total Horizontal Derivative* dan *Tilt Derivative* (A) Peta *Total Horizontal Derivative* (B) Peta *Lokal Tilt Derivative* (C) Peta *Regional Tilt Derivative*.

Berdasarkan hasil pemfilteran tersebut didapatkan 3 peta yaitu 1 peta THD (*Total Horizontal Derivative*) kemudian 2 peta TDR (*Tilt Derivative*) lokal dan regional. Dari hasil tersebut didapatkan kelurusan anomali yang diinterpretasikan sebagai sesar. Dimana garis putus-putus berwarna kuning merepresentasikan sesar mayor (utama) yang cenderung bersifat regional. Dapat dikatakan regional karena depresi anomali tampak jelas pada TDR lokal dan TDR regional. Kemudian garis putus-putus

berwarna merah diinterpretasikan sebagai sesar minor (sesar pelengkap) yang mana kemungkinan sesar tersebut muncul setelah terjadinya sesar utama. Hal tersebut dikarenakan depresi anomali hanya terlihat jelas pada peta TDR lokal saja. Kemudian pada peta THD garis putus-putus berwarna putih diinterpretasikan sebagai batas anomali, baik batas litologi ataupun batas kontak dengan area sesar. Dari ketiga analisis tersebut selanjutnya dijadikan referensi dalam validasi pada data geologi terhadap sesar yang ada.

Validasi Peta dan Grafik Hasil Pengolahan

Berdasarkan perbandingan peta dan grafik data yang telah dilakukan dapat terlihat bahwa konstanta *Bouguer* biasa justru menghasilkan data yang acak untuk pengukuran *satellite* TOPEX. Ketika dilakukan validasi terhadap data geologi baik litologi maupun struktur pada peta CBA tersebut sama sekali tidak menggambarkan sirkumstansi geologi yang sebenarnya. Sedangkan peta yang diaplikasikan koreksi *Bouguer* dengan nilai pembagi 2.5 dapat menunjukkan pola kelurusan struktur sesar besar palu koro dan sebaran litologi secara akurat pada daerah penelitian. Hal tersebut dibuktikan dengan **Gambar 12** (C dan E). Zonasi *high anomaly* dapat secara akurat melingkari daerah yang notabene adalah batuan kristalin (batuan beku dan batuan metamorf). Di sisi lain *low anomaly* menunjukkan area batuan sedimen dan batuan kristalin yang terkena struktur serta struktur sesar besar palu koro itu sendiri. Oleh karena itu berdasarkan penelitian ini didapatkan konstanta *Bouguer* baru khusus *satellite measurement* dengan nilai **0.016772**.



Gambar 12. Analisis Gravitasi Berdasarkan Peta CBA Dengan Konstanta *Bouguer* Baru (0.016772) (A) Peta Topografi Daerah Penelitian (B) Analisis Matematis *Tilt Derivative* (C) *Complete Bouguer Anomaly Map* (D) Zonasi Anomali Berdasarkan Distribusi Normal (E) *Overlay* Zonasi Anomali dan *Picking* Sesar Pada Data Geologi Daerah Penelitian.

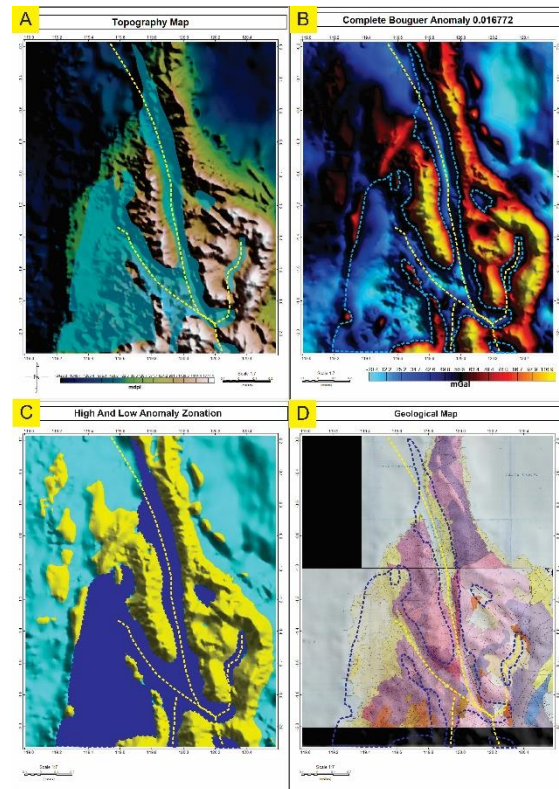
Analisis Mitigasi

Dilakukan analisis mitigasi berdasarkan *Low Gravity Zone* dan delineasi struktur yang didapatkan dari *Low Tilt Angel*. Anomali tinggi pada *CBA Map* ditunjukkan dengan warna merah bata hingga kuning terang yang memiliki rentang nilai 56 mGal hingga 161 mGal dimana kuning adalah nilai tertinggi. Anomali rendah ditunjukkan dengan warna biru pekat hingga biru terang

yang memiliki rentang nilai -20.8 mGal hingga 50 mGal. Dimana biru terang adalah nilai terendah. Berdasarkan informasi geologi regional daerah tersebut memiliki variasi batuan yang kompleks. Terdapat batuan sedimen dan juga kristalin baik beku dan juga metamorf. Berdasarkan nilai variasi gravitasi yang menggambarkan litodensitas area anomali tinggi diinterpretasikan sebagai batuan kristalin namun tidak dapat dibedakan antara beku dan metamorf dikarenakan kedua batuan tersebut memiliki densitas yang hampir sama. Area anomali rendah dapat diinterpretasikan menjadi dua hal: apabila geometri anomali memiliki pola memanjang dan kelurusan dapat diperkirakan sebagai struktur sesar. Kemudian apabila geometri anomali memiliki pola yang luas atau menyebar membentuk area maka dapat diperkirakan sebagai batuan sedimen atau lapukan batuan dari *provenance* (Batuan Asal).

Dari hasil analisa dan interpretasi didapatkan area *high gravity* dan *low gravity* serta kelurusan sesar. Selanjutnya hasil tersebut diproyeksikan pada citra *Google Earth* dan morfologi daerah penelitian untuk mendapatkan gambaran pada daerah penelitian. Terlihat pada **Gambar 13** (A) bahwa kelurusan sesar yang telah dipick pada analisa *Tilt Derivative* berada pada morfologi lembah. Diketahui bahwa lembah tersebut tercipta karena adanya sesar besar palu koro yang memotong batuan di daerah penelitian. Sesar tersebut terus menggerus batuan dan menyebabkan deformasi yang ekstrim. Sehingga proses detritasi berlangsung secara terus menerus. Pada Gambar (A) dan (D) dapat diamati bahwa *Low Anomaly* juga cenderung berada pada lembah dan elevasi rendah sedangkan *High Anomaly* berada pada punggung. Karena sebaran gravitasi mencerminkan sebaran *litodensity* maka pada daerah punggung didominasi

oleh batuan yang memiliki densitas serta kekompakan yang lebih tinggi. Punggungan tersebut dapat bertahan dari pelapukan dan erosi berkat resistensi tubuh batuan itu sendiri. Dimana pada punggung tersebut didominasi oleh batuan kristalin yang cenderung dapat mempertahankan tubuhnya.



Gambar 13. Analisis Mitigasi Berdasarkan Data Gravitasi Yang Telah Diaplikasikan Konstanta *Bouguer* Khusus TOPEX (0.016772). (A) Overlay *Low Anomaly* pada morfologi daerah penelitian. (B) Zonasi *Low Anomaly* pada *CBA Map*. (C) Zonasi *Low Anomaly* menggunakan prinsip distribusi normal. (D) Overlay *Low Anomaly* pada peta geologi daerah penelitian.

High Gravity diidentifikasi sebagai area batuan kristalin. Area *Low Gravity* yang berada di barat daya peta diinterpretasikan sebagai area batuan sedimen. Secara genesa batuan sedimen tersebut terbentuk karena adanya pelapukan dari batuan kristalin yang menjadi *protolite* (batuan asal) yang kemudian terlitifikasi pada area tersebut. Oleh karena itu area yang didominasi batuan sedimen memiliki elevasi yang cenderung rendah dengan kelereng yang landai. Kelurusan lembah anomali dengan

arah relatif utara-selatan yang berada di tengah peta menunjukkan *low gravity*. Area tersebut diperkirakan adalah zona sesar utama Palu-koro

Dilakukan korelasi dengan peta geologi untuk analisa lanjutan. Dari hasil pengolahan *unconventional* ternyata cukup menghasilkan gambaran lito-densitas yang sesuai dengan keadaan geologi. Terbukti bahwa peta geologi area *high gravity* terletak pada kompleks formasi batuan yang didominasi dengan batuan kristalin yang umumnya berada pada daerah punggungan. Serta pada *low gravity* bertepatan pada area sesar serta batuan sedimen. Terdapat kesesuaian antara data geofisika dengan data geologi. Berdasarkan cara pengolahan baru yang menjadi titik berat pada penelitian ini.

Setelah dilakukan analisis tersebut dapat diketahui area yang memiliki tingkat bahaya dan resiko yang lebih tinggi. Secara teori ilmiah area yang ditunjukkan dengan blok warna biru pada **Gambar 13 (A)** adalah area yang memiliki nilai gravitasi yang rendah. Sehingga area tersebut mencerminkan lito-densitas yang rendah juga. Dominasi pada daerah tersebut adalah batuan sedimen dan alluvium yang merupakan manifestasi lapangan dari sesar besar palu koro. Apabila sesar besar palu koro itu aktif kembali tentunya akan menghasilkan getaran yang sangat dahsyat. Batuan yang kurang kompak yang memiliki densitas yang rendah ketika dilalui oleh gelombang gempa akan cenderung menjebak gelombang gempa dengan hanya sedikit presentase gelombang yang diteruskan. Oleh karena itu *amplitude* gelombang pada daerah tersebut akan sangat tinggi yang menyebabkan *magnitude* gempa juga menjadi tinggi. Berbeda dengan area yang memiliki tingkat kekompakan yang tinggi. Area dengan *high density* akan cenderung

meneruskan gelombang sehingga amplitude gelombang pada area tersebut cenderung rendah sehingga *magnitude* gempa juga rendah.

Oleh sebab itu area yang ditandai dengan warna blok biru pada **Gambar 13 (A)** merupakan area yang rawan akan bencana kegempaan. Dengan kemungkinan *magnitude* yang lebih besar dibandingkan area yang lebih stabil pada batuan kristalin yang tidak terkena sesar. Pada area alluvium yang berasosiasi dengan sesar besar palu koro memiliki tingkat resiko yang lebih besar. Hal tersebut disebabkan karena semakin rendah ikatan pertikel pada suatu batuan akan semakin besar dampak yang dihasilkan ketika dilalui gelombang gempa terutama gelombang permukaan. Pada area tersebut diidentifikasi sebagai area yang lebih rawan akan peristiwa likuifaksi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan perlakuan pengolahan data secara *unconventional* yaitu memperkecil konstanta pengali serta analisa peta yang dihasilkan didapatkan kesimpulan sebagai berikut

- Perbandingan persamaan *derivative* antara *ground measurement* dan *satellite TOPEX measurement* menunjukkan bahwa konstanta dalam melakukan koreksi *Bouguer* pada pengukuran *satellite TOPEX* seharusnya lebih kecil dibandingkan pengukuran permukaan.
- Dari dasar pemikiran tersebut didapatkan konstanta baru untuk *satellite TOPEX measurement* sebesar **0.016772** yang menggantikan **0.04193**.
- Peta CBA yang telah diaplikasikan konstanta baru tersebut dapat memperlihatkan sirkumstansi geologi yang lebih sesuai baik litologi maupun sesar dibandingkan peta CBA yang

masih menggunakan konstanta *Bouguer* biasa. Kesesuaian tersebut telah tervalidasi oleh data geologi permukaan yang menggambarkan sebaran litologi dan *structure*.

- *High gravity* diinterpretasikan sebagai batuan kristalin dan *low gravity* diinterpretasikan sebagai sesar dan batuan sedimen ataupun alluvium hasil lapukan sesar besar palu koro.
- Pada *low gravity* yang memiliki pola kelurusan diinterpretasi sebagai sesar. Area ini ditemukan di beberapa tempat, salah satunya adalah di area tengah. Kelurusan tersebut diinterpretasikan sebagai zona sesar Palu-Koro. Pada *low gravity* yang memiliki pola melebar diinterpretasikan sebagai batuan sedimen. Area tersebut ditemukan di bagian barat daya dan timur daerah penelitian.
- Area *low gravity* yang diinterpretasikan sebagai batuan sedimen memiliki resiko atas kegempaan yang cukup tinggi dibandingkan area *low gravity* yang diinterpretasikan sebagai alluvium pada lembah hasil sesar palu koro yang memiliki resiko atas kegempaan yang sangat tinggi.

Saran

Diperlukan pemahaman konsep tentang reduksi nilai gravitasi agar dapat melakukan pengolahan dengan baik dan benar sehingga menghasilkan peta yang sesuai dengan fenomena geologi yang ada. *Overlay* dengan peta-peta yang sudah dibuat oleh peneliti sebelumnya juga dibutuhkan untuk mengkonfirmasi kebenaran hasil pemrosesan data.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada Tuhan Yang Maha ESA yang telah memberikan kesempatan.

Serta kepada orang tua yang selalu memberikan Doa.

Daftar Pustaka

Arisoy, M. Ö., & Dikmen, Ü. 2013. Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle. *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 73-82.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. 2018. Press Release NO: UM.505/9/D3/IX/2018. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. 2018. Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi Utara Donggala Sulteng. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

Bellier, O., Se´brier, M., Seward, D., Beaudouin, T., Villeneuve, M., & Putranto, E., 2006. Fission track and fault kinematics analyses for new insight. *Tectonophysics* 413, 201–220.

Blakely, R. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bureau Gravimetique International. Land Gravity Data. Diakses pada 24 November 2019, dari <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data>.

- Cummins, P., 2017. Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction – introduction. London: *The Geological Society of London*.
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonics evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Science* 20, 353-431.
- Harmoko, U. 2012. Analisis Struktur dan Muka Air Tanah Sebagai Klarifikasi Model Konseptual Sistem Panas Bumi Candi Umbul, Kartoharjo Magelang., (p. Proceedings The 12TH Annual Indonesia Geothermal Association Meeting & Conference). Bandung.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Hoboken: Blackwell Science.
- Nomanbhoy, N., & Satake, K., 1995. Generation mechanism of tsunamis from the 1883 Krakatau eruption. *Geophysical Research Letters* Vol.22 No.4, 509-512.
- Prasetya, G., De Lange, W., & Healy, T., 2001. The Makassar Strait Tsunamigenic Region, *Natural Hazards* 24, 295–307.
- Rusydi, M., Efendi, R., Sandra, & Rahmawati. 2018. Earthquake Hazard Analysis Use Vs30 Data In Palu. IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 979, 1-10.
- Santoso, D. 2002. *Pengantar Teknik Geofisika*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- 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*, pp. 192-199.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., . . . Spakman, W., 2006. Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, 1-15.
- Supartoyo, Sulaiman, C., & Junaedi, D., 2014. Kelas tektonik sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol. 5 No. 2, 111 - 128.
- Telford, W., Goldart, I., & Sheriff, R. 1990. *Applied Geophysics 2nd ed.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Bemmelen, R. 1949. *The Geology of Indonesia Vol. 1A* . The Hague: Government Printing Office.

STUDI AWAL ABU VULKANIK ERUPSI MERAPI PADA 11 MEI DAN 1 JUNI 2018 BERDASARKAN MINERALOGI DAN GEOKIMIA

Jesslyn Jane^{1*}, Naomi Geraldine Situmorang¹

¹Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*jjhemimorphite@gmail.com

ABSTRAK

Gunung Merapi yang terletak di daerah pemukiman padat penduduk memberikan dampak pada kehidupan masyarakat, sehingga penting untuk dilakukan penelitian dan karakterisasi yang dapat membantu dalam mitigasi bencana. Penelitian pada erupsi gunung api cenderung terfokus kepada erupsi magmatik, sedangkan penelitian mengenai produk erupsi freatik dan freatomagmatik belum banyak dilakukan. Gunung Merapi memiliki siklus erupsi rata-rata setiap 4 tahun dengan tipe erupsi freatik, freatomagmatik, dan magmatik yang saling bergantian. Erupsi magmatik terakhir terjadi pada tahun 2010 dan diikuti oleh erupsi freatik tahun 2012-2014. Pada tahun 2018, Merapi kembali mengalami erupsi freatik pada tanggal 11 Mei 2018 dan diikuti dengan erupsi freatomagmatik pada tanggal 1 Juni 2018 (Santoso, et al., 2018). Untuk memahami karakteristik kedua erupsi tahun 2018 tersebut, peneliti melakukan studi mineralogi dan geokimia pada produk abu vulkanik. Berdasarkan data analisis mineralogi, sampel abu erupsi Gunung Merapi tanggal 11 Mei dan 1 Juni 2018 mengandung plagioklas, piroksen, dan litik, namun skoria hanya ditemukan pada sampel abu 1 Juni 2018. Kelimpahan mineral plagioklas pada produk 1 Juni 2018 lebih besar (53%) dibandingkan dengan produk 11 Mei 2018 (45%), sedangkan kelimpahan mineral piroksen antara kedua sampel tersebut tidak berbeda secara signifikan. Tingkat kesegaran litik sampel abu 11 Mei 2018 lebih rendah daripada produk 1 Juni 2018. Berdasarkan data analisis geokimia, komposisi berat SiO₂ pada produk 11 Mei 2018 mengalami penurunan terhadap produk 1 Juni 2018. Berdasarkan diagram Harker, kedua produk *event* menunjukkan kecenderungan peningkatan Na₂O dan K₂O, sedangkan penurunan pada MgO, CaO, TiO₂, dan Fe₂O₃. MnO dan Al₂O₃ tidak menunjukkan korelasi sistematis dengan konsentrasi SiO₂.

Kata Kunci : Merapi, abu, mineralogi, geokimia, mitigasi

1. Pendahuluan

Gunung Merapi adalah salah satu gunungapi yang terletak 25-30 km di utara Kota Yogyakarta, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia, dan dikelilingi oleh kota yang padat penduduk dengan jumlah populasi ±1.6 juta warga (Surono, et al., 2012; Pallister, et al., 2013; Preece, 2014). Gunung Merapi memiliki tipe erupsi sebagai berikut, antara lain: freatik, freatomagmatik, dan magmatik yang saling bergantian (Sayudi, et al., 2018). Letusan terakhir Gunung Merapi yang bersifat magmatik terjadi pada tahun 2010. Erupsi ini merupakan erupsi terbesar yang dihasilkan oleh Gunung Merapi sejak tahun 1872 (Cronin, et al., 2013). Setelah erupsi pada tahun 2010, terjadi erupsi-

erupsi freatik sepanjang tahun 2012 hingga tahun 2014. Setelah letusan freatik 2014, Merapi mengalami letusan freatik lagi pada tanggal 11 Mei 2018, di mana letusan ini muncul setelah 4 tahun tidak menunjukkan adanya kenaikan aktivitas. Letusan ini memiliki kolom setinggi 5500 m dari atas puncak, dan tidak didahului oleh prekursor yang jelas berupa deformasi, seismik, maupun geokimia. Erupsi ini kemudian diikuti oleh rangkaian erupsi pada tanggal 21 Mei, 23 Mei, 24 Mei, dan 1 Juni 2018.

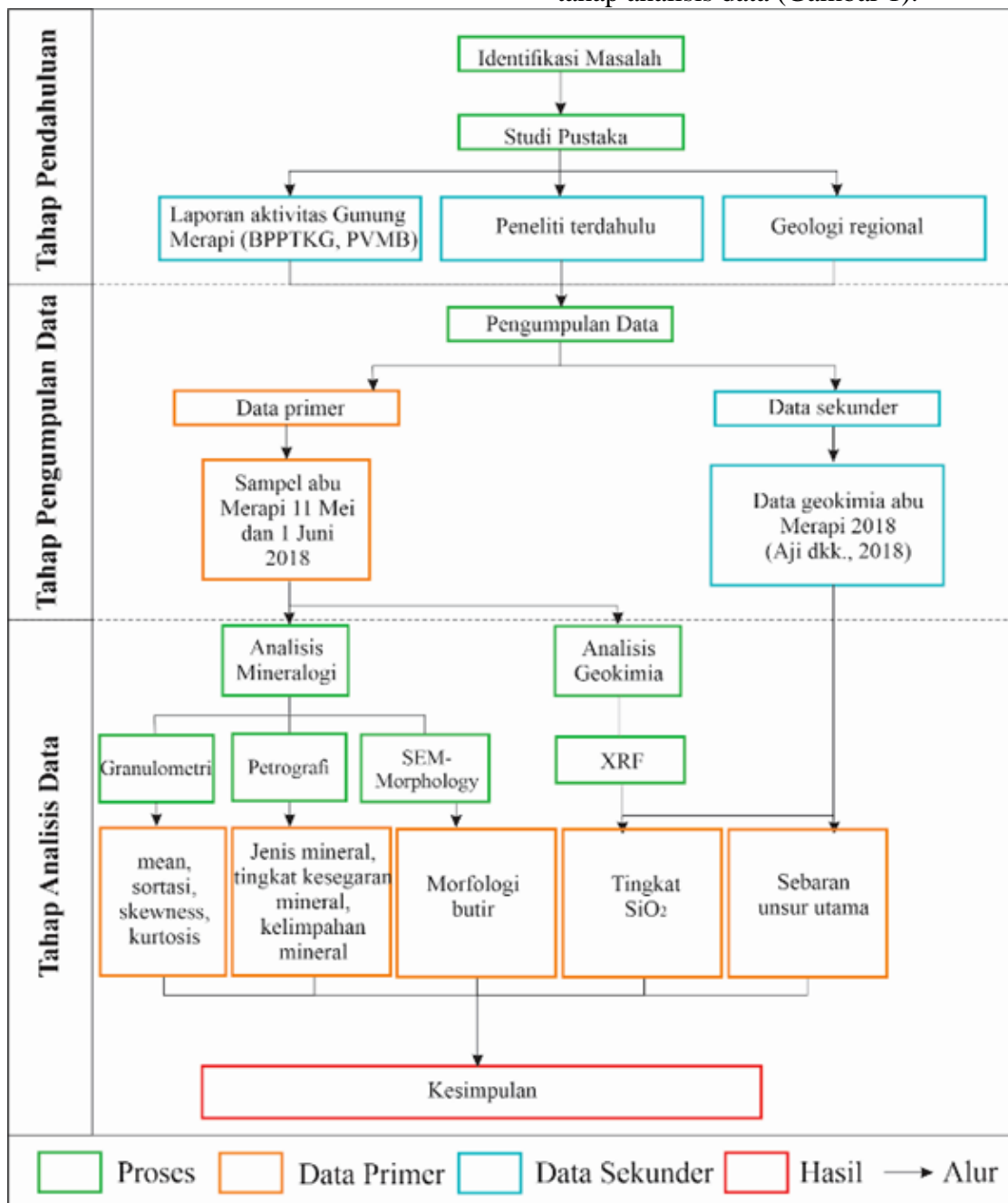
Berdasarkan rekaman seismik, erupsi Merapi dari periode 11 Mei sampai dengan 1 Juni 2018 merupakan erupsi peralihan dari freatik menuju freatomagmatik (Santoso, et al., 2018). Penelitian yang telah dilakukan pada hasil erupsi Merapi

periode 11 Mei sampai 1 Juni 2018 hanya terbatas pada karakter morfologi butir dan geokimia yang disajikan dalam Diagram *Total Alkali Silica* (TAS) (Aji, et al., 2018). Penelitian ini bertujuan untuk meninjau aspek mineralogi lainnya seperti petrologi, petrografi, granulometri dan morfologi butir, dan juga aspek geokimia berupa perbandingan komposisi berat yang disajikan dalam Diagram Harker, sehingga dapat digunakan untuk mempelajari hubungan antara hasil erupsi dengan tipe

erupsi pada Gunung Merapi. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya informasi pada Peta Bencana Gunung Merapi, sehingga dapat menambah wawasan dalam mitigasi bencana.

2. Metodologi Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu: tahap pendahuluan, tahap pengumpulan data, dan tahap analisis data (Gambar 1).



2.1. Tahap Pendahuluan

Tahapan ini meliputi kajian data-data sekunder berupa geologi regional, kajian peneliti terdahulu seperti data persebaran produk letusan, data informasi laporan aktivitas Gunung Merapi dari laman BPPTKG, dan data lokasi pengambilan sampel sebagai acuan dalam observasi lapangan.

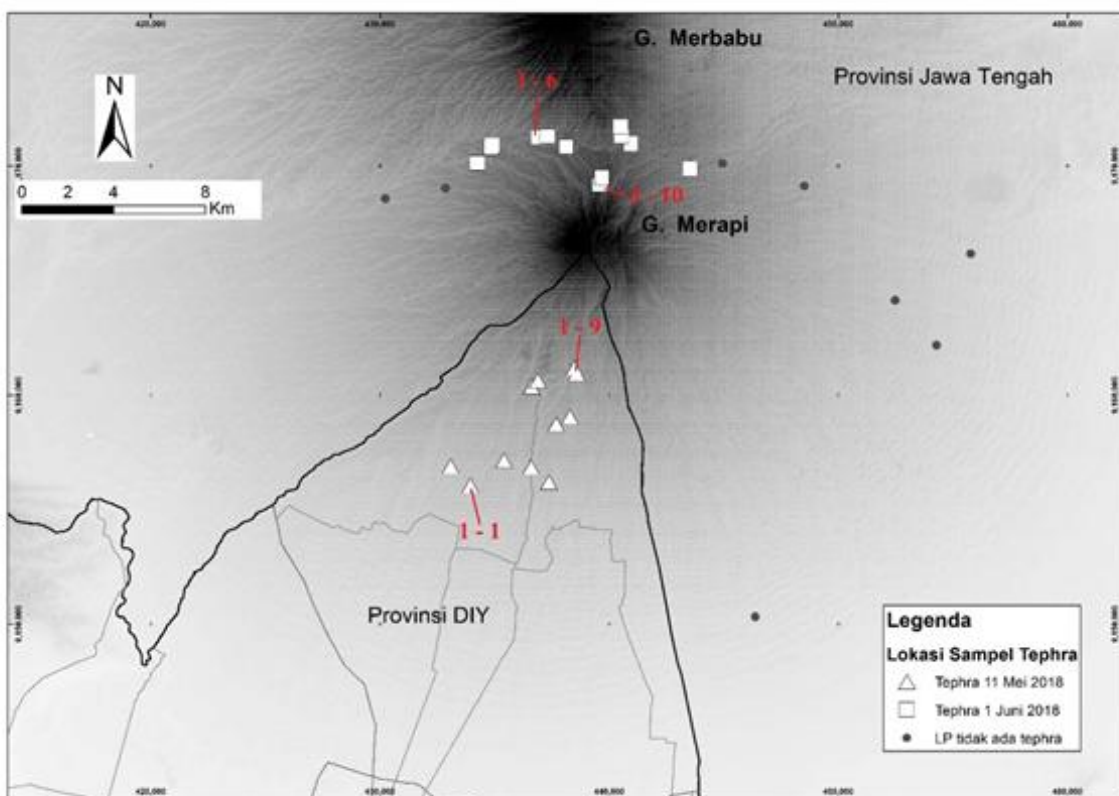
2.2. Tahap Pengumpulan Data

Data yang dikumpul dibagi menjadi dua yaitu data primer dan data sekunder. Data primer yang diambil dari lapangan berupa sampel abu vulkanik. Sampel abu vulkanik pada erupsi 11 Mei 2018 jatuh di daerah Kaliurang, Kaliadem, dan Ngaglik, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, sedangkan sampel erupsi 1 Juni 2018 jatuh di daerah Kecamatan Selo, Kabupaten

Boyolali, Provinsi Jawa Tengah (Gambar 2). Pengambilan data sampel dilakukan sebanyak tiga kali, yakni pada tanggal 11 dan 13 Mei 2018 (berturut-turut 1 dan 10 sampel) untuk erupsi 11 Mei 2018, serta pada tanggal 2 Juni 2018 (9 sampel) untuk erupsi 1 Juni 2018 (Gambar 3). Selain pengambilan sampel abu, data geologi yang diambil pada setiap lokasi pengamatan berupa koordinat lokasi pengamatan dan elevasi. Data sekunder diperoleh dari data peneliti terdahulu berupa data geokimia jatuhnya abu vulkanik 11 Mei dan 1 Juni 2018 (Aji, et al., 2018).

2.3. Tahap Analisis Data

Tahap analisis data dilakukan dengan metode granulometri, petrografi, *Scanning Electron Microscopy - Morphology* (SEM - *Morphology*), dan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Metode SEM-*Morphology* dan



Gambar 1 Peta sebaran lokasi pengamatan tephra erupsi Merapi 11 Mei dan 1 Juni 2018

XRF dilakukan bersama tim dari Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG). Sampel abu vulkanik dianalisis dengan metode granulometri dengan massa 25 gram \pm 5%. Sampel dibagi dan dipilih dengan menggunakan metode *quatering* kemudian diayak dengan ukuran *mesh* 30, 50, 80, 100, 140, dan 200 selama 10 menit dengan *shaker*. Setelah diayak, sampel yang tertinggal pada setiap *mesh* kemudian



Pengamatan geokimia dilakukan dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF). Karena metode XRF hanya dapat diaplikasikan pada sampel dengan massa minimal 40 gram, maka produk abu vulkanik yang dapat dianalisis hanya pada dua sampel hasil erupsi 11 Mei 2018 dan tiga sampel 1 Juni 2018. Sampel tersebut dianalisis dalam bentuk *pressed powder*. Metode XRF digunakan untuk menghasilkan data perbandingan



Gambar 2 Kenampakan abu vulkanik hasil erupsi Merapi 11 Mei (kiri) dan 1 Juni 2018 (kanan) dengan Merapi sebagai latar belakang

ditimbang dan dicatat. Berdasarkan metode tersebut didapatkan nilai *mean*, sortasi, *skewness*, dan kurtosis.

Selanjutnya, dilakukan analisis petrografi dari sayatan tipis dengan menggunakan mikroskop binokuler. Metode ini digunakan untuk menentukan jenis mineral, tingkat kesegaran mineral secara kualitatif, dan persentase kelimpahan mineral.

Sebelum melakukan metode SEM-*Morphology*, setiap sampel dibersihkan dengan *ultrasonic bath*, dikeringkan, dan ditimbang. Metode tersebut digunakan untuk menghasilkan foto morfologi butir abu vulkanik yang jelas dan bersih.

konsentrasi SiO_2 dan mengetahui sebaran unsur utama.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Mineralogi

Berdasarkan pengamatan terhadap dua puluh sampel, ditemukan bahwa erupsi 11 Mei 2018 dan 1 Juni 2018 memiliki karakteristik mineralogi yang berbeda (Tabel 1). Analisa granulometri menunjukkan bahwa hasil erupsi 11 Mei 2018 memiliki ukuran butir yang lebih kasar. Hal ini dibuktikan dengan adanya butir abu produk 11 Mei 2018 yang tertinggal di *mesh* ukur 35, sementara produk 1 Juni 2018 lolos seluruhnya dari ukuran *mesh* tersebut. Sebaran ukuran butir sampel 11 Mei 2018 lebih merata dibandingkan sampel 1 Juni 2018. Hal ini

mengindikasikan sortasi dari hasil erupsi 11 Mei 2018 lebih buruk dibandingkan hasil erupsi 1 Juni 2018. Tingkat sortasi yang buruk didukung dengan data *skewness* yang lebih kasar (*near symmetrical-very coarse skewed*) dan kurtosis yang *mesokurtic-*

tersusun atas mineral plagioklas (Andesin-Labradorit) (53%), piroksen (24%), dan litik (23%). Berdasarkan tingkat kesegaran mineral, abu vulkanik hasil erupsi 11 Mei 2018 memiliki tingkat pelapukan yang lebih intensif dibandingkan dengan produk

Perbedaan	11 Mei 2018		1 Juni 2018	
Ukuran butir	Lebih kasar		Lebih halus	
Sortasi	Buruk		Baik	
Komposisi	Piroksen	15%	Piroksen	17%
	Plagioklas (Andesin-Labradorit)	45%	Plagioklas (Andesin-Labradorit)	53%
	Litik Fragmen	40%	Litik Fragmen	23%
Kesegaran mineral	Kurang segar		Segar	

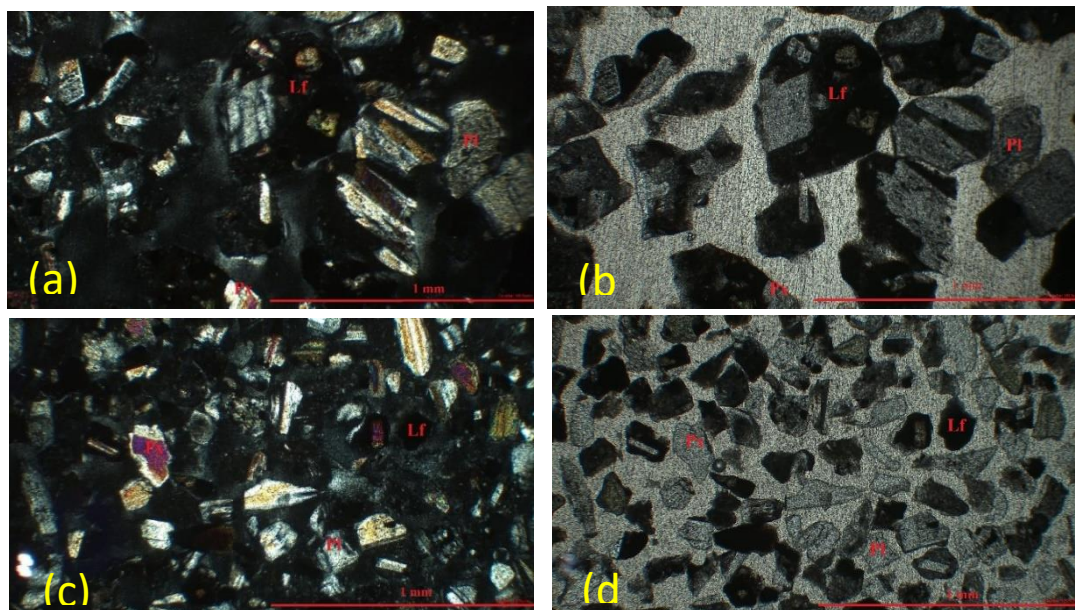
Tabel 1 Perbedaan abu vulkanik 11 Mei dan 1 Juni 2018 secara mineralogi

platykurtic pada hasil erupsi 11 Mei 2018, sementara hasil produk erupsi 1 Juni 2018 memiliki *skewness* yang *very fine-skewed* dan kurtosis yang *mesokurtic* (Tabel 2).

Hasil analisis petrografi menunjukkan hasil erupsi 11 Mei 2018 tersusun atas mineral plagioklas (Andesin-Labradorit) (45%), litik (40%), dan piroksen (15%). Sementara itu, hasil erupsi 1 Juni 2018

hasil erupsi 1 Juni 2018 (Gambar 4).

Hasil analisis *SEM-Morphology* menunjukkan bahwa morfologi butir produk erupsi 11 Mei 2018 tersusun atas kristal segar dan kristal teralterasi. Alterasi dibuktikan dengan kehadiran titik-titik terang pada foto yang diinterpretasikan sebagai mineral oksida pada permukaan butir. Hasil erupsi 1 Juni 2018 tersusun atas



Gambar 3 Kenampakan petrografis material erupsi Merapi 11 Mei 2018 pada pengamatan XPL (a) dan PPL (b), material erupsi Merapi 1 Juni 2018 pada pengamatan XPL (c) dan PPL (d)

kristal segar, kristal teralterasi, dan skoria yang dicirikan dengan permukaan berlubang-lubang (Gambar 5).

3.2. Karakteristik Geokimia

Berdasarkan analisis XRF pada dua sampel abu produk 11 Mei 2018 dan tiga sampel produk 1 Juni 2018, serta data XRF sekunder Aji dkk. (2018), maka didapatkan nilai konsentrasi unsur utama (Tabel 3). Komposisi berat SiO_2 pada produk 11 Mei 2018 lebih rendah dibandingkan dengan produk 1 Juni 2018 (Gambar 6). Berdasarkan Diagram Harker, produk *event* 11 Mei-1 Juni 2018 menunjukkan kecenderungan penurunan Na_2O dan K_2O . Hal ini mengindikasikan bahwa pembentukan albit dan K-feldspar sangat rendah. Hal tersebut sesuai dengan hasil pengamatan petrografi yang tidak menunjukkan kedua mineral tersebut.

MgO , CaO , TiO_2 , dan Fe_2O_3 menunjukkan pola yang positif. Menurut Winter (2014), membentuk olivin atau piroksen, namun mineral olivin tidak ditemukan dalam sampel. CaO dapat bergabung membentuk Ca-plagioklas atau klinopiroksen. TiO_2 dapat ditemukan dalam mineral ilmenit, alanit atau titanit, namun dikarenakan produk erupsi berupa abu sehingga kemungkinan ketiga mineral tersebut ditemukan sangat minim. MnO dan Al_2O_3 tidak menunjukkan korelasi sistematis dengan konsentrasi SiO_2 (Gambar 7).

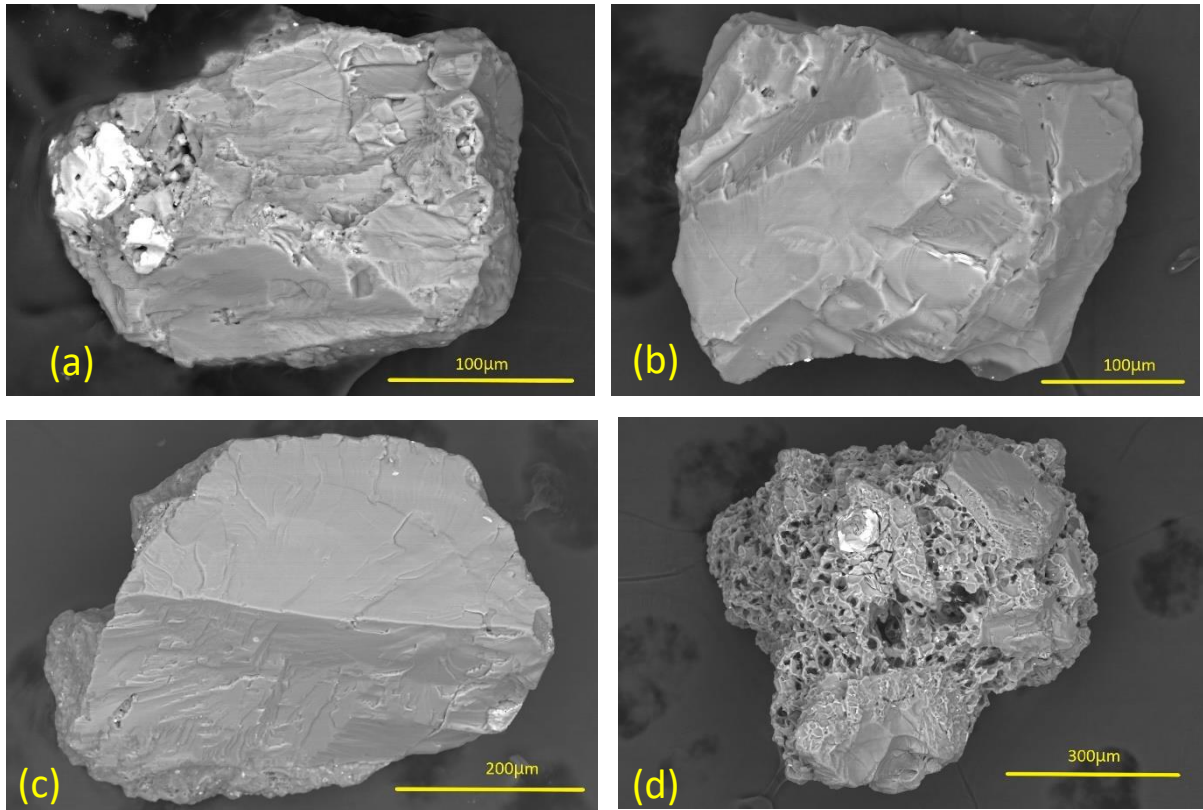
Tabel 2 Data *mean*, sortasi, *skewness* dan kurtosis erupsi 11 Mei yang diwakili oleh STA 1 dan STA 9, serta erupsi 1 Juni yang diwakili oleh STA 6 dan STA 10

STA 1 (1-1)				
<i>mesh</i>	<i>phi</i>	<i>fraction weight</i>	<i>frequency</i>	<i>cumulative frequency</i>
80	1.75-2.5	19,51	83,163	83,163
100	2.5-2.75	3,75	15,985	99,147
140	2.75-3.25	0,17	0,725	99,872
200	3.25-3.75	0,02	0,085	99,957
>200	>3.75	0,01	0,043	100
Total		23,46	100	-
mean				1,033
sortasi				0,447 (<i>well sorted</i>)
<i>skewness</i>				0,067 (<i>near symmetrical</i>)
kurtosis				0,911 (<i>mesokurtic</i>)

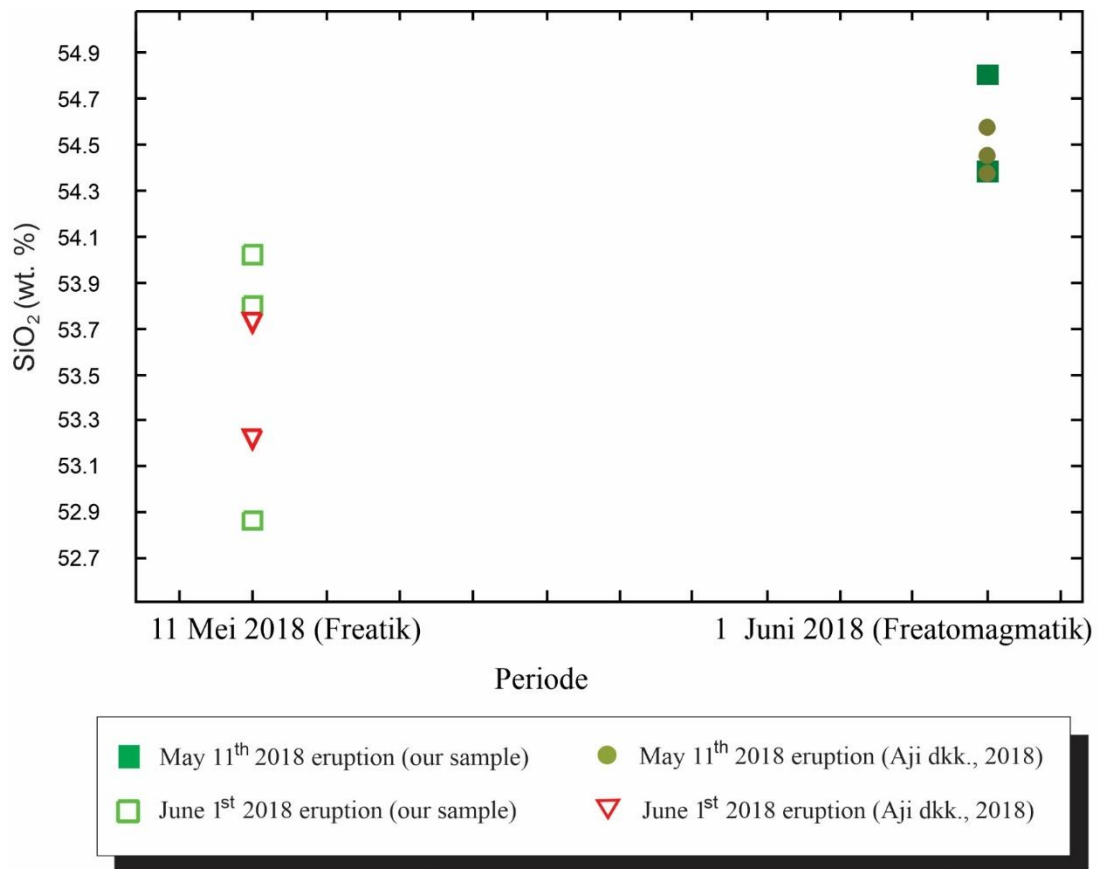
STA 9 (1-9)				
<i>mesh</i>	<i>phi</i>	<i>fraction weight</i>	<i>frequency</i>	<i>cumulative frequency</i>
35	0-1	23,09	84,239	84,239
50	1-1.75	3,17	11,565	95,804
80	1.75-2.5	0,59	2,152	97,957
100	2.5-2.75	0,31	1,131	99,0879
140	2.75-3.25	0,25	0,912	100
200	3.25-3.75	0	0	100
>200	>3.75	0	0	100
Total		27,41	100	-
mean				2,367
sortasi				2,092 (<i>very poorly sorted</i>)
<i>skewness</i>				-1,046 (<i>very coarse skewed</i>)
kurtosis				0,729 (<i>platykurtic</i>)

STA 6 (3-6)				
<i>mesh</i>	<i>phi</i>	<i>fraction weight</i>	<i>frequency</i>	<i>cumulative frequency</i>
50	1-1.75	12,22	47,903	47,903
80	1.75-2.5	10,98	43,042	90,945
100	2.5-2.75	1,37	5,37	96,315
140	2.75-3.25	0,49	1,92	98,236
200	3.25-3.75	0,25	0,98	99,216
>200	>3.75	0,2	0,784	100
Total		25,51	100	-
mean				1,817
sortasi				0,552 (<i>moderately well-sorted</i>)
<i>skewness</i>				0,365 (<i>very fine-skewed</i>)

STA 10 (3-10)				
<i>mesh</i>	<i>phi</i>	<i>fraction weight</i>	<i>frequency</i>	<i>cummulative frequency</i>
50	1-1.75	12,2	46,423	46,423
80	1.75-2.5	10,85	41,286	87,709
100	2.5-2.75	1,21	4,6043	92,314
140	2.75-3.25	1,2	4,566	96,879
200	3.25-3.75	0,37	1,408	98,288
>200	>3.75	0,45	1,712	100
Total		26,28	100	-
mean				1,733
sortasi				0,591 (<i>moderately well-sorted</i>)
<i>skewness</i>				0,514 (<i>very fine-skewed</i>)
kurtosis				0,964 (<i>mesokurtic</i>)



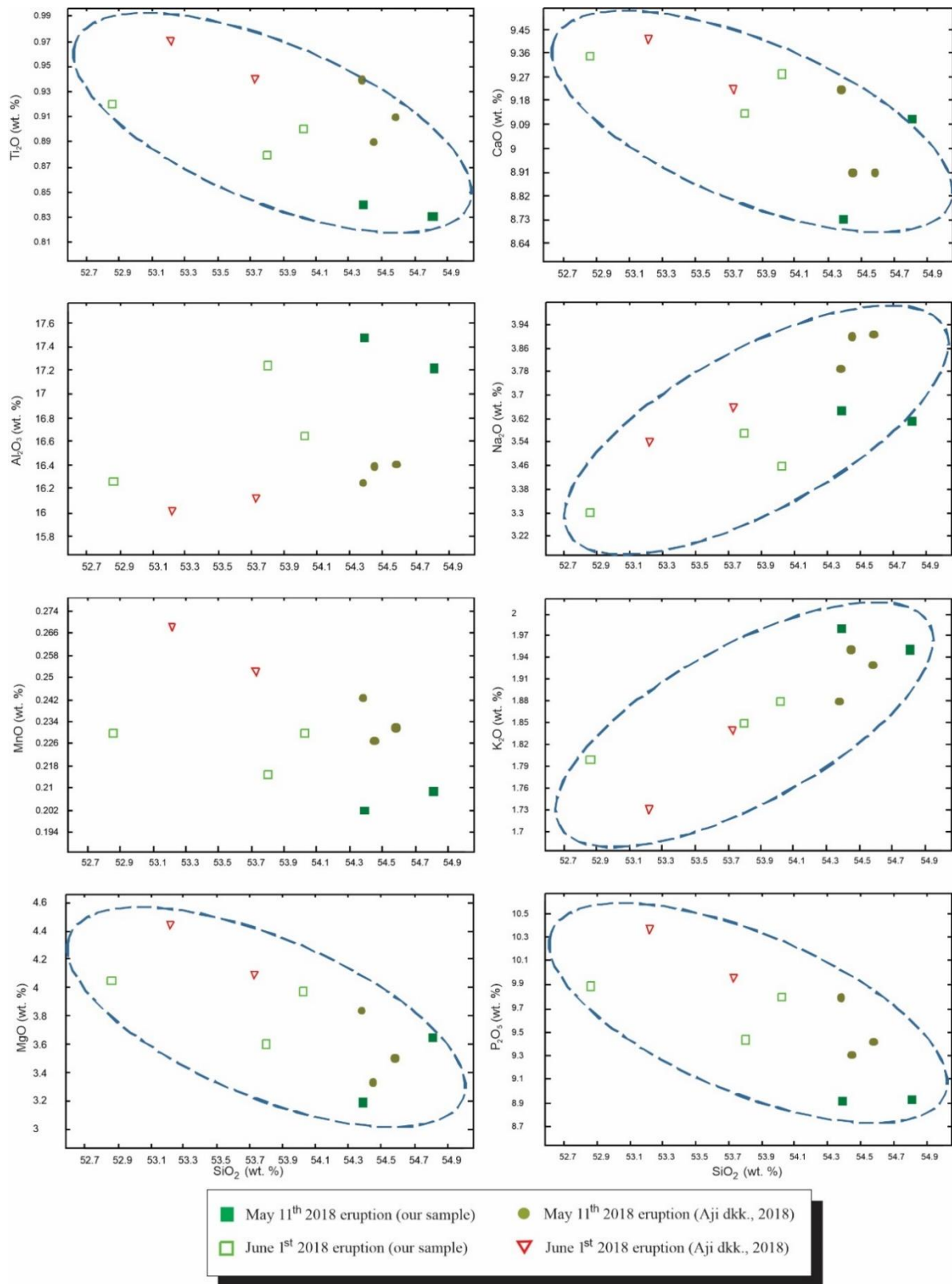
Gambar 5 Kenampakan SEM-Morphology material erupsi Merapi 11 Mei 2018 berupa kristal terterasi (a) dan kristal bebas (b), serta material erupsi Merapi 1 Juni 2018 berupa kristal bebas (c) dan skoria (d)



Gambar 6 Komposisi berat SiO₂ pada produk 11 Mei 2018 terhadap produk 1 Juni 2018

Tabel 3 Hasil analisis XRF sampel 11 Mei 2018 (warna hijau) dan 1 Juni 2018 (warna biru)

Sampel	20180513-06	20180513-09	20180602-04	20180602-06	20180602-10	20180511-65	20180511-66	20180511-67	20180601-90	20180601-91
Sumber data	primer	primer	primer	primer	primer	Sekunder (Aji, et al., 2018)	Sekunder (Aji, et al., 2018)	Sekunder (Aji, et al., 2018)	Sekunder (Aji, et al., 2018)	Sekunder (Aji, et al., 2018)
SiO₂	54.39	54.81	53.8	52.86	54.02	54.58	54.45	54.38	53.22	53.73
TiO₂	0.84	0.83	0.88	0.92	0.9	0.91	0.89	0.94	0.97	0.94
Al₂O₃	17.47	17.22	17.24	16.26	16.65	16.41	16.39	16.25	16.01	16.12
MnO	0.202	0.209	0.215	0.23	0.23	0.232	0.227	0.243	0.268	0.252
MgO	3.19	3.65	3.6	4.05	3.97	3.50	3.33	3.84	4.44	4.09
CaO	8.73	9.11	9.13	9.35	9.28	8.91	8.91	9.22	9.41	9.22
Na₂O	3.65	3.61	3.57	3.3	3.46	3.91	3.90	3.79	3.54	3.66
K₂O	1.98	1.95	1.85	1.8	1.88	1.93	1.95	1.88	1.73	1.84
P₂O₅	0.341	0.357	0.332	0.342	0.371	0.343	0.354	0.370	0.357	0.366
Fe₂O₃	8.91	8.93	9.44	9.89	9.79	9.42	9.31	9.79	10.36	9.95
HD	0.23	0.05	0.05	0.23	0.07	0.28	0.13	0.11	0.00	0.00
H₂O	0.11	0.14	0.14	0.13	0.15	0.05	0.1	0.17	0.13	0.17
Total	100.04	100.87	100.25	99.36	100.77	100.48	99.94	100.98	100.44	100.34



Gambar 7 Hasil analisis geokimia dalam Diagram Harker, sumbu x menunjukkan konsentrasi SiO₂ dalam persen berat, sumbu y menunjukkan konsentrasi oksida mayor dalam persen berat. Garis putus-putus menunjukkan kenampakan *trend*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data mineralogi, produk abu vulkanik 11 Mei dan 1 Juni 2018 memiliki persentase plagioklas dan piroksen yang semakin meningkat sedangkan persentase litik yang semakin menurun. Perbedaan lainnya adalah ditemukan skoria pada produk abu vulkanik 1 Juni 2018 dari hasil analisis *SEM-Morphology*. Berdasarkan data geokimia, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan antara produk abu vulkanik 11 Mei dengan 1 Juni 2018. Hal ini dikarenakan waktu erupsi kedua *event* tersebut tidak jauh berbeda.

Selain metode geofisika, pengamatan dengan metode mineralogi juga dapat digunakan sebagai metode tambahan dalam menentukan tipe erupsi freatik atau freatomagmatik. Selain itu, data mineralogi dan geokimia yang telah dilakukan dapat memperkaya informasi pada Peta Bencana Gunung Merapi. Data tersebut juga dapat memperluas wawasan masyarakat mengenai erupsi freatik dan atau freatomagmatik untuk mitigasi bencana.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kami ucapkan kepada Bapak Dr. Lucas Donny Setijadji, S.T., M.Sc. yang sudah membimbing kami dalam penelitian ini. Kami juga berterima kasih kepada staf dan laboran Laboratorium Geologi Optik dan Laboratorium Sedimentologi, Teknik Geologi UGM, serta Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) yang sudah membantu dalam preparasi sampel dan analisis pada penelitian ini. Tidak luput juga kami ucapkan terima kasih kepada Adrian Nugraha Utama yang sudah membantu

dalam penyusunan paper ini. Tidak terkecuali juga kami ucapkan terima kasih kepada panitia *Geoscience Gigantic Competition 2020* yang telah mengizinkan peneliti untuk melakukan presentasi hasil penelitian ini di *Paper Competition 2020*.

Daftar Pustaka

Cronin, Lube, G., Dayudi, D.S., Sumarti, S., Subrandiyo, S., dan Surono, 2013. Insights into the October-November 2010 Gunung Merapi Eruption (Central Java, Indonesia) from Stratigraphy, Volume and Characteristic of its Pyroclastic Deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 261, pp. 244-259.

Letusan Freatik 2018 Indikasi Episode Baru Aktivitas Magmatis G.Merapi. *Buletin Berkala Merapi Vol 22/02/Edisi Agustus 2018*, Agustus, pp. 12-38.

Pallister, J.S., Schneider, D.J., Griswold, J.P., Keeler, R.H., Burton, W.C., Noyles, C., Newhall, C.G., dan Ratdompurbo, A., 2013. Merapi 2010 eruption—Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 261, pp. 144-152.

Preece, K.J., 2014, *Transitions between effusive and explosive activity at Merapi volcano, Indonesia: a volcanological and petrological study of the 2006 and 2010 eruptions* [Ph.D. Disertasi]: United Kingdom, University of East Anglia, 444p.

Winter, J. D., 2014. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology, 2nd edition*. England: Pearson Education Ltd.

Santoso, A. B., Humaida, H., Sulistiyani, Aisyah, N., Putra, R., Laksono, W. R., Sayudi, D. S., Subandriyo, Nurmanaji, A., Indra, R., Sunarta, Suparwoko, H., Triyono, Sopari, A., Yulianto, Trimujianto, Lesage, P., Widiwijayanti, S., Bauducel, F., dan Iguchi, M., 2018.

Sayudi, D., Santoso, A., Putra, R., dan Sulistyaningsih, 2018. Skenario Erupsi G.Merapi 2018. *Buletin Berkala Merapi Vol 22/02/Edisi Agustus 2018*, Agustus, pp. 81-104.

Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M.F., Budisantoso, A., Costa, F., Andreastuti, S., Prata, F., Schneider, D., Clarisse, L., Humaida, H., Sumarti, S., Bignami, C., Griswold, J., Carn, S., Oppenheimer, C., dan Lavigne, F., 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano – A '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 241-242, pp. 121-135.

Analisis Zona Bahaya Likuifaksi Menggunakan Metode Perhitungan *Liquefaction Severity Indeks* (LSI) dan Data Geologi Dalam Upaya Peningkatan Mitigasi Di Wilayah Lombok, Nusa Tenggara Barat

Rijalul Halimi Harishun¹⁾, Deneva Widyaningtyas¹⁾ dan Ramadhani Nurul Fazri¹⁾

¹⁾Fakultas Teknologi Eksplorasi dan Produksi, Program Studi Teknik Geologi Universitas Pertamina, Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug, Jakarta Selatan 12220

*rijalulhalimi9g27@gmail.com

ABSTRAK

Peristiwa gempabumi yang terjadi di Lombok, 5 Agustus 2018 merupakan salah satu kejadian gempabumi besar dengan kekuatan 7,0 SR. Selain jatuhnya 468 korban jiwa dan banyaknya kerusakan infrastruktur pada beberapa wilayah, bencana alam ini juga mengakibatkan timbulnya kerusakan geologi berupa hilangnya kekuatan tanah atau likuifaksi. Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas mengenai ancaman likuifaksi wilayah Lombok, namun sampai saat ini belum ada gagasan untuk melakukan pemetaan zona bahaya di wilayah tersebut. Penelitian ini akan membahas tentang kejadian likuifaksi dari sudut pandang geologi, dan menganalisis zona bahaya likuifaksi di pulau Lombok. Metode yang digunakan adalah metode deskriptif dengan pendekatan keruangan melalui data sekunder. Penelitian ini memanfaatkan nilai perhitungan *Liquefaction Severity Indeks* (LSI), persebaran kejadian likuifaksi permukaan dan data-data geologi. Hasil penelitian menunjukkan daerah terjadinya likuifaksi tersebut cenderung berada di bagian utara wilayah penelitian, yaitu di Kecamatan Kayangan, Gangga, dan Bayan, dengan litologi yang di dominasi oleh endapan gunung berapi berumur Pleistosen. Zona bahaya likuifaksi terbagi menjadi wilayah bahaya sangat tidak aman, tidak aman, dan aman. Hal ini diharapkan menjadi suatu langkah awal dalam siklus manajemen bencana untuk mengedukasi masyarakat setempat mengenai bahaya likuifaksi, dan sarana pemerintah untuk melakukan perbaikan tata ruang maupun menghitung tingkat kerugian.

Kata Kunci: *Gempabumi, Likuifaksi, Liquefaction Severity Indeks (LSI), Mitigasi*

PENDAHULUAN

Peristiwa gempabumi yang terjadi di pulau Lombok pada tanggal 5 Agustus 2019 dengan kekuatan 7,0 SR yang merupakan fase *mainshock* pertama dari serangkaian kejadian, menjadi salah satu peristiwa gempabumi besar yang menyebabkan jatuhnya 468 korban jiwa dan banyaknya kerusakan infrastruktur pada beberapa wilayah. Peristiwa alam ini juga mengakibatkan timbulnya kerusakan geologi berupa hilangnya kekuatan tanah atau likuifaksi. Likuifaksi dipengaruhi oleh kondisi lingkungan geologi, sifat keteknikan tanah, serta karakteristik gempabumi yang terjadi. Peristiwa likuifaksi akibat

gempabumi di Lombok ini tersebar pada kecamatan Kayangan, kecamatan Gangga, serta kecamatan Bayan. Berdasarkan referensi dari data lapangan, likuifaksi ini menyebabkan munculnya beberapa fenomena, seperti *lateral spreads*, serta *sand boiling* dari retakan tanah dan sumur penduduk. Adapun kondisi geologi pada daerah ini berupa endapan alluvial dengan ukuran butir halus, jenuh air, dan memiliki jarak muka air tanah yang dangkal.

Banyak penelitian telah membahas tentang ancaman likuifaksi di wilayah Lombok, namun sampai saat ini belum ada gagasan untuk melakukan pemetaan zona bahaya di wilayah tersebut. Penelitian pada

paper ini memanfaatkan nilai perhitungan *Liquefaction Severity Indeks* (LSI), data persebaran kejadian likuifaksi permukaan dan data-data geologi lainnya yang mendukung. Nilai LSI yang ditemukan pada akhirnya akan digunakan untuk mengetahui seberapa besar jarak antara episenter gempa dengan lokasi kejadian likuifaksi. Pembuatan peta zona bahaya ditentukan dari overlay peta persebaran nilai LSI dan peta kondisi geologi daerah. Hasil akhir dari penelitian ini diharapkan akan menjadi suatu langkah awal dalam siklus manajemen bencana yang berguna untuk mengedukasi masyarakat setempat mengenai bahaya likuifaksi, dan sarana bagi pemerintah untuk melakukan perbaikan pada penyusunan tata ruang maupun menghitung tingkat kerugian yang telah terjadi akibat bencana ini.

Tujuan Penelitian

1. Mengetahui persebaran daerah di pulau Lombok yang terkena bencana likuifaksi
2. Membuat peta zona bahaya likuifaksi di pulau Lombok sebagai langkah awal dalam siklus manajemen bencana untuk mengedukasi masyarakat setempat mengenai bahaya likuifaksi

LOKASI PENELITIAN DAN GEOLOGI REGIONAL

Letak Geografis dan Administrasi

Daerah penelitian adalah Kabupaten Lombok Utara, Pulau Lombok, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Adapun batas wilayah pada bagian utara berupa Laut Jawa; pada bagian barat berupa Selat Lombok dan Kabupaten Lombok Barat; pada bagian

selatan berbatasan dengan Kabupaten Lombok Barat dan Kabupaten Lombok Tengah; sedangkan pada bagian timur berbatasan dengan Kabupaten Lombok Timur.

Kabupaten Lombok Utara mempunyai luas wilayah daratan 809.53 km² yang terdiri dari wilayah khusus seluas 361.86 km² (44,30%) dan sisanya daratan rata untuk lahan pertanian, dan lain lain seluas 447.67 km² (55,30%). Luas wilayah perairan Lombok Utara adalah 594.71 km² dengan panjang pantai 127 km.

Secara administrative, Kabupaten Lombok Utara terbagi dalam 5 kecamatan, 33 desa dan 371 dusun, yang mana Kecamatan Bayan memiliki luas wilayah terbesar dengan luas wilayah daratan 329.10 km² (40,66%) dan terkecil adalah Kecamatan Pemenang dengan luas wilayah daratan 81.09 km² (10,01 %).

Geologi

Daerah penelitian berada di Pulau Lombok yang merupakan bagian dari Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB). Pulau Lombok merupakan pulau yang terbentuk akibat adanya gunungapi hasil subduksi lempeng samudra Australia yang bergerak ke utara dengan kecepatan sekitar 7 cm/tahun yang menunjam di bawah lempeng benua Eurasia yang bergerak kearah tenggara dengan kecepatan sekitar 0.4 cm/tahun. (Minster dan Jordan, 1978 dalam Yeats, 1997 dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)

Zona subduksi ini sudah berlangsung sejak Zaman Kapur Akhir dan masih berlangsung hingga kini yang mengakibatkan terbentuknya zona subduksi di bagian selatan Nusa Tenggara dan kompresi belakang busur pada bagian utara yang mengakibatkan orogenesis Sunda mulai dari Jawa hingga

Nusa Tenggara. (Simandjuntak, 2004 dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)

Struktur geologi diindikasikan oleh kelurusan morfologi berdasarkan citra landsat, pada peta topografi baik kelurusan sungai, punggung dan juga berdasarkan kepada pengamatan langsung di lapangan dengan ditemukannya indikasi cermin sesar, gores-garis, kekar, *off-set* litologi, gawir sesar (*scarp*) dan *triangular facet*. Berdasarkan peta geologi Lombok (Mangga dkk., 1994 dalam Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018)

Secara fisiografi, kepulauan Nusa Tenggara Barat merupakan bagian tengah dari Busur Banda yang tersusun oleh gunungapi muda pada zaman Tersier Atas. Pulau Lombok didominasi oleh batuan produk gunungapi, dengan batuan penyusun berupa breksi yang merupakan batuan dengan tekstur kasar berupa fragmen-fragmen lebih dari 2 mm dan menyudut; tuff yang merupakan batuan hasil jatuhan atau aliran piroklastik dengan butir fragmen kurang dari 2 mm; dan lava yang berupa batuan hasil dari pembekuan aliran magma yang telah keluar ke permukaan bumi.

Daerah penelitian pada bagian selatan tersusun oleh batuan breksi vulkanik dan lava dengan umur batuan Miosen Awal hingga Pliosen-Plistosen, sedangkan pada bagian utara umumnya tersusun atas batuan vulkanik yang berumur Kuarter.

Pulau Lombok dapat dibedakan menjadi tiga satuan morfologi, yaitu dataran, gunungapi, dan perbukitan bergelombang sedang hingga terjal. Morfologi dataran terdapat pada pantai yang landai yang berada disekitar Kota Mataram dengan batuan penyusun endapan Kuarter berupa endapan alluvial pantai, alluvial sungai, dan batuan gunungapi muda.

Satuan morfologi gunungapi terdiri dari bagian puncak, tubuh gunungapi, kaki gunungapi, dan terdapat di sekitar gunungapi Rinjani maupun gunungapi lainnya, dengan litologi penyusun berupa batuan rombakan gunungapi dan sebagiannya telah mengalami pelapukan. Sedangkan, morfologi perbukitan bergelombang sedang hingga terjal tersebar di bagian barat, barat daya, dan sebagiannya di selatan Pulau Lombok.

Berdasarkan Astawa, I N., dkk. (2005) menjelaskan stratigrafi yang ada pada Peta Geologi Lembar Lombok (Andi Mangga, S., drr., 1994), adapun jika stratigrafi pada peta tersebut diurutkan dari muda ke tua, berupa Aluvium tersusun oleh kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut dan pecahan koral; Batuan Gunungapi Tak Teruraikan tersusun oleh lava, breksi dan tuf Gunung Pusuk, Nangi dan Rinjani; Formasi Lekopiko tersusun oleh tuff berbatuapung, breksi lahar dan lava; Formasi Kalibabak tersusun oleh Breksi dan lava; dan Formasi Kalipalung tersusun oleh perselingan breksi gampingan dan lava.

Sejarah Kegempaan di Pulau Lombok

Menurut Wirayudha, Randy (2018) sejarah menunjukkan bahwa wilayah Lombok pernah menalami gempa kuat. Menurutnya saptapetaka atau tujuh gempa Lombok yang pernah terjadi dengan kekuatan di atas 6.0 SR, yaitu pertama, Gempa Lombok, 25 Juli 1856, gempa besar ini terjadi di Lombok tepatnya di Labuan Tereng, pada 25 Juli 1856, gempa ini memicu terjadinya gelombang tsunami yang menghantam pesisir Ampenan di Mataram. Akan tetapi tidak ada catatan yang menyebutkan kekuatan gempa yang terjadi dan ketinggian gelombang tsunami.

Kedua, Gempa Lombok, 21-24 Desember 1970, pada 21 Desember gempa berkekuatan 6.0 SR dengan pusat kedalaman berada pada 75 km yang mengakibatkan adanya guncangan pada perairan di selatan Lombok. Sedangkan, pada 24 Desember letak pusat gempa berada pada kedalaman 70 km dengan kekuatan gempa sebesar 5.6 SR.

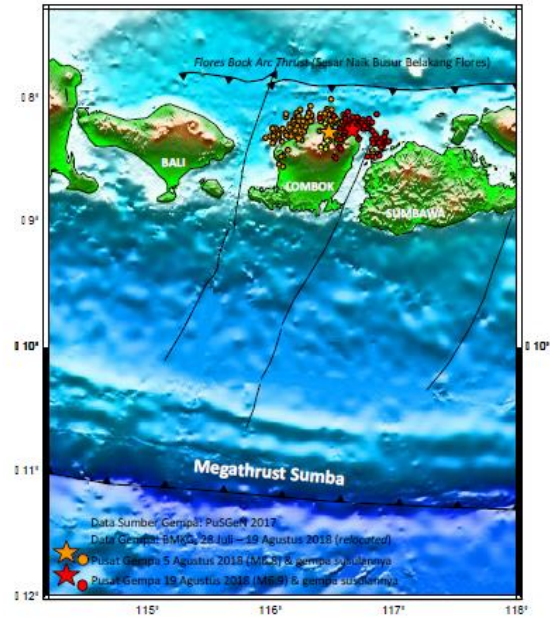
Ketiga, Gempa Lombok, 28 Mei 1972, kekuatan gempa sebesar 6.3 SR dengan kedalaman 15 km. Keempat, Gempa Lombok, 10 April 1978, gempa yang terjadi pada tanggal 10 April 1978 berpusat di 297 km selatan Praya dengan kekuatan 6.7 SR dengan kedalaman berada pada 19 km. Kelima, Gempa Lombok, 30 Mei 1979, gempa dengan kekuatan sebesar 6.1 SR.

Keenam, Gempa Lombok, 1 Januari 2000, merupakan gempa dengan kekuatan 6.1 SR. Ketujuh, Gempa Lombok, 9 Juni 2016, gempa terjadi di selatan pesisir Kute pada kedalaman 19 km dengan kekuatan gempa sebesar 6.2 SR.

Gambaran Umum Gempa bumi di Pulau Lombok Pada 5 Agustus 2018

Pulau Lombok mengalami rangkaian gempa bumi dimulai pada tanggal 29 Juli 2018 (M6.4) sebagai *foreshock*, 5 Agustus 2018 (M7.0) sebagai *mainshock* pertama, 9 Agustus 2018 (M6.2) sebagai *aftershock* signifikan, serta 19 Agustus 2018 yang didahului oleh *foreshock* M6.3 dan *mainshock* kedua M6.9 sepuluh jam setelahnya. (Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)

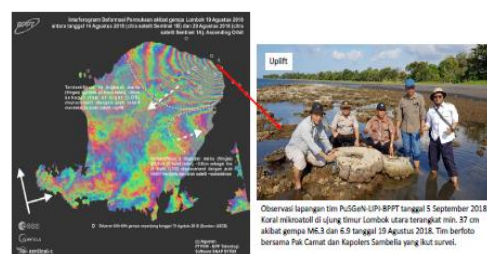
Gempa tanggal 5 Agustus 2018 (M7.0) yang terjadi sampai pukul 05.00 WIB tercatat terjadi gempa sebanyak 121 gempa susulan yang mengakibatkan *uplift* sekitar 20 cm di wilayah utara, dan *subsidence* atau penurunan di wilayah pesisir Pemenang.



Gambar 1 Tektonik Aktif di Wilayah Lombok Berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Nasional 2017, dan Lokaso Mainshock Pada Tanggal 5 Agustus 2018 (M7.0) dan 19 Agustus (M6.9). Sumber Data Epicenter: Hasil Relokasi BMKG Pada 29 Juli-19 Agustus 2018 (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah metode deskriptif dengan pendekatan keruangan melalui data sekunder. Penelitian ini memanfaatkan nilai perhitungan *Liquefaction Severity Indeks* (LSI), persebaran kejadian likuifaksi permukaan



Gambar 2 Kenaikan Daratan (*Uplift*) dan Penurunan (*Subsidence*) Akibat Gemp Tanggal 5 Agustus dan 19 Agustus 2018 yang Terobservasi Dari Data INSAR dan Observasi Lapangan (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)

dan data-data geologi daerah penelitian yang berada di Lombok, Provinsi Nusa Tenggara Barat dengan koordinat 8°10' - 9°5'LS dan 115°46' - 119°5'BT.

Tahap Penelitian

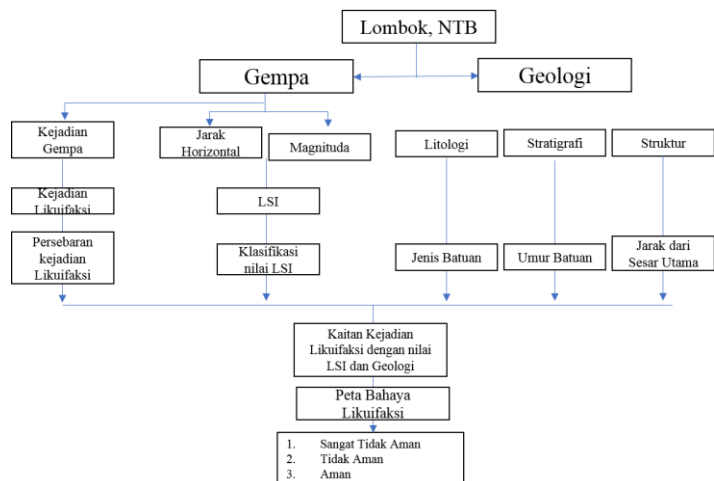


Diagram alir tahapan pengerjaan

Data penelitian

Secara umum variabel data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari informasi kejadian-kejadian likuifaksi permukaan daerah penelitian seperti retakan pada tanah/jalan, penurunan tanah/amblesan dan munculnya lumpur pasir atau *sand boil*. *Liquefaction Severity Indeks (LSI)* didapatkan dari nilai kekuatan gempa atau *magnitude* jarak horizontal episenter gempa ke lokasi kerusakan. Informasi geologi berupa jenis litologi, umur batuan dan jarak dari sesar utama atau minor juga digunakan sebagai validasi keterkaitan dengan aspek geologi.

Pengumpulan data dilakukan berdasarkan data sekunder yang didapatkan

dari studi literatur yang ada. Studi literatur tersebut diperoleh baik dari buku referensi, jurnal, prosiding, skripsi maupun media internet terpercaya. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Gempa (PVMBG) menjadi referensi utama sebagai pengumpulan data jenis dan lokasi absolut kejadian likuifaksi di daerah penelitian.

Seluruh data berbasis spasial dimasukkan dalam sistem database dan disusun melalui sistem perangkat lunak Arc Gis (Arc Map) 10.5. Peta administrasi berasal dari peta rupa bumi dengan skala 1:25000 dan titik episentrum gempa Lombok pada tahun 2018 dengan *plotting* lokasi berdasarkan koordinat *decimal degree (DD)*. Peta geologi yang digunakan merupakan peta geologi daerah penelitian yaitu wilayah Lombok yang berisi jenis litologi, stratigrafi dan struktur geologi. Peta persebaran lokasi likuifaksi yang berasal dari literatur dilakukan *plotting* berdasarkan koordinat *decimal degree (DD)*. Peta persebaran nilai LSI yang telah dilakukan perhitungan logaritma sebelumnya, di bagi menjadi enam kelas dari mulai 0-5, 5-10, 11-30, 31-50, 51-70, >70 berdasarkan tingkat bahaya likuifaksi. Peta umur batuan yang diinterpretasi dari peta geologi dibagi menjadi kelompok batuan Kuartar dan Tersier. Peta jarak sesar terhadap lokasi likuifaksi dilakukan proses *buffer* (daerah penyangga) dalam tiga kelompok yaitu: 0-3 km, 3-6 km, dan >6km. Peta bahaya likuifaksi dihasilkan dari overlay empat peta yaitu: peta persebaran nilai LSI, peta jenis batuan, peta umur batuan, dan peta jarak sesar. Hasil overlay tersebut menghasilkan peta yang dibagi menjadi tiga kelompok yaitu: daerah aman, daerah tidak aman dan daerah sangat tidak aman.

Metode Perhitungan nilai *Liquefaction Severity Indeks* (LSI)

Data tersebut diperoleh dengan melakukan perhitungan nilai LSI dari persamaan logaritma LSI. Nilai tersebut berkaitan dengan parameter kegempaan yaitu jarak horizontal dari pusat gempa ke titik lokasi kejadian likuifaksi (R) dan besar kekuatan gempa (Mw)

Untuk mendapatkan nilai LSI tersebut, dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut:

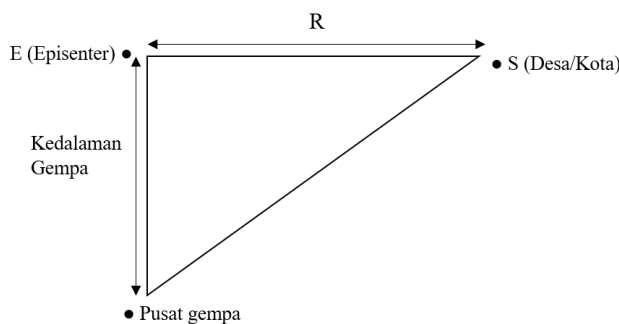
$$\text{Log (LSI)} = -2,94 - 1,3 \text{ Log R} + 1,02 \text{ Mw} \dots \dots \dots (1)$$

Sumber: Kertapati (1998) dimodifikasi dari Youd dan Perkins (1987)

Dengan:

R = Jarak horizontal dari sumber energi gempa (km)

Mw = Besar kekuatan gempabumi



Ilustrasi Jarak Horizontal dari Pusat Gempa

Nilai (R) diperoleh dengan memasukkan koordinat dari episenter dan

koordinat desa atau kota lokasi terjadinya likuifaksi. Dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$\text{Cos ES (R)} = \sin \phi \text{ E} \cdot \sin \phi \text{ S} + \cos \phi \text{ E} \cdot \cos \phi \text{ S} \cdot \cos [\text{LE} - \text{LS}] \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

E = koordinat bujur episenter

S = koordinat bujur lokasi kota/desa

LE = koordinat lintang episenter

LS = koordinat lintang lokasi kota/desa

Nilai R dalam satuan derajat cosinus kemudian di konversi ke satuan kilometer dengan mengalikan 111,413 km per 1°. Koordinat pusat gempa Lombok pada tanggal 5 Agustus 2018 yaitu 116°48’BT dan 8°37’LS pada kedalaman 15 km diperoleh dari data Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data yang telah diperoleh sebelumnya kemudian diolah menggunakan perhitungan logaritma LSI. Tabel hasil perhitungan dapat dilihat pada bagian lampiran. Setelah nilai LSI didapatkan kemudian dilakukan pembahasan keterkaitan dengan aspek-aspek geologi yang ada.

Kaitan Nilai LSI dengan Sebaran Kejadian Likuifaksi

Nilai *Liquefaction Severity Indeks* (LSI) merupakan nilai tingkat bahaya likuifaksi pada suatu daerah. Nilai ini dipengaruhi oleh kekuatan gempa dan jarak

horizontal terjadinya likuifaksi dengan pusat gempa. Semakin dekat jarak horizontal dari pusat gempa, maka nilai LSI akan semakin tinggi. Nilai LSI terbagi menjadi enam kelas, yaitu kelas dengan nilai 0-5, 5-10, 11-30, 31-50, 51-70 dan kelas dengan nilai lebih dari 70.

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh beberapa nilai LSI dari 15 titik kejadian likuifaksi. Kejadian paling banyak yaitu 9 titik berada pada rentang nilai LSI 11-30, 4 titik berada pada rentang nilai LSI 31-50, dan 1 titik kejadian berada pada rentang nilai lebih dari 70.

Tabel 1 Nilai LSI dengan banyak kejadian

Nilai LSI	Jumlah Kejadian	Kelas Bahaya Likuifaksi
0-5	Tidak ada kejadian	Aman
6-10	Tidak ada kejadian	Aman
11-30	9 kejadian	Sangat Tidak Aman
31-50	4 kejadian	Sangat Tidak Aman
51-70	Tidak ada kejadian	Aman
>70	1 kejadian	Tidak Aman

Berdasarkan peta, nilai LSI >70 merupakan nilai LSI tertinggi yang berada dekat dengan pusat gempa yang terjadi di bagian utara pulau Lombok. Nilai LSI dengan rentang nilai 31-50 berada pada

bagian utara dan sebagian timur dari pulau Lombok, dan nilai LSI dengan rentang nilai 11-30 berada pada bagian barat dari pulau Lombok. Sedangkan tidak ada kejadian likuifaksi dengan nilai LSI dengan rentang nilai 0-5, 5-10, dan 51-70.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa persebaran titik kejadian likuifaksi cenderung tidak mengikuti nilai likuifaksi yang semakin tinggi, melainkan kelas bahaya likuifaksi yang kemudian akan dibuat menjadi peta ini ditentukan berdasarkan banyaknya kejadian yang terjadi di daerah tersebut. Kelas yang dibagi adalah sebagai berikut:

1. Kelas bahaya likuifaksi aman, wilayah dengan rentang nilai 0-5, 6-10, dan 51-70.
2. Kelas bahaya likuifaksi tidak aman, wilayah dengan rentang nilai >70.
3. Kelas bahaya likuifaksi sangat tidak aman, wilayah dengan nilai 11-30 dan 31-50.

Kaitan Jenis Batuan dengan Sebaran Kejadian Likuifaksi

Kondisi geologi juga mempengaruhi kejadian likuifaksi. Likuifaksi di pulau Lombok ini paling banyak yaitu 9 kejadian terjadi di litologi tuf batuapung, breksi, dan lava pada formasi Lekopiko (Qv1). Batuan pada formasi ini merupakan batuan hasil endapan gunungapi. Struktur pada batuan vulkanik cenderung lemah dan mudah lepas. Kondisi batuan tersebut menyebabkan wilayah ini tergolong sangat tidak aman. Begitu pula yang terjadi pada 3 titik likuifaksi di endapan gunung api tak terpisahkan (Qhv) dengan litologi berupa lava, breksi dan tuf,

dan 1 kejadian pada formasi Kalibabak (TQb) yang juga memiliki litologi breksi dan lava. Hal tersebut menyebabkan wilayah ini tergolong tidak aman.

Tabel 2 Jenis Batuan dan banyak kejadian

Kejadian	Formasi	Litologi	Kelas bahaya Likuifaksi
2 Kejadian	Qa	Endapan Aluvium	Tidak Aman
3 Kejadian	Qhv	Lava, Breksi, Tuf	Tidak Aman
9 Kejadian	Qvl	Tuf batuapung, breksi, lava	Sangat Tidak Aman
1 Kejadian	TQb	Breksi dan Lava	Tidak Aman

Kaitan Umur Batuan Dengan Sebaran Kejadian Likuifaksi

Pada daerah penelitian dijumpai wilayah yang memiliki umur batuan Kuartar dan Tersier. Umur batuan pada suatu daerah dalam kondisi gempa bumi dan likuifaksi menggambarkan respon suatu daerah akan gelombang gempa bumi dan bahaya yang diakibatkan dari likuifaksi pada daerah tersebut.

Semakin tua umur batuan maka tingkat kepekaan batuan terhadap respon getaran gempa akan semakin tinggi, begitu pula tingkat bahaya likuifaksi daerah tersebut. Dapat disimpulkan bahwa batuan dengan umur kuartar akan lebih tidak aman dibandingkan batuan dengan umur tersier.

Kejadian likuifaksi banyak dijumpai pada batuan kuartar dengan banyak kejadian likuifaksi sebanyak empat belas titik kejadian dan pada wilayah dengan umur batuan tersier hanya di temukan satu titik kejadian.

Tabel 3 Umur batuan dan banyak kejadian

Kejadian	Umur Batuan	Kelas Bahaya Likuifaksi
14 Kejadian	Kuartar	Sangat Tidak Aman
1 Kejadian	Tersier	Tidak Aman

Kaitan Jarak Dari Sesar Utama Dengan Sebaran Kejadian Likuifaksi

Hubungan antara keberadaan zona sesar, analisis jumlah kejadian likuifaksi jika dikaitkan dengan jauh atau dekatnya jarak titik-titik kejadian likuifaksi dengan buffer patahan. Buffer merupakan zona atau area penyangga dengan jarak yang diinginkan, dalam penelitian ini di buat jarak terjauh dari garis patahan adalah lima puluh kilometer dengan jarak antar buffer yang di buat adalah sepuluh kilometer.

Jumlah kejadian likuifaksi bila dikaitkan dengan jarak dari zona sesar utama, maka akan didapatkan pada jarak sepuluh kilometer pertama dari sesar utama di temukan sebanyak tiga titik kejadian

likuifaksi; kemudian pada jarak sepuluh kilometer kedua didapati sejumlah lima titik kejadian likuifaksi; pada jarak sepuluh kilometer ketiga didapati sejumlah lima titik kejadian likuifaksi; pada jarak sepuluh kilometer keempat dan kelima didapati masing-masing satu titik kejadian likuifaksi; dan terakhir pada jarak lebih dari lima puluh kilometer tidak ditemukan kejadian likuifaksi.

Tabel 4 Jarak sesar utama dan banyak kejadian

Kejadian	Jarak dengan sesar utama	Kelas Bahaya Likuifaksi
3 Kejadian	0-10 Km	Tidak Aman
5 Kejadian	10-20 Km	Sangat Tidak Aman
5 Kejadian	20-30 Km	Sangat Tidak Aman
1 kejadian	30-40 Km	Tidak Aman
1 Kejadian	40-50Km	Tidak Aman
Tidak Ada Kejadian	>50 Km	Aman

Pola Wilayah Bahaya Likuifaksi Berdasarkan Sebaran Titik Kejadian Likuifaksi

Dalam proses pengolahan data menjadi wilayah-wilayah likuifaksi, data-data yang merupakan variabel pembentuk wilayah likuifaksi setelah diolah kemudian di-overlaykan. Hasil overlay akan membentuk masing masing kelas. Variabel

yang menentukan wilayah saling berkaitan satu dengan yang lain, bukan berdiri sendiri. Penilaian dilakukan secara kualitatif, bukan di bobotkan.

Wilayah Bahaya Likuifaksi Sangat Tidak Aman

Wilayah likuifaksi sangat tidak aman tersebar dibagian utara Pulau Lombok dan sebagian timur pulau Lombok dengan nilai LSI 11-30 hingga >70. Pada peta bahaya likuifaksi wilayah ini berwarna merah (peta pada lampiran). Wilayah ini meliputi Kecamatan Bayan, Kecamatan Kayangan, Kecamatan Sambelia, dan Kecamatan Pringgahaya. Pola pada wilayah kelas ini dikarenakan oleh sumbangan faktor kondisi geologi berupa batuan dengan umur kuartar (Qa, Qhv dan Qvl bagian utara) dengan litologi berupa endapan gunungapi muda tak terpisahkan, tuff, breksi dan endapan Alluvium. Litologi ini memiliki struktur remah, lepas-lepas dan ikatan antar partikel lemah sehingga mudah tergetarkan oleh guncangan gempa. Selain itu jarak dari sesar utama yaitu sesar naik Flores yang melintang dari Timur ke barat yang hanya berjarak kurang dari 10 km, hal ini diketahui bahwa lokasi yang dekat dengan zona sesar akan memiliki kekuatan yang lebih kuat terkena dampak guncangan dan lebih mudah jenuh terisi air ketika guncangan gempa muncul.

Wilayah Bahaya Likuifaksi Tidak Aman

Wilayah likuifaksi tidak aman tersebar di bagian barat Pulau Lombok dan sebagian kecil di wilayah Timur dengan nilai LSI 11-30. Pada peta bahaya likuifaksi wilayah ini berwarna kuning (lihat peta pada lampiran). Wilayah ini meliputi sebagian Kecamatan Kayangan dan Desa Pemenang berdasarkan kejadian likuifaksi yang pernah ada. Pola pada wilayah kelas ini dikarenakan

oleh sumbangan faktor kondisi geologi berupa batuan dengan umur kuartar Alluvium dan formasi TQb. Formasi TQb merupakan formasi batuan tersier namun umurnya pada masa transisi antara tersier ke kuartar, sehingga tergolong batuan muda dan memiliki potensi likuifaksi. Litologi berupa endapan gunungapi muda tak terpisahkan, tuff, breksi dan endapan Alluvium. Litologi ini memiliki struktur remah, lepas-lepas dan ikatan antar partikel lemah sehingga mudah tergetarkan oleh guncangan gempa. Selain itu jarak dari sesar utama yaitu sesar naik Flores yang melintang dari timur ke barat yang hanya berjarak kurang dari 10-30 km. Jarak ini lebih jauh dibanding dengan wilayah sangat tidak aman, namun potensi bahaya dari sisi batuan tetap berpotensi. Hal ini diketahui bahwa lokasi yang dekat dengan zona sesar akan memiliki kekuatan yang lebih kuat terkena dampak guncangan dan lebih mudah jenuh terisi air ketika guncangan gempa muncul.

Wilayah Bahaya Likuifaksi Aman

Wilayah likuifaksi aman tersebar dibagian selatan Pulau Lombok. Pada peta bahaya likuifaksi wilayah ini berwarna hijau (lihat peta pada lampiran). Pola pada wilayah kelas ini dikarenakan oleh sumbangan faktor kondisi geologi berupa batuan dengan umur Tersier, sehingga tergolong batuan tua, sehingga potensi likuifaksi lebih rendah litologi berupa batu lempung dan batu gampingan. Litologi ini memiliki struktur yang solid serta ikatan partikel yang relative kuat. Selain itu jarak dari sesar utama yaitu sesar naik Flores yang melintang dari timur ke barat yang hanya berjarak lebih jauh antara >30 km. Jarak ini adalah paling jauh dibandingkan dengan wilayah lainnya.

KESIMPULAN

1. Perhitungan nilai *Liquefaction Severity Indeks* (LSI) yang dikaitkan dengan aspek-aspek geologi berupa jenis batuan, umur batuan dan jarak sesar utama dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan wilayah bahaya likuifaksi.
2. Kejadian likuifaksi tidak hanya terjadi pada nilai yang besar, banyaknya kejadian akibat faktor geologilah yang banyak mempengaruhi kejadian likuifaksi.
3. Kejadian likuifaksi secara umum berada pada batuan umur kuartar dengan litologi batuan gunung api muda yang memiliki ikatan partikel lemah. Jarak dengan sesar utama juga mempengaruhi kejadian likuifaksi.
4. Wilayah Bahaya Likuifaksi di Pulau Lombok terbagi menjadi tiga wilayah dimana wilayah sangat tidak aman meliputi wilayah utara dan sebagian timur Pulau Lombok, wilayah tidak aman meliputi wilayah barat dan sebagian timur pulau Lombok dan wilayah aman meliputi bagian selatan pulau Lombok.
5. Peta bahaya likuifaksi ini dapat digunakan sebagai media peningkatan pendidikan mitigasi bagi masyarakat dan acuan pemerintah dalam menata ruang wilayah yang lebih tangguh dalam menghadapi ancaman bahaya likuifaksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu kelancaran pembuatan paper ini. Dari mulai dosen, orang tua hingga kawan-kawan seperjuangan. Semoga paper ini bisa

memberikan manfaat bagi para pembaca. Dan kami tim penulis sangat menerima saran serta pendapat membangun demi lebih baik dikemudian hari.

REFERENSI

Adawiyah, R. 2008. Pola Wilayah Bahaya Likuifaksi di Provinsi D.I Yogyakarta (Studi Kasus Gempabumi Yogyakarta 27 Mei 2006. Universitas Indonesia

Astawa, I N., Ilahude, D., dan Kusnida, D. 2005. Seismik Stratigrafi Perairan Lombok Lembar Peta 1807, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Geologi Kelautan*, vol. 3, no. 3, Desember 2005: 8 – 14.

Pemerintah Kabupaten Lombok Utara Tioq Tata Tunaq. Tanpa Tahun. Kondisi Geografis Lombok Utara.
<http://lombokutarakab.go.id/v1/profil-daerah/gambaran-umum/geografi> di akses pada tanggal 15 Oktober 2019, pukul 2.15 WIB

Sadisun, Imam A. 2004. Manajemen Bencana: Strategi Hidup di Wilayah Berpotensi Bencana. Conference paper: 10.13140/2.1.1563.4567

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018. Kajian Rangkaian Gempa Lombok Provinsi Nusa Tenggara Barat, Indonesia 29 Juli 2018 (M6.4) 5 Agustus 2018 (M7.0) 19 Agustus 2018 (M6.9). Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan dan Pengembangan. Kementerian Pekerja Umum dan Perumahan Rakyat.

Wirayudha, Randy. 2018. Tujuh Gempa Lombok dalam Catatan Sejarah. <https://historia.id/politik/articles/tujuh-gempa-lombok-dalam-catatan-sejarah-P94oz> di akses pada tanggal 15 Oktober 2019, pukul 3.46 WIB.

LAMPIRAN

Perhitungan Nilai LSI

Episentrum 8,37° LS-116,48° BT

No	Kabupaten	Lokasi	Jenis	Koordinat		R	LSI
				Bujur	Lintang		
1	Lombok Utara	Kecamatan Bayan	Sand Boil	116,401	-8,301	9,5	84,7
2	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,326	-8,220	18	36,3
3	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,318	-8,228	19	33,9
4	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,318	-8,224	19	33,9
5	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Sand Boil	116,312	-8,306	19	33,9
6	Lombok Timur	Desa Labuhan Pandan, Kecamatan Sambelia	Lateral Spreading	116,667	-8,415	21	30,3

7	Lombok Timur	Desa Labuhan Lombok, Kecamatan Pringgabaya	Lateral Spreading	116,674	-8,487	22	28,4
8	Lombok Timur	Desa Sugihan, Kecamatan Sambelia	Lateral Spreading	116,690	-8,354	23	26,9
9	Lombok Utara	Kecamatan Gangga	Sand Boil	116,254	-8,355	25	24,1
10	Lombok Utara	Kecamatan Gangga	Lateral Spreading	116,253	-8,358	26	22,9
11	Lombok Utara	Dusun Jugil Timur, Kecamatan Gangga	Lateral Spreading	116,237	-8,269	27	21,8
12	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,244	-8,263	27	21,8
13	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,234	-8,271	28	20,8
14	Lombok Utara	Kecamatan Kayangan	Lateral Spreading	116,093	-8,593	44,5	11,4
15	Lombok Utara	Desa Pemenang	Tanah ambles	116,076	-8,418	45	11,2

Lokasi Kemunculan Kejadian Likuifaksi

No.	Lokasi	Jenis	Koordinat	Sumber
1.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Sand Boil	-8.306216 116,312654	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
2.	Kecamatan Gangga,	Sand Boil	-8.355479 116.254063	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
3.	Kecamatan Bayam	Sand Boil	-8.301717 116.401246	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
4.	Kecamatan Gangga	Spraeding Lateral	-8.358928 116.253603	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
5.	Kecamatan Kayangan	Spreading Lateral	-8.593733 116.093016	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
6.	Pelabuhan Kayangan (Desa Labuan Lombok, Kecamatan Pringgabaya)	Lateral Spreading	-8.487041 116.674517	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
7.	Desa Labuan Pandan (Kecamatan Sambelia)	Lateral Spreading	-8.415483 116.667077	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
8.	Desa Sugian (Kecamatan Sambelia)	Lateral Spreading	-8.354037 116.690947	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
9.	Sebelah Barat Badan Jalan di Daerah Jugil Timur	Lateral Spreading	-8,269 116,237	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018

10.	Desa Pemenang, Seberang Gili-Gili	Tanah amblas 1m dan keluar lumpur dengan sangat banyak.	-8.418000 116.076911	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
11.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Lateral Spreading	116.234449° -8.271457°	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
12.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Lateral Spreading	116.244972° -8.263619°	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
13.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Lateral Spreading	116.310808° -8.228623°	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
14.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Lateral Spreading	116.318053° -8.224134°	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018
15.	Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok utara	Lateral Spreading	116.326085° -8.220128°	Tim Pusat Studi Gempa Nasional. 2018

Contoh Perhitungan Nilai LSI

Contoh:

Ditanyakan:

Berapa nilai LSI untuk Desa Pemenang, Kabupaten Lombok Utara?

Diketahui:

Titik koordinat Desa Pemenang adalah 116°07'BT dan 8°41'LS

Titik koordinat pusat gempabumi (episenter) adalah 116°48'BT dan 8°37'LS

Besar kekuatan gempabumi $M_w = 7$

Penyelesaian:

1. Mencari nilai R, atau jarak horizontal lokasi terhadap pusat gempa bumi, dengan menggunakan rumus:

$$\text{Cos ES (R)} = \sin \phi E \cdot \sin \phi S + \cos \phi E \cdot \cos \phi S \cdot \cos [LE - LS]$$

Dengan:

E = koordinat bujur episenter

S = koordinat bujur lokasi kota/desa

LE = koordinat lintang episenter

LS = koordinat lintang lokasi kota/desa

Nilai R dalam satuan derajat cosinus kemudian di konversi ke satuan kilometer dengan mengalikan 111,413 km per 1°

$$\Rightarrow \text{Cos ES (R)} = \sin (116^\circ 48') \cdot \sin (116^\circ 07') + \cos (116^\circ 48') \cdot \cos (116^\circ 07') \cdot \cos [8^\circ 37' - 8^\circ 41']$$

$$\text{Cos ES (R)} = 0,9999750721$$

$$\mathbf{R = 0,4045 \times 111,413 = 45,06 \text{ km} \approx 45 \text{ km}}$$

2. Mencari nilai LSI dengan menggunakan rumus:

$$\text{Log (LSI)} = -2,94 - 1,3 \text{ Log R} + 1,02 \text{ Mw}$$

Dengan:

R = Jarak horizontal dari sumber energi gempa (km)

Mw = Besar kekuatan gempa bumi

$$\Rightarrow \text{Log (LSI)} = -2,94 - 1,3 \text{ Log } 45 + 1,02 (7)$$

$$\mathbf{LSI = 11,2}$$

Kaitan Nilai LSI dengan Kemunculan Kejadian Likuifaksi

LSI	Deskripsi
5	Mengalami efek tanah minor yang terdistribusi dengan sangat jarang, termasuk <i>sand boils</i> hingga diameter 0,5 m, celah tanah kecil dengan lebar bukaan 0,1 m, <i>ground settlement</i> hingga 25 mm. Efek utamanya terletak di area endapan baru dan permukaan air tanah yang dangkal, seperti dataran banjir aktif.

10	Mengalami efek tanah yang terdistribusi dengan jarang, termasuk <i>sand boils</i> hingga diameter 1 m, celah tanah dengan lebar bukaan hingga 0,3 m, <i>ground settlement</i> beberapa inci di atas deposit lepas seperti parit atau saluran yang diisi dengan pasir lepas. <i>Slumps</i> dengan perpindahan hingga beberapa puluh meter di sepanjang tebing curam. Efek utamanya terletak di area pengendapan baru dengan permukaan air tanah yang dalam kurang dari 3 m.
30	Mengalami efek tanah yang umumnya jarang tetapi melimpah secara sporadis termasuk <i>sand boils</i> hingga diameter 2 m, celah tanah dengan lebar hingga beberapa puluh meter, beberapa pagar dan jalan raya mengalami offset, <i>ground settlement</i> secara sporadis sebesar 0,3 m, dan <i>slumps</i> dengan perpindahan 0,3 m di sepanjang tepi sungai curam. Efek yang lebih besar terletak di daerah pengendapan baru dengan permukaan air tanah sedalam kurang dari 3m.
50	Mengalami efek yang melimpah termasuk <i>sand boils</i> hingga 3 m dengan diameter yang biasanya bersatu menjadi ikatan di sepanjang celah. Celah dengan lebar hingga 1,5 m, celah ini umumnya paralel atau melengkung ke arah aliran/depresi dan biasanya retak dalam beberapa helai. Pagar dan jalan raya mengalami offset atau tertarik sejauh 1,5 m di beberapa tempat, <i>ground settlement</i> lebih dari 0,3 m terjadi secara lokal. <i>Slumps</i> dengan perpindahan 1 m umum terjadi di tepian sungai yang curam.
70	Mengalami efek yang melimpah termasuk banyak <i>sand boils</i> besar hingga 6 m dengan diameter yang umumnya menyatu sepanjang celah, panjang sejajar dengan sungai membentuk banyak bukaan selebar 2 m, banyak <i>slumps</i> besar di sepanjang aliran dan tepian curam lainnya. Beberapa massa tanah yang utuh di antara celah-celah yang mengalami perpindahan 1 hingga 2 m ke bawah lereng yang lembut, <i>ground settlement</i> sering lebih dari 0,3 m.
90	Efek tanah yang sangat melimpah termasuk banyak <i>sand boils</i> dengan 30% atau lebih dari beberapa daerah tertutupi oleh pasir, banyak celah panjang dengan bukaan selebar 2 m atau lebih. Beberapa massa tanah utuh antara celah-celah secara horizontal mengalami perpindahan sejauh beberapa meter menuruni lereng yang landai, <i>slumps</i> besar biasa terjadi di sungai dan tebing curam lainnya, <i>ground settlements</i> lebih dari 0,3 m (1 kaki) adalah hal yang biasa terjadi.

(Mst.edu. 2019. <http://web.mst.edu/~rluna/us60eq/LSI.htm>)

Foto Kejadian Gempa Bumi Lombok 5 Agustus 2018 dan Gejala Likuifaksi



Gambar 3 Sesar Minor Permukaan Berarah Barat-Timur Akibat Ejadian Gempa Lombok Utara tanggal 5 Agustus 2018 di Dusun Beraringan, Desa Kayangan, Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)



***Gambar 3** Kenampakan Likuifaksi Jenis Spreading Lateral Akibat Kejadian Gempa Lombok Utara Tanggal 5 Agustus 2018 di Kecamatan Gangga (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)*



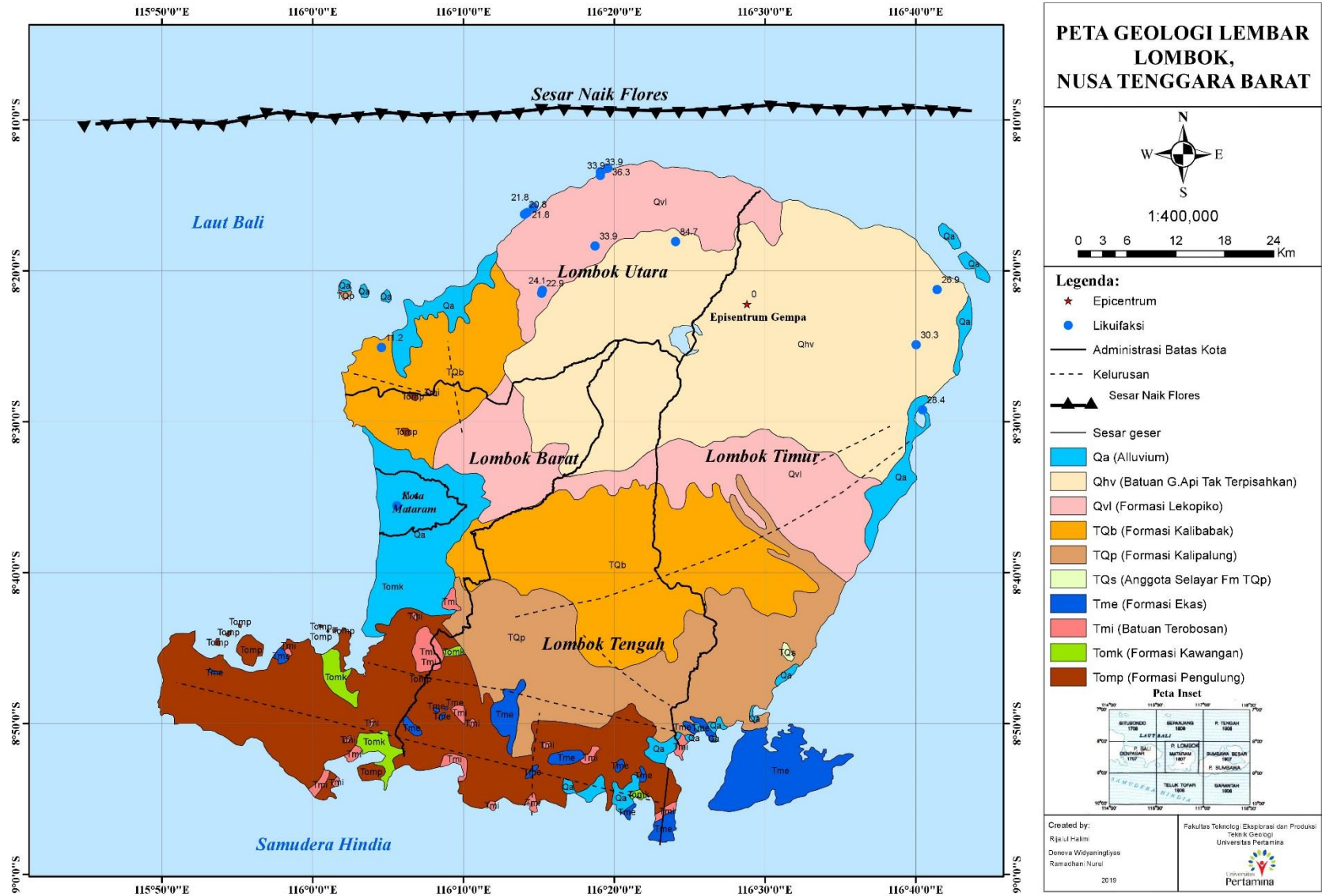
Gambar 4 Sesar Minor Permukaan (Minor Surface Eupture) Berarah Barat-Timur Akibat Kejadian Gempa Lombok Utara Tanggal 5 Agustus 2018 Di Desa Sambik Bengkol, Kecamatan Gangga, Kabupaten Lombok Utara (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)



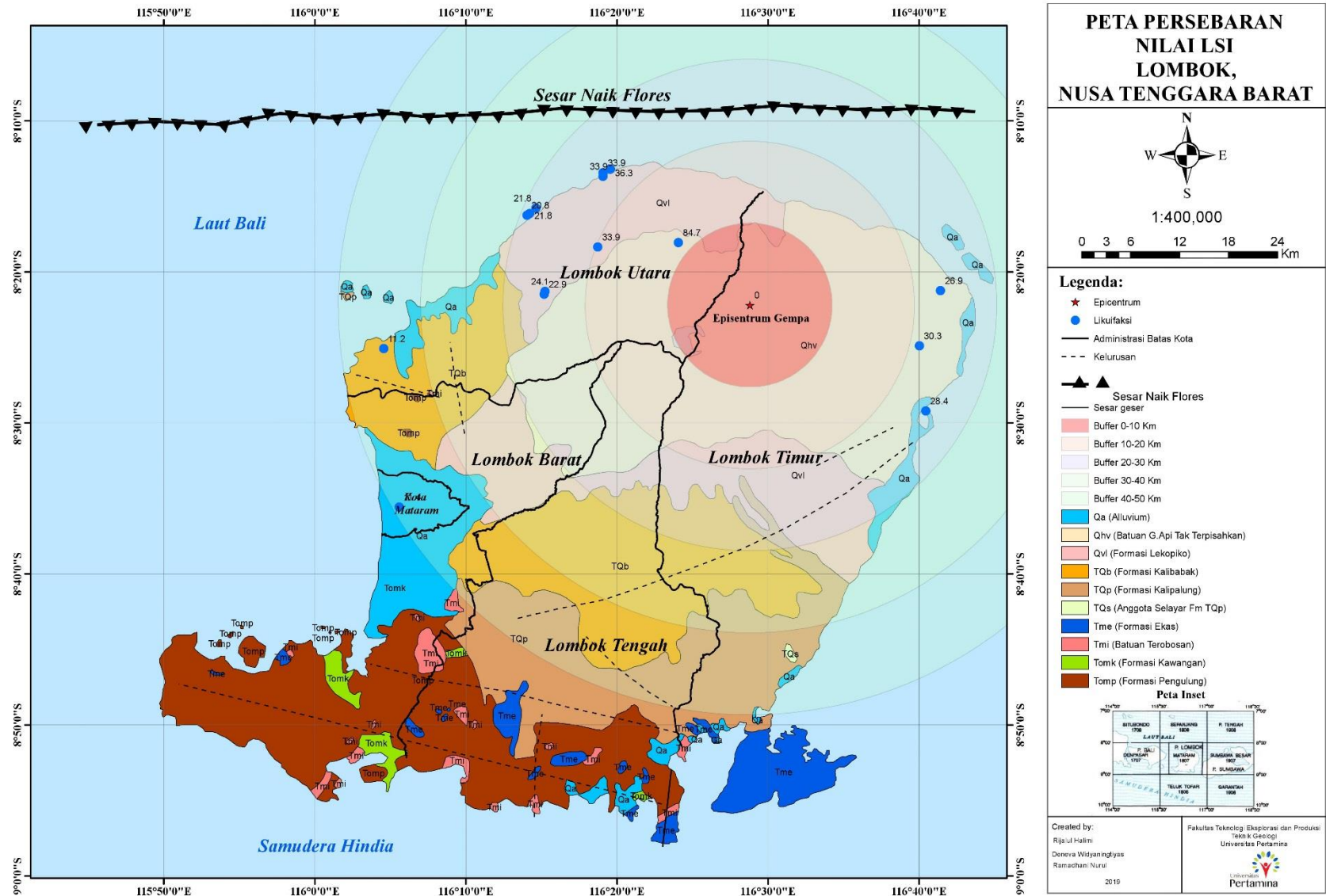
Gambar 5 Kenampakan Likuifaksi Tipe Sand Boil Akibat Kejadian Gempa Lombok Utara Tanggal 5 Agustus 2018 Di Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok Utara (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)



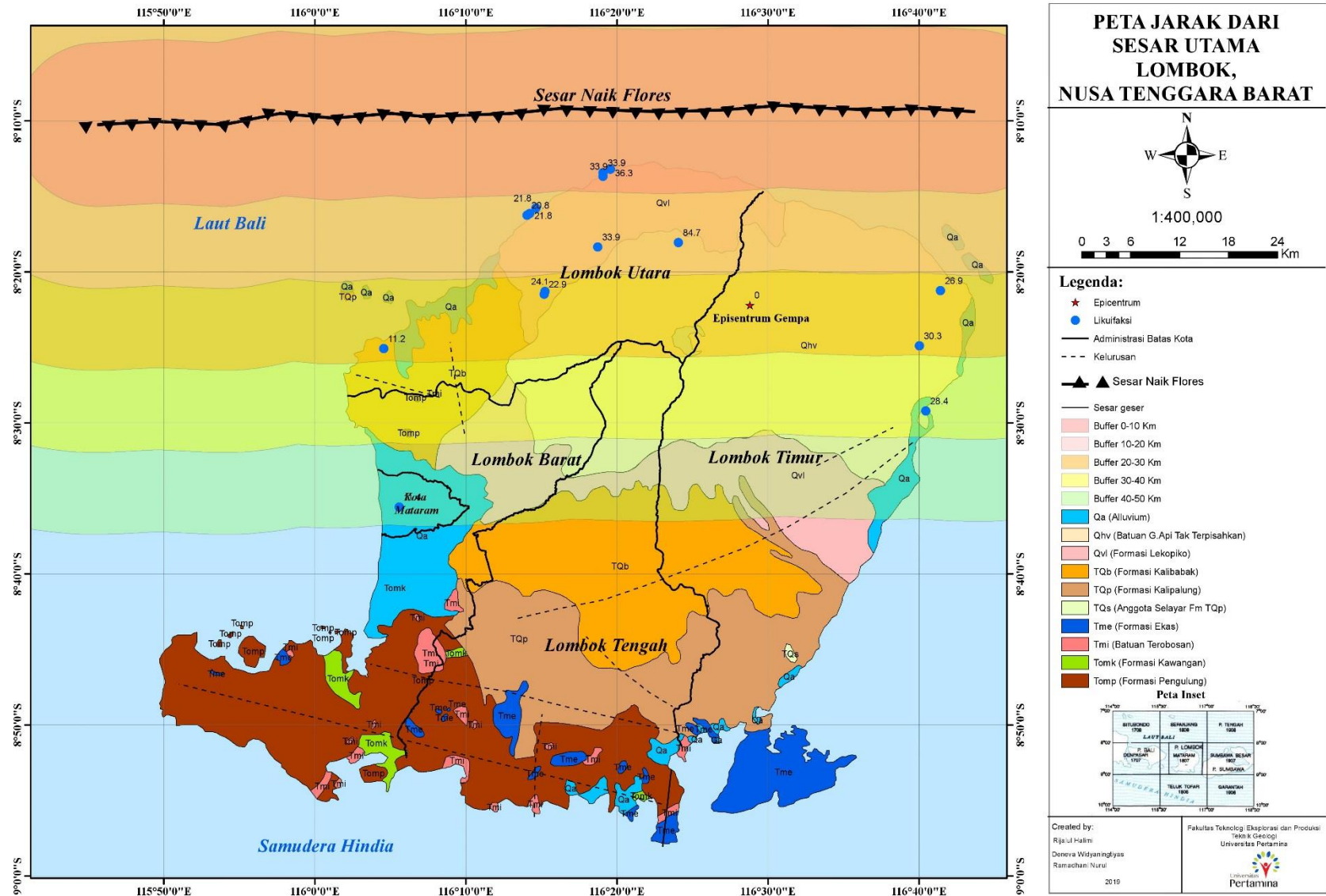
Gambar 6 Likuifaksi Akibat Kejadin Gempa Lombok Utara Tanggal 5 Agustus 2018 Mengakibatkan Kerusaka Trumah Penduduk Dan Smur Menjadi Miring di Dusun Beraringan, Desa Kayangan, Kecamatan Kayangan, Kabupaten Lombok Utara (Sumber: Tim Pusat Studi Gempa Nasional., 2018)



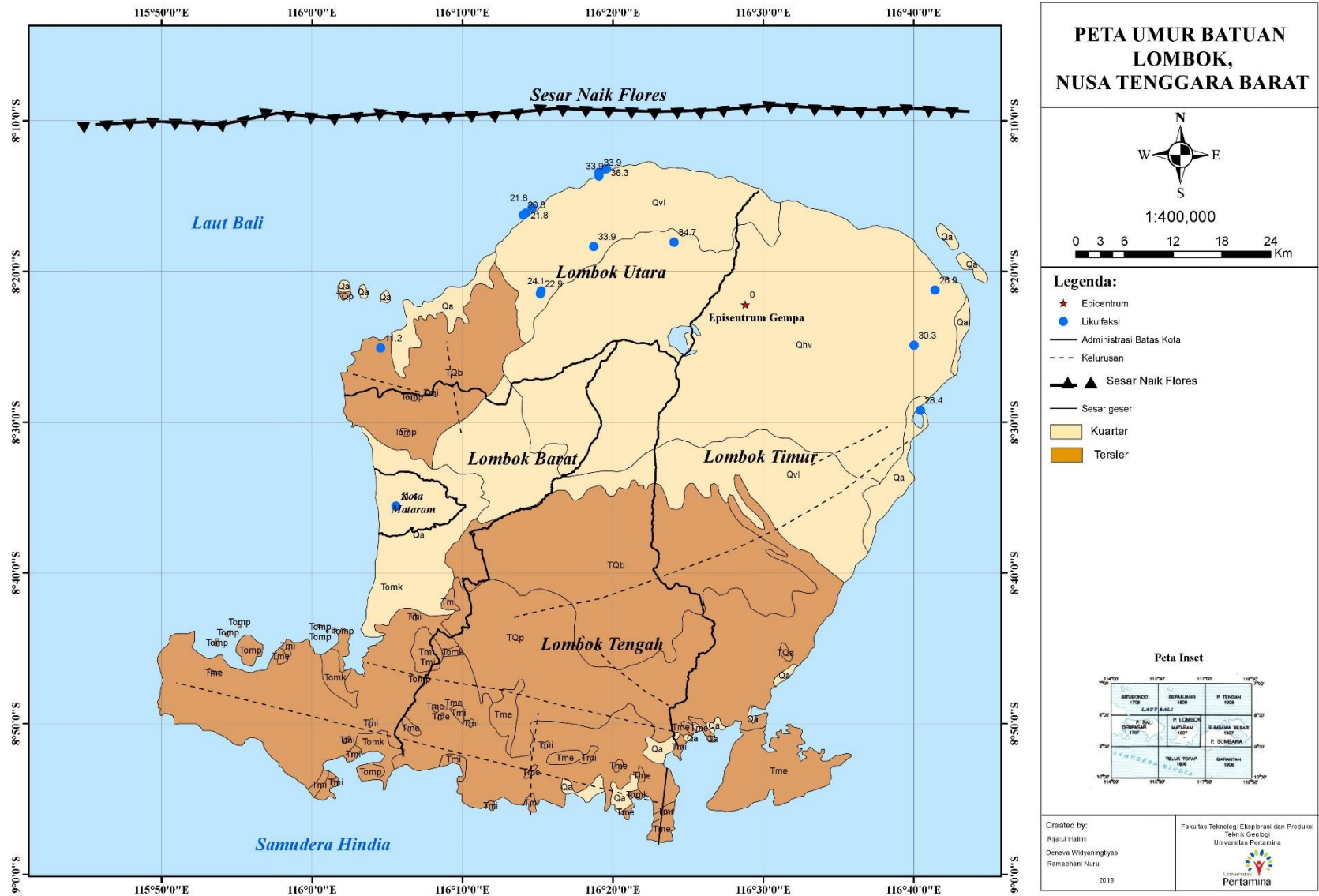
Peta Geologi Lembar Lombok, NTB



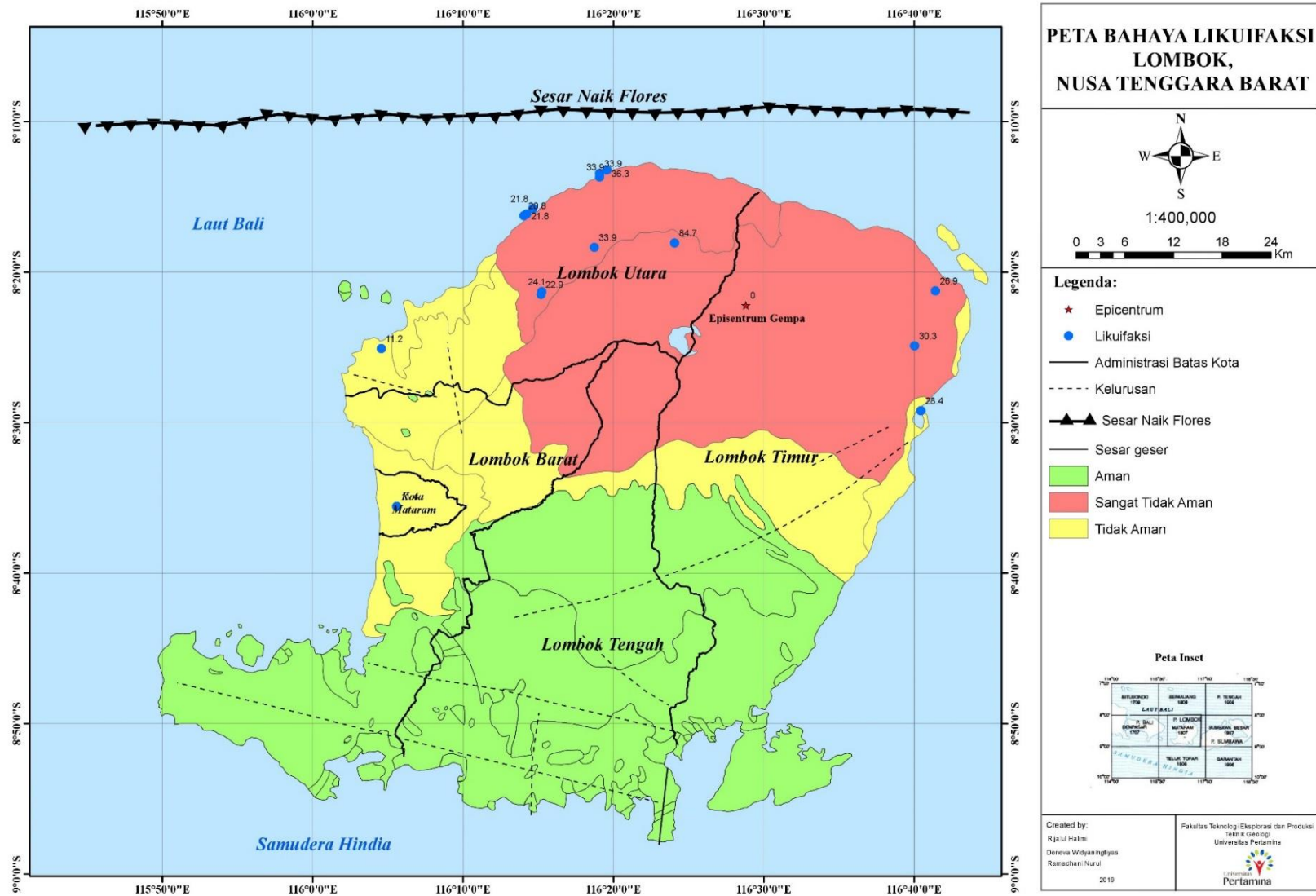
Peta persebaran nilai LSI



Peta Buffer Jarak Sesar Utama dengan lokasi likuifaksi



Peta persebaran umur batuan Lombok, NTB dengan lokasi likuifaksi



Peta bahaya likuifaksi

Identifikasi Zona Mineralisasi Logam Menggunakan Integrasi Data Domain Frekuensi Polarisasi Terimbas dan Resistivitas serta Data Geologi pada Prospek 'XYZ' PT. ANTAM Tbk, di Jawa Barat

Fatimah Az Zahra^{*}, Wira Hadi Kusuma² dan Arda Bagus Manggadyta³

¹FTTM-ITB/Teknik Geofisika

²FTTM-ITB/Teknik Geofisika

³FITB-ITB/Teknik Geologi

*fatimahazz930@gmail.com

ABSTRAK

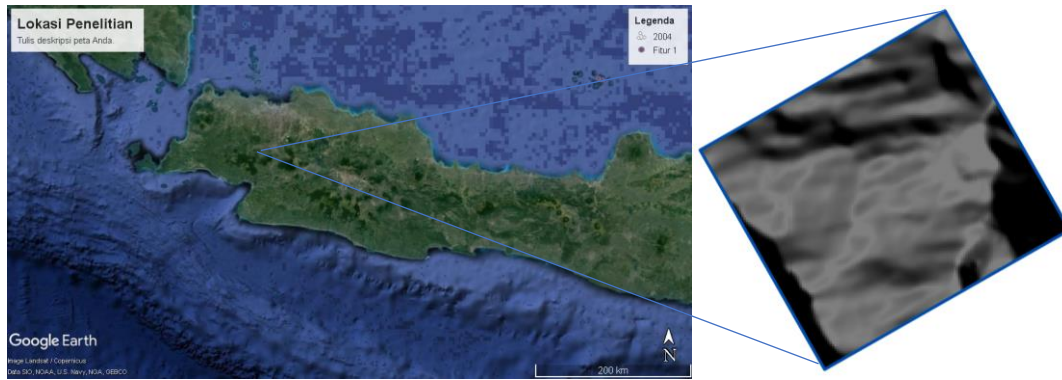
Daerah penelitian berada dalam area Ijin Usaha Pertambangan (IUP) PT. ANTAM Tbk yang terletak di Jawa Barat. Daerah ini memiliki topografi berbukit-bukit dan memiliki satuan batuan andesit, breksi dasit, dan breksi tuf. Struktur geologi yang dominan berupa sesar geser mengangan (dekstral) yang memiliki tren berarah NW-SE. Asosiasi mineral hasil alterasi batuan di daerah ini adalah propilitik, klorit-ilit-smektit, dan ilit-smektit. Daerah penelitian terletak berdekatan dengan kompleks endapan epitermal sulfidasi rendah sehingga diduga juga memiliki potensi keterdapatan zona mineralisasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dan menentukan karakteristik zona mineralisasi logam dengan menggunakan integrasi data domain frekuensi polarisasi terimbas dan resistivitas (yang memanfaatkan polarisabilitas dan sifat kelistrikan batuan) serta didukung data-data geologi yang ada sebagai data tambahan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan konfigurasi dipol-dipol sebanyak 4 lintasan dengan panjang masing-masing 1 km, spasi antar lintasan 200 m, dan spasi antar elektroda 100 m. Data hasil pengukuran diolah dengan Oasis Montaj yang menghasilkan model 2D dan 3D. Hasil interpretasi dari model-model tersebut memanfaatkan parameter *percent frequency effect (PFE)* dan resistivitas. Berdasarkan integrasi tersebut, penulis membagi daerah penelitian menjadi tiga zona prospek: Zona A, B, dan C. Zona prospek secara keseluruhan memiliki nilai PFE >1,5 % dan resistivitas yang bervariasi bergantung pada kondisi geologinya dengan rentang 151,1-170,2 ohm.m. Persebaran mineralisasi dikontrol oleh beberapa faktor geologi antara lain struktur geologi (sesar) dan litologi (keberadaan intrusi andesit). Mineralisasi yang terjadi pada daerah penelitian berupa *disseminated ore* maupun mineral logam yang hadir sebagai pengisi *vein* kuarsa.

Kata Kunci : Mineralisasi, PFE, Polarisasi Terimbas, Resistivitas

1. Pendahuluan

Seiring dengan berkembangnya teknologi, kebutuhan akan mineral-mineral logam sebagai salah satu penyusun komponen alat-alat elektronik juga turut bertambah, khususnya di Indonesia. Hal tersebut mendorong perusahaan-perusahaan yang bergerak di bidang mineral ekonomis semakin gencar melakukan kegiatan eksplorasi, salah satunya adalah PT. ANTAM Tbk selaku perusahaan tambang dan eksplorasi mineral di Jawa Barat. Daerah penelitian terletak di area Ijin Usaha Pertambangan (IUP) PT. ANTAM Tbk yang terletak di sekitar Gunung

Pongkor. Daerah penelitian terletak berdekatan dengan sistem urat hidrotermal yang bertipe Epitermal sulfidasi rendah yang telah terbukti memiliki cadangan mineral logam. Hal tersebut memunculkan dugaan bahwa daerah penelitian juga memiliki potensi keterdapatan zona mineralisasi. Integrasi data geofisika dan geologi menjadi penting untuk dilakukan agar eksplorasi yang dilakukan menjadi lebih akurat dan meningkatkan probabilitas keberhasilan dalam menemukan zona mineralisasi logam. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi zona mineralisasi logam dengan menggunakan integrasi



Gambar 1. Lokasi Penelitian terletak di daerah Jawa Barat

data domain frekuensi metode polarisasi terimbas dan resistivitas (yang memanfaatkan polarisabilitas dan sifat kelistrikan batuan) serta didukung oleh data-data geologi yang ada sehingga dapat menentukan zona prospek mineralisasi dan karakteristiknya.

Geologi Regional

Daerah penelitian terletak di sekitar Gunung Pongkor dan memiliki topografi berbukit-bukit. Berdasarkan Peta Geologi Tim Geologi PT ANTAM Tbk, daerah ini terdiri dari tiga satuan batuan yaitu andesit, breksi dasit, dan breksi tuf (lihat Gambar X). Ketiga satuan tersebut merupakan produk vulkanik dari gunung api purba di daerah tersebut. Struktur geologi yang berkembang pada daerah penelitian merupakan jenis struktur berupa sesar geser yang membentuk splay. Struktur-struktur yang terdapat pada daerah penelitian menjadi zona permeabel sebagai jalur fluida hidrotermal untuk keluar dari heat source dan mengalterasi batuan sampling serta mengendapkan mineral bijih.

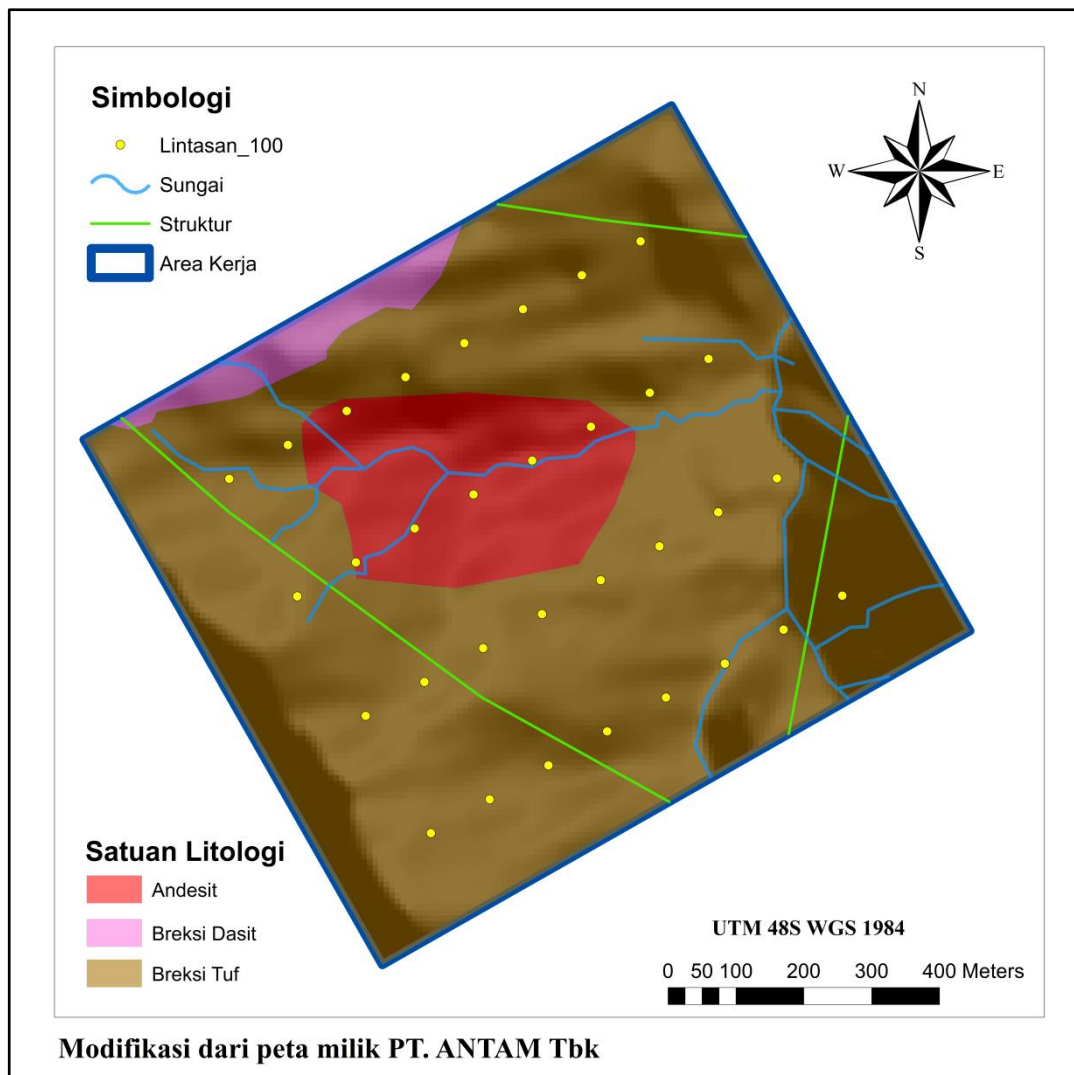
Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal merupakan proses interaksi antara larutan hidrotermal dengan batuan yang dilewatinya pada kondisi fisika dan kimia tertentu

(Pirajno, 2009). Larutan hidrotermal adalah larutan panas ($\pm 50^{\circ}\text{C}$ hingga $> 500^{\circ}\text{C}$), mengandung unsur terlarut yang umumnya terpresipitasi ketika larutan mengalami perubahan karakteristik secara temporal dan spasial (Pirajno, 2009). Alterasi hidrotermal membuat perubahan pada batuan sampling membentuk asosiasi mineral yang menghasilkan zona-zona tertentu. Zona alterasi yang terdapat pada daerah penelitian adalah zona propilitik, illit-smektit, dan klorit-illit-smektit.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini secara garis besar terbagi menjadi dua tahapan, yaitu tahap pengambilan data dan tahap pengolahan data. Tahap pengambilan data dilakukan oleh PT. ANTAM Tbk yang terdiri dari data geologi dan geofisika. Data geologi yang dikumpulkan terdiri dari litologi, struktur, alterasi, dan keberadaan vein. Data geofisika diakuisisi dengan menggunakan metode polarisasi terimbas (*induced polarization*) dan resistivitas. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan konfigurasi dipol-dipol sebanyak 4 lintasan dengan panjang masing-masing 1 kilometer, spasi antar lintasan 200 meter dan spasi antar elektroda 100 meter. Data geologi didigitasi dan diolah sehingga menghasilkan peta



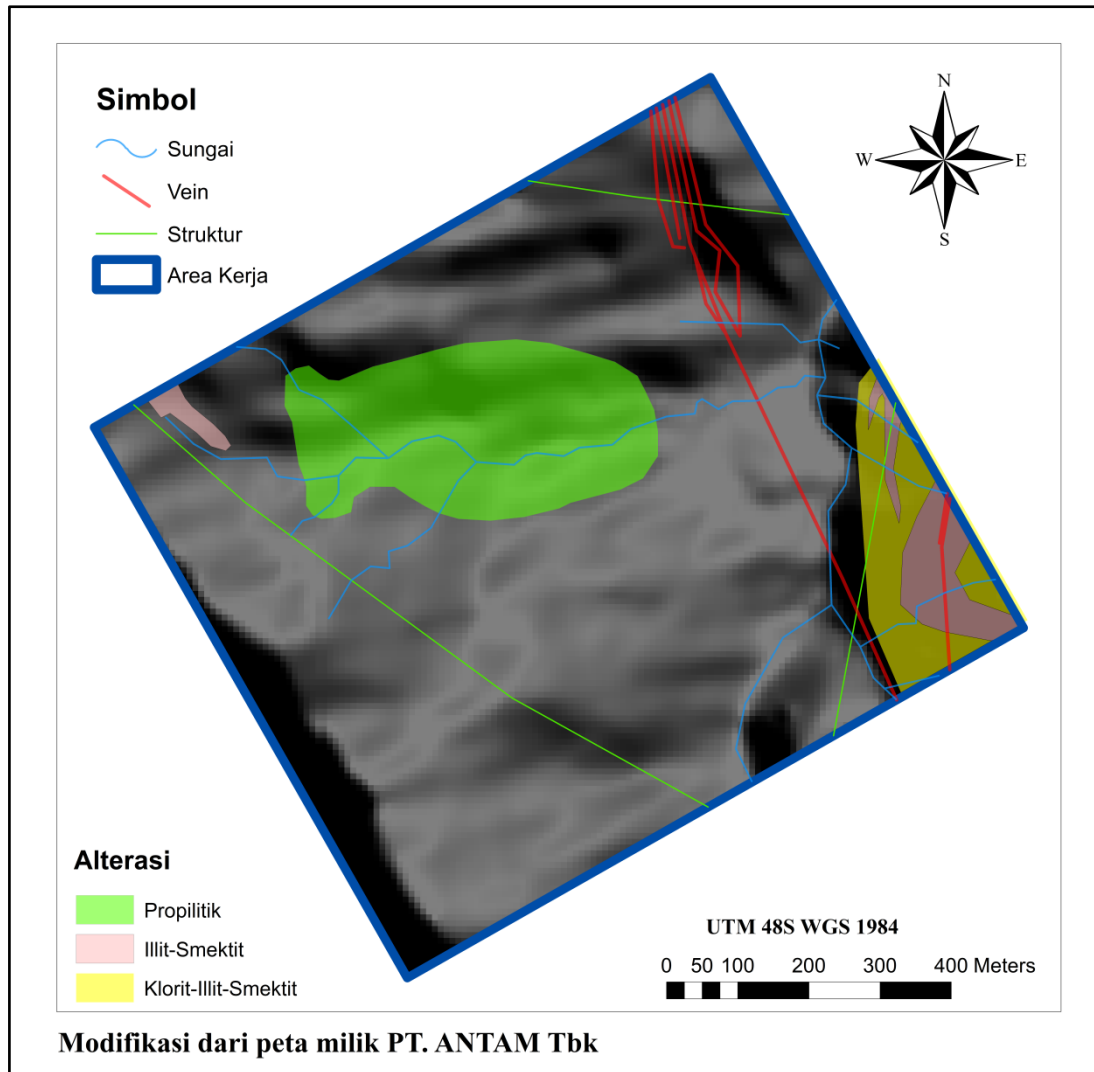
Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian dan lintasan elektroda

geologi dan peta alterasi (tidak dipublikasikan oleh PT. ANTAM Tbk). Data geofisika yang telah dikumpulkan kemudian diolah menggunakan *software* Oasis Montaj. Hasil pengolahan berupa penampang bawah permukaan 2D dan model 3D dalam bentuk anomali resistivitas dan *percent frequency effect*.

Polarisasi Terimbas

Metode Polarisasi terimbas merupakan salah satu metode geofisika yang mampu mendeteksi terjadinya polarisasi listrik pada permukaan mineral-mineral logam di bawah permukaan bumi. Pada metode ini arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi

melalui dua buah elektroda arus, kemudian beda potensial yang terjadi diukur melalui dua buah elektroda potensial sehingga didapatkan nilai tahanan jenis. Polarisasi banyak terjadi pada medium yang mengandung mineral logam (misalnya senyawa sulfida logam) sehingga Metode IP banyak diaplikasikan dalam aspek lingkungan dan industri khususnya industri mineral (Butler,2005). Pada aplikasi bidang mineral, respon dari IP memberikan efek yang paling besar yaitu adanya respon mineralisasi dimana endapan endapan sulfida tersebut muncul. Hal ini membuat metode IP memiliki keunggulan dari metode geofisika lain untuk digunakan



Gambar 3. Peta alterasi dan persebaran vein daerah penelitian

pada daerah dengan mineralisasi yang tersebar (diseminasi).

Konfigurasi Dipol-dipol

Konfigurasi ini merupakan gabungan dari teknik *profiling* dan *depth sounding* sehingga jenis konfigurasi ini sangat cocok untuk digunakan dalam eksplorasi geofisika. Konfigurasi ini menempatkan jarak elektroda arus agar mendapatkan gambaran bawah permukaan pada obyek yang penetrasinya relatif lebih dalam dibandingkan dengan metode sounding lain seperti konfigurasi Wenner dan konfigurasi Schlumberger (Loke, 2004).

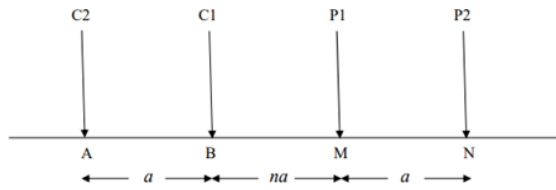
Adapun dalam penentuan nilai resistivitas semu dari konfigurasi dipole-dipole adalah:

$$\rho = KR$$

$$V = IR$$

Dimana nilai R adalah tahanan jenis yang didapatkan dari nilai beda potensial dan arus listrik yang

didapatkan pada saat akuisisi di lapangan.



Gambar 4. Susunan elektroda konfigurasi dipol-dipol

Sedangkan untuk mencari K sebagai faktor geometri :

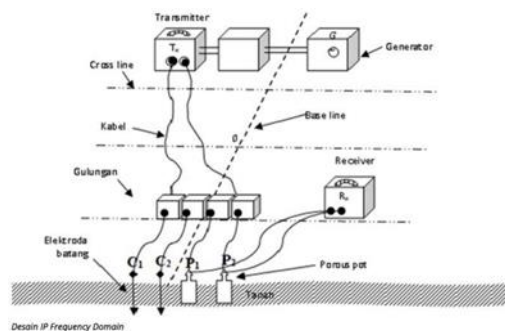
$$K = n(n+1)(n+2)a$$

Percent Frequency Effect

Nilai frekuensi efek memiliki nilai yang ekuivalen dengan *chargeability* pada domain waktu yang dimana jika nilai PFE berada pada medium polarisasi yang rendah. maka nilainya tidak lebih dari 1

$$PFE = (pdc-pac)/pac$$

dengan p_c adalah tahanan jenis yang terukur pada frekuensi rendah dan p_c adalah tahanan jenis yang terukur pada frekuensi tinggi.



Gambar 5. Desain akuisisi domain frekuensi

Resistivitas

Metode Resistivitas merupakan metode yang biasanya digunakan dengan

metode polarisasi terimbas dalam menyelidiki kondisi bawah permukaan dengan memanfaatkan sifat kelistrikan batuan untuk mencari zona mineralisasi pada industri pertambangan. Besaran yang diukur merupakan perbedaan potensial listrik dan kuat arus listrik. Dalam kedua nilai parameter tersebut, sehingga nilai tahanan jenis didapatkan.

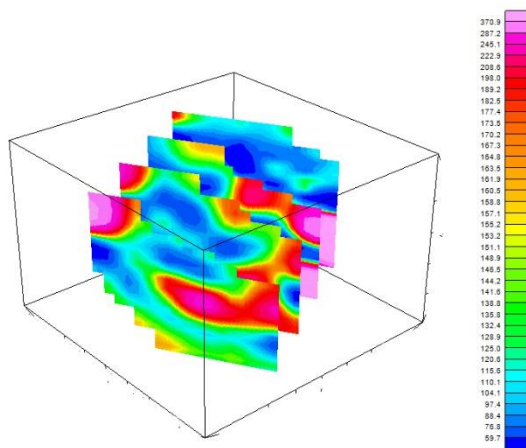
3. Hasil dan Pembahasan

Daerah penelitian terbagi menjadi 4 slice lintasan yang memanjang dengan tren NE- SW dengan jarak antar slice sejauh 200 meter (Gambar 2). Masing-masing slice diberi kode: 0_100, 200_100, 400_100, 600_100.

Data Resistivitas

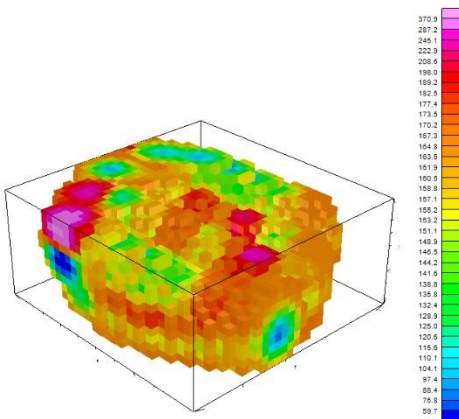
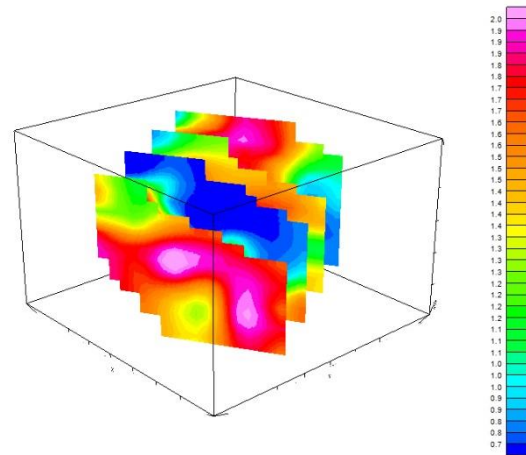
Nilai resistivitas yang didapatkan dari pengolahan dengan Oasis Montaj menunjukkan bahwa daerah penelitian memiliki rentang <59,7 hingga >370,9 ohm.m (Gambar 6 dan 7). Berdasarkan rentang tersebut, nilai resistivitas di daerah penelitian dibagi menjadi beberapa kelas yang tertera pada tabel berikut:

Resistivitas (Ohm.m)	Kelas
<138,8	Rendah
138,8-177,4	Sedang
>177,4	Tinggi

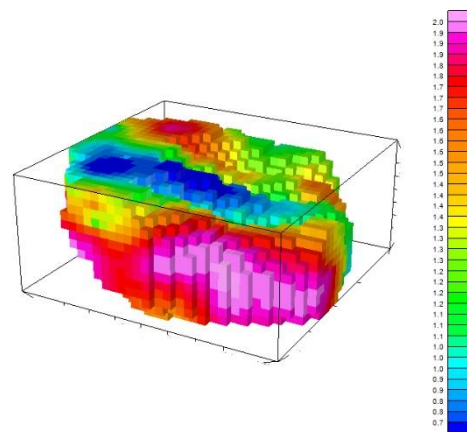


Gambar 6. Penampang resistivitas 2D masing-masing lintasan

>1,4	Tinggi
------	--------



Gambar 8. Penampang resistivitas 3D



Gambar 7. Penampang PFE 3D

Gambar 9. Penampang PFE masing-masing lintasan

Data PFE

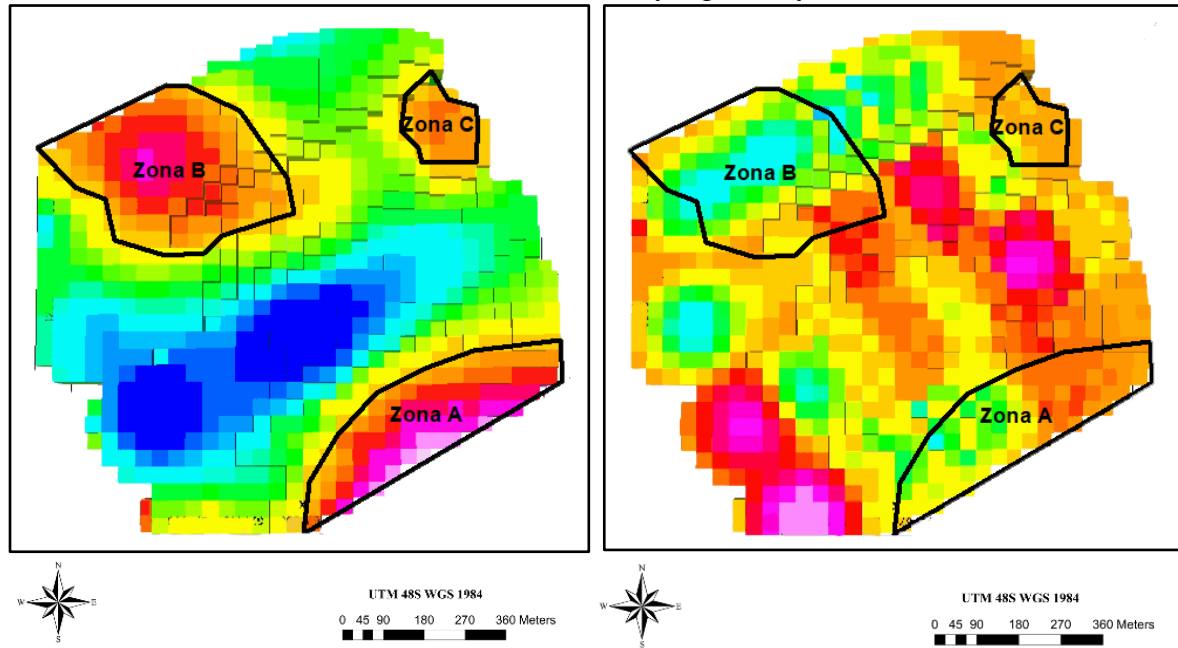
Oasis Montaj menunjukkan bahwa daerah penelitian memiliki rentang (Gambar 8 dan 9). Berdasarkan rentang tersebut, nilai PFE di daerah penelitian dibagi menjadi beberapa kelas yang tertera pada tabel berikut:

PFE (%)	Kelas
<1,1	Rendah
1,1-1,4	Sedang

Interpretasi

Penentuan zona mineralisasi secara umum dititikberatkan pada zona PFE dengan nilai tinggi. Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya, respon dari IP memberikan efek yang paling besar yaitu adanya respon mineralisasi dimana endapan-endapan sulfida (mineral logam) tersebut muncul. Respon resistivitas juga digunakan untuk karakterisasi zona mineralisasi. Berdasarkan hal tersebut, penulis membagi daerah penelitian menjadi beberapa zona prospek mineralisasi yaitu zona A, B, dan C.

yang menyebabkan nilai resistivitas



Gambar 10. Peta Zona Prospek Mineralisasi (kiri PFE, kanan Resistivitas)

Zona A terletak di sisi tenggara daerah penelitian dan memanjang dengan tren NE-SW dengan persentase persebaran adalah 25% dari total daerah penelitian. Zona ini memiliki nilai PFE $>1,5\%$ (tinggi) dan resistivitas 115,5-170,2 ohm.m (rendah-sedang). Persebaran nilai PFE yang tinggi apabila dilihat pada penampang dua dimensi maupun tiga dimensi menunjukkan bahwa nilai PFE yang tinggi tersebut menerus hingga ke bawah pada bagian yang dilalui oleh kompleks *vein* dan sesar di bagian timur daerah penelitian yang memanjang dengan tren NE-SW. Nilai PFE yang tinggi di zona ini diinterpretasikan sebagai akibat dari kehadiran mineral logam sebagai pengisi *vein* dan juga terdiseminasi di sekitarnya dengan tren NE-SW. Nilai resistivitas di zona ini bervariasi dengan kecenderungan memiliki nilai yang relatif lebih tinggi di bagian yang dilalui sesar NE-SW dan *vein*. Hal tersebut diinterpretasikan sebagai akibat dari adanya *vein* kuarsa dan proses silisifikasi batuan di sekitarnya

menjadi lebih tinggi dari sekitarnya. Nilai resistivitas yang tinggi dikarenakan proses silisifikasi hidrotermal dapat meningkatkan densitas dari batuan vulkanik yang porous (Irvine, 1990), dikarenakan pengisian dan penggantian mineral terdahulu oleh silika/kuarsa, termasuk pada silika/kuarsa yang terdapat sebagai urat.

Zona B terletak di sisi barat daya daerah penelitian dengan persentase 25% dari total daerah penelitian (Gambar 10). Zona ini memiliki nilai PFE $>1,5\%$ (tinggi) dan resistivitas $<151,1$ ohm.m (rendah-sedang). Persebaran nilai PFE di zona ini juga menerus ke bawah permukaan namun semakin mengecil nilainya. Hal tersebut diinterpretasikan sebagai akibat dari keberadaan *disseminated ore* yang tersebar di sekitar satuan andesit yang diduga sebagai intrusi (dengan faktor pendukung berupa data alterasi propilitik yang terdapat di sisi utara litologi ini, dikarenakan lava tidak

menghasilkan alterasi hidrotermal). Nilai resistivitas zona ini cenderung rendah sebagai akibat dari keterdapatannya alterasi hidrotermal berupa propilitik. Zona alterasi ini umumnya terdiri dari mineral klorit yang merupakan salah satu jenis mineral lempung. Keberadaan mineral lempung sebagai hasil alterasi hidrotermal akan meningkatkan kapasitas pertukaran ion sehingga akan meningkatkan konduktivitas (Irvine, 1990), sehingga resistivitasnya lebih rendah.

Zona C terletak di sisi timur laut daerah penelitian dengan persentase persebaran adalah 10% dari total daerah penelitian. Zona ini memiliki nilai PFE >1,5-1,7% (tinggi) dan resistivitas >161,9 ohm.m. (sedang-tinggi). Persebaran nilai PFE yang tinggi ini apabila dilihat pada penampang dua dimensi dan tiga dimensi menunjukkan kemenerusan hingga ke bawah. Nilai PFE yang tinggi di zona ini diinterpretasikan sebagai akibat dari kehadiran mineral logam sebagai pengisi *vein*. Nilai resistivitas pada zona ini tergolong tinggi yang diinterpretasikan sebagai akibat dari keberadaan urat kuarsa dan zona silisifikasi di sekitarnya.

Kesimpulan

Identifikasi dan karakterisasi zona mineralisasi logam menjadi lebih mudah dilakukan dengan menggunakan integrasi metode geofisika (IP dan Resistivitas) dan geologi. Berdasarkan integrasi tersebut, penulis menentukan daerah prospek mineralisasi di daerah penelitian menjadi tiga zona: Zona A, B, dan C. Zona-zona tersebut memiliki nilai PFE >1,5 % dan resistivitas yang bervariasi bergantung pada kondisi geologinya dengan rentang 151,1-170,2

ohm.m. Persebaran mineralisasi dikontrol oleh beberapa faktor geologi antara lain struktur geologi (sesar) dan litologi (keberadaan intrusi andesit). Mineralisasi yang terjadi pada daerah penelitian berupa *disseminated ore* maupun mineral logam yang hadir sebagai pengisi *vein* kuarsa.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada orang tua dan rekan-rekan dari penulis yang telah memberikan doa dan dukungan sehingga penelitian ini dapat menghasilkan sebuah kesimpulan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen-dosen yang telah memberikan ilmunya sehingga penulis dapat memahami materi yang berkaitan dengan penelitian.

Daftar Pustaka

- Butler, D. K. (2005). *Near-Surface Geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics.
- Corbett, G.J. and Leach, T.M., 1998. *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization* (No. 6). Boulder, Co: Society of Economic Geologists.
- Irvine, R.J. and Smith, M.J., 1990. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. *Journal of Geochemical exploration*, 36(1-3), pp.375-412.

Milesi, J.P., Marcoux, E., Sitorus, T., Simandjuntak, M., Leroy, J. and Bailly, L., 1999. Pongkor (west Java, Indonesia): a pliocene supergene-enriched epithermal Au-Ag-(Mn) deposit. *Mineralium Deposita*, 34(2), pp.131-149.

Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and wall rock alteration. In Hydrothermal processes and mineral systems* (pp. 73-164). Springer, Dordrecht.

Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons Inc., England.

ANALISA STRUKTUR GEOLOGI PENGONTROL *RESERVOIR* SISTEM PANAS BUMI UNGARAN BERDASARKAN DATA GRAVITASI DAN GEOMAGNETIK

Tedy Wiku Setiaji¹, Refita Khumayroh² dan Amrupranadi Muhammad³

^{1,2,3} Teknik Geofisika, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

*tedywiki09@gmail.com

ABSTRAK

Panas bumi merupakan salah satu energi alternatif yang memiliki potensi besar di Indonesia. Salah satu potensi panas bumi yang dapat dikembangkan yaitu Gedong Songo. Gedong Songo merupakan kompleks panas bumi dari bagian sistem gunungapi Ungaran. Gunung Ungaran merupakan gunungapi Kuartar yang letaknya berada di utara Pegunungan Serayu Utara, dan merupakan hasil magmatisme belakang busur (*back arc magmatism*). Gunung Ungaran merupakan rangkaian paling utara dari jajaran gunungapi Ungaran – Telomoyo – Merbabu – Merapi. Indikasi adanya potensi panas bumi ditandai dengan kenampakan manifestasi berupa sumber air panas, *fumarole*, endapan travertine, tanah beruap, dan batuan teralterasi. Untuk mengetahui zona prospek dari lapangan panas bumi ini dilakukan penelitian menggunakan metode geofisikagravitasi dan geomagnetik, yaitu dengan menganalisa keberadaan struktur yang mengontrol *reservoir* panas bumi dengan sumber panas (*Heat Source*) yang ada. Berdasarkan analisa data magnetik yang didapat pada daerah manifestasi panas bumi umumnya ditunjukkan dengan anomali negatif dan batuan pada daerah tersebut memiliki nilai suseptibilitas yang rendah karena mengalami proses alterasi. Selain daerah manifestasi nilai anomali magnetik yang rendah dapat mengindikasikan keberadaan dari *heatsource*. Pada peta *Reduce to Pole* (RTP) didapatkan nilai magnetik yang rendah berkisar -578,4 nT sampai -161,1 nT. Kemudian dari data gravitasi digunakan untuk mendeliniasi posisi dari struktur yang menjadi pengontrol keberadaan dari *reservoir*. Berdasarkan peta Anomali *Bouguer* Lengkap (ABL) didapatkan nilai anomali rendah berkisar 6,5 mGal sampai 9,7 mGal. Nilai anomali rendah kemungkinan disebabkan adanya keberadaan *reservoir* panas bumi di daerah tersebut. *Reservoir* panas bumi umumnya merupakan zona rekahan (*fracture zone*) yang menurunkan nilai rapat massa batuan dibandingkan dengan sekitarnya. Geologi Ungaran tersusun oleh batuan vulkanik Tersier dari Miosen sampai Pleistosen, yang diduga sumber panas daerah Ungaran berumur Holosen. Struktur di Ungaran dikendalikan oleh patahan atau sesar yang dominan mengarah ke barat laut - tenggara, sehingga cairan dan uap dari *reservoir* keluar melalui zona lemah dan muncul di permukaan.

Kata Kunci : *Gedongsongo, Gravitasi, Magnetik, Panas bumi*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang masuk dalam jalur cincin api pasifik atau yang biasa disebut dengan *ring of fire*. Hal ini mengakibatkan Indonesia menjadi satu negara dengan potensi geothermal terbesar di dunia, yaitu dengan sumber daya sebesar 11.073 MW dan cadangan sebesar 17.506 MW (KESDM, 2017). Dengan besarnya potensi geothermal yang dimiliki Indonesia ini apabila dimanfaatkan dengan maksimal dapat menjadi penopang kemandirian dan ketahanan energi Negara Indonesia. Untuk itu diperlukannya

penelitian dan pengembangan bagi lapangan lapangan panas bumi tersebut agar dapat diketahui dengan lebih detail mengenai potensi dan penanganan yang tepat dalam rangka pemanfaatan sumberdaya panas bumi.

Berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1789 K/33/MEM/2007 Wilayah Kerja Pertambangan (WKP) Gunung Ungaran memiliki sumberdaya hipotesis sebesar 50 MWe. Untuk mengetahui tatanan geologi bawah permukaan dari lapangan panas bumi ini dilakukan penelitian geofisika

menggunakan metode gravitasi dan geomagnetik. Tujuannya untuk menganalisa kontrol dari struktur geologi terhadap keberadaan *reservoir* sistem panas bumi Gunung Ungaran.

1.1. Geologi Daerah Telitian

Gunung Ungaran merupakan gunungapi kuarter yang letaknya berada di utara Pegunungan Serayu Utara, dan merupakan hasil magmatisme belakang busur (*back arc magmatism*) dengan ketinggian sekitar 2.050 m dpl. Gunung Ungaran terletak di atas batuan dan tergabung dalam Formasi batuan tersier dan merupakan rangkaian paling utara dari jajaran gunungapi Ungaran – Telomoyo – Merbabu - Merapi. Panas bumi Gunung Ungaran ditandai dengan mata air panas, fumarol, tanah panas, dan batuan ubahan. Geologi kompleks depresi Ungaran telah dibahas oleh beberapa peneliti, di antaranya van Bemmelen (1941, 1949), Von Padang (1951), Nikmatul Akbar (1983), Hadisantono dan Sumpena (1993), Thanden dkk.(1996) (Rezky Dkk, 2012). Gunung Ungaran termasuk ke dalam gunung api tipe B yang telah mengalami evolusi dalam tiga periode yakni, Ungaran Paling Tua, Ungaran Tua dan Ungaran Muda yang dibedakan proses runtuhnya karena vulkano-tektonik (Gaffar Dkk, 2007)

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapat dari kegiatan kuliah lapangan Teknik Geofisika Tahun 2017. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode geomagnetik dan metode gravitasi. Dalam pengolahan geomagnetic dilakukan *filtering Reduce to Pole* dan *Tilt Derivative*. Pada pengolahan Gravity dilakukan pengolahan hingga Anomali Bouguer

lengkap kemudian dilakukan *filtering Tilt Derivative* untuk mengidentifikasi patahan yang ada pada daerah penelitian.

Metode Geomagnetik merupakan salah satu metode geofisika yang sering digunakan untuk survei pendahuluan pada eksplorasi minyak bumi, panas bumi, batuan mineral, maupun untuk keperluan pemantauan (*monitoring*) gunungapi.

Pada umumnya peta anomali medan magnetik (untuk geofisika terapan biasanya medan total atau medan vertikal) bersifat agak kompleks. Variasi medan lebih tak menentu dan terlokalisir sebagai akibat dari medan magnetik *dipole* yang merupakan besaran vektor. Selanjutnya dilakukan *filtering* untuk menjadikan peta HA menjadi *monopole*.

RTP (*Reduction to The Pole*) merupakan salah satu dari beberapa *filter* yang digunakan untuk membantu proses interpretasi. *Filter* RTP pada dasarnya mentransformasikan anomali magnetik disuatu lokasi berada pada kutub utara magnetik bumi. Sehingga, anomali medan magnetik terletak tepat diatas tubuh benda penyebab anomali dan anomali magnetik bersifat monopole/satu kutub. Reduksi ke kutub dilakukan dengan dengan cara mengubah sudut inklinasi menjadi 90° dan deklinasi menjadi 0°. Kemudian untuk memperjelas struktur daerah telitian dilakukan *filter Tilt Derivative*.

Sudut kemiringan θ dari anomali magnetik A setara dengan fase lokal dan diberikan oleh

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial A / \partial z}{\partial A / \partial h} \right) \quad (1)$$

di mana pembilang dan penyebut adalah turunan vertikal dan horisontal dari

anomali, masing-masing, yang terakhir diberikan oleh

$$\partial A/\partial h = \sqrt{(\partial A/\partial x)^2 + (\partial A/\partial y)^2} \quad (2)$$

Turunan kemiringan menawarkan beberapa keuntungan dalam interpretasi anomali magnetik. Pertama, ketergantungan θ pada magnetisasi adalah sama pada turunan horisontal dan vertikal, sehingga benda-benda magnet yang lemah diperlakukan dengan beratnya sama dengan tubuh yang sangat magnetis. Kedua, θ memiliki bentuk yang sangat sederhana dan sederhana tubuh.

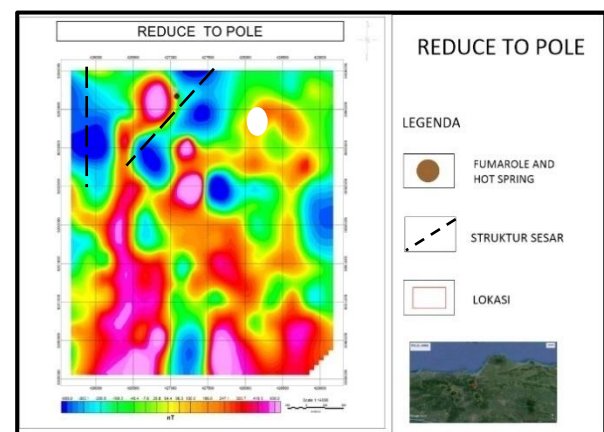
Selain menggunakan metode geomagnetik, dilakukan akuisisi menggunakan metode gravitasi. Metode gravitasi adalah salah satu metode geofisika yang didasarkan pada hukum Newton mengenai gravitasi. Sebagaimana diketahui, hukum gravitasi universal Newton menyatakan bahwa gaya tarik-menarik antara 2 benda berbanding lurus dengan kedua massa tersebut. dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar keduanya. Pengolahan metode ini dilakukan untuk mendapat nilai Complete Bouguer Anomaly / Anomali Bouguer Lengkap dengan melewati beberapa koreksi.

Anomali *Bouguer* lengkap merupakan perpaduan antara anomali regional dan anomali residual / lokal. Anomali regional menggambarkan kondisi geologi secara umum dari daerah penelitian yang dicirikan oleh anomali berfrekuensi rendah, sedangkan anomali residual / lokal lebih cenderung menggambarkan kondisi geologi setempat yang dicirikan dengan frekuensi tinggi. Nilai anomali *Bouguer* lengkap dapat diperoleh dari nilai anomali *Bouguer* sederhana yang telah terkoreksi

medan. Kemudian untuk memperjelas struktur daerah telitian dilakukan *filterTilt Derivative* pada peta Anomali *Bouguer* lengkap. Selanjutnya dilakukan survey geologi untuk meninjau respon dari data geomagnet dan gravity yang telah didapat.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Magnetik



Gambar 1. Peta *Reduce to Pole*

Gambar diatas merupakan gambar peta magnetic yang telah ditransformasikan menjadi satu kutub (*monopole*) menggunakan *filterReduce to Pole*.

Peta *Reduce to Pole* diatas memiliki variasi nilai dari -669,9 sampai 600 nT. Berdasarkan peta diatas dapat diketahui persebaran nilai magnetism yang tinggi, sedang dan rendah berdasarkan responnya yang dapat dikelompokkan dari kenampakan warnanya. Peta diatas dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu daerah dengan nilai respon magnetic itnggai berkisar 333,7 samapa 600 nT yang digambarkan dengan warna merah hingga merah muda. Lalu daerah dengan nilai respon magnetic yang sedang dengan nilai berkisar -109,3 samapi 333,7 nT yang digambarkan denagn warna hijau hingga oranye. Lalu daerah dengan nilai respon

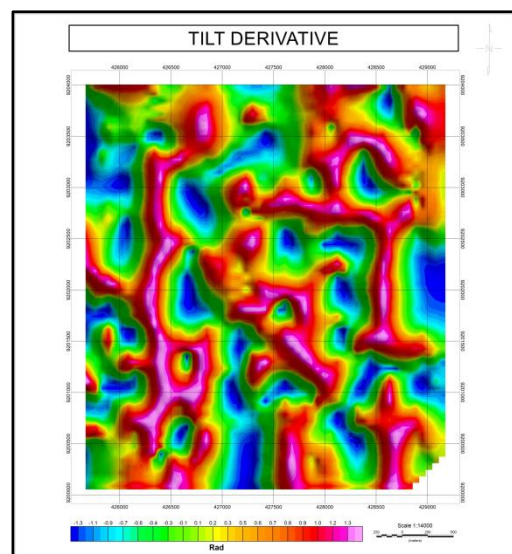
magnetik rendah dengan nilai berkisar -669,9 sampai -109,3 nT.

Berdasarkan Peta Geologi Permukaan Komplek G. Ungaran dari Thanden, dkk tahun 1996 dalam Indarto, et al., 2006, daerah sisi selatan daerah telitian tersusun oleh Formasi Kaligetas (breksi vulkanik, aliran lava, tufa, batupasir tufaan, dan batulempung), bagian tengah telitian tersusun oleh Batuan vulkanik Gajahmungkur (aliran lava andesit), dan daerah sisi utara tersusun oleh Lava Ungaran (lahar andesitik dan aliran vulkanik muda). Lalu struktur yang berkembang di daerah telitian merupakan sesar geser yang mempunyai arah utara – selatan melalui sungai Item ditandai dengan munculnya mataair panas, uap panas dan *fumarole* ke permukaan (Indarto, et al., 2006).

Respon magnetic tinggi yang dilingkari hitam pada bagian utara dapat diindikasikan sebagai Lava Ungaran (lahar andesitik dan aliran vulkanik muda). Lalu respon kemagnetan yang sedang diduga merupakan Batuan vulkanik Gajah mungkur (aliran lava andesit). Batuan vulkanik tersebut memiliki banyak kandungan mineral bersifat paramagnetic

Daerah yang ditandai dengan lingkaran putih merupakan daerah manifestasi berupa *fumarole* dan *hot spring* yang diindikasikan sebagai zona *outflow*. Lalu garis hitam putus-putus menunjukkan indikasi adanya patahan pada area tersebut. Hal ini menyebabkan daerah di sekitarnya menunjukkan respon magnetic yang rendah. Penurunan nilai kemagnetan batuan pada zona tersebut terjadi karena pengaruh panas pada alterasi hidrotermal sistem panas bumi daerah telitian yang dapat diduga dipengaruhi oleh adanya *Heat Source* yang kemudian menghantarkan

panas secara konduktif melalui batuan permeable disekitarnya. Kemudian, mengakibatkan terjadinya arus konveksi pada fluida hydrothermal pada pori-pori batuan. Selanjutnya fluida hydrothermal bergerak ke atas kemudian terakumulasinya pada *reservoir* panasbumi. Selanjutnya, fluida yang telah terpanaskan tersebut kan mencari rekahan atau zona permeabel untuk dapat melolokan fluida hingga ke permukaan. Zona permeable tersebut merupakan struktur sesar yang menjadi pengontrol adanya system panas bumi daerah telitian. Hingga terdapat kenampakan zona *upflow* berupa *fumarole* dan *hotspring* yang terlihat di lapangan. Selain itu nilai kemagnetan yang rendah juga dapat diindikasikan sebagai batuan yang telah teralterasi..



Gambar 2. Peta Tilt Derivative

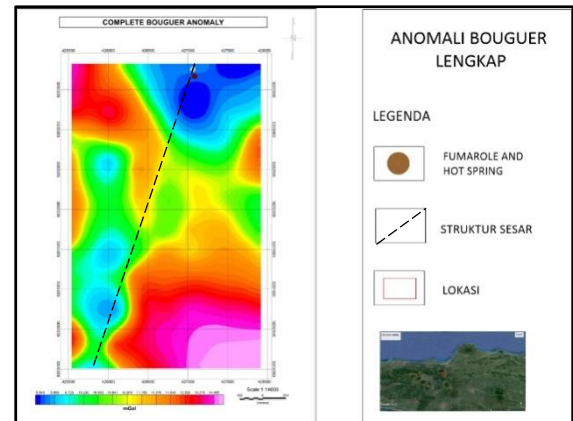
Peta *Tilt Derivative* merupakan salah satu *filter* dalam metode geomagnetic yang digunakan untuk memperjelas struktur daerah telitian yang dibuat berdasarkan peta *Reduce to Pole*. Pada peta *Tilt Derivative* dapat diinterpretasikan bahwa Fase 0 dimana pada peta diatas ditunjukkan oleh warna hijau kekuningan menggambarkan batas struktur.

Berdasarkan peta diatas ddapat diketahui bahwa struktur daerah telitian mayoritas berarah utara – selatan. Hal ini sesuai dengan tinjauan geologi daerah tersebut, diman struktur yang berkembang di daerah telitian merupakan sesar geser yang mempunyai arah utara – selatan melalui sungai Item ditandai dengan munculnya mataair panas, uap panas dan *fumarole* ke permukaan (Indarto, et al., 2006).

Berdasarkan analisa struktur pada peta *Tilt Derivative* dapat diidentifikasi bahwa struktur yang berkembang pada daerah telitian merupakan pengontrol system panas bumi tersebut. Struktur tersebut menjadi jalur keluarnya fluida hydrothermal ke permukaan yang menandakan bahwa daerah terseb berada di sekitar *reservoir* panas bumi daerah penelitian sehingga terlihat kenampakan manifestasi berupa *fumarole* maupun *hotspring*. Selain itu strutur tersebut juga membentuk alterasi. Aktifitas fumarol yang berada di daerah Gedongsongo mempunyai temperatur antara 70 – 90 °C dan pH 3,5 (asam). Mineral ubahan hidrotermal menunjukkan mineral jenis kaolinit, penciri mineral asam yang terbentuk pada zona argilik. Munculnya fumarol dan belerang mengindikasikan daerah Gedongsongo merupakan daerah *upflow* dari sistem panas bumi Ungaran (Rezky, et al 2012).

3.2. Gravity

Survei gravitasi dalam eksplorasi panas bumi digunakan untuk menentukan variasi kepadatan lateral yang terkait dengan kedalaman tubuh magmatik, yang mungkin mewakili sumber panas. Anomali ini dapat diciptakan oleh derajat diferensiasi magma yang berbeda atau variasi kedalaman antarmuka kerak-mantel yang menciptakan variasi kedalaman isotherm (Ismail, 2016).

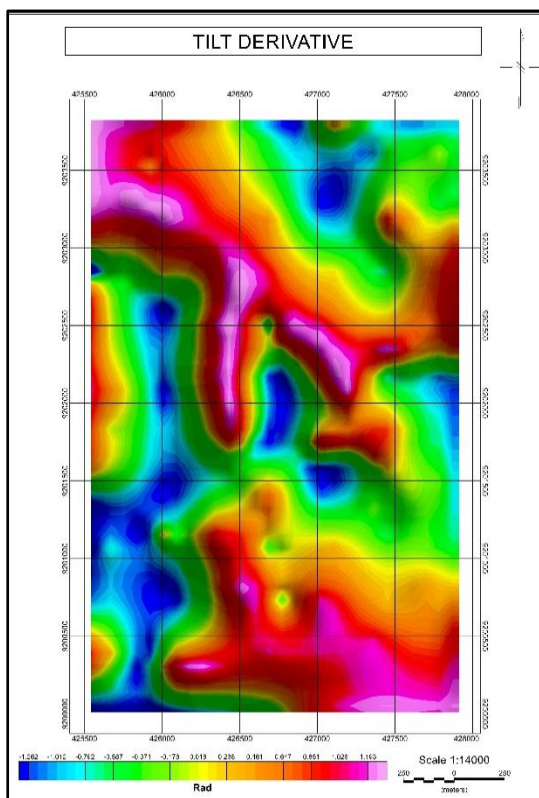


Gambar 3. Peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA)

Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL) diatas merupakan hasil koreksi dari nilai Anomali Bouguer Sederhana (ABS) yang telah dikoreksi terhadap topografi pada daerah telitian dengan koordinat X 425500 Y 9200000 – X 428000 Y 9203500. Rentang nilai ABL yang didapatkan dari hasil perhitungan yaitu 6,543 mGal – 14,485 mGal. Persebaran nilai relatif tinggi pada rentang 11 mGal- 14,485 mGal memanjang dengan arah Barat Laut-Tenggara namun terpotong dibagian tengah oleh nilai anomali yang lebih rendah pada rentang 10 mGal - 11 mGal. Sedangkan daerah dengan nilai anomali paling rendah berada pada sisi Timur Laut dengan rentang nilai 6,543 mGal – 10 mGal.

Berdasarkan Peta Geologi Permukaan Komplek G. Ungaran dari Thanden, dkk tahun 1996 dalam Indarto, et al., 2006 menyatakan bahwa daerah sisi selatan daerah telitian tersusun oleh Formasi Kaligetas (breksi vulkanik, aliran lava,tufa, batupasir tufaan, dan batulempung), sedangkan daerah tengah telitian tersusun oleh Batuan vulkanik Gajahmungkur (aliran lava andesit), dan daerah sisi utaratersusun oleh Lava Ungaran (lahar andesitik dan aliran vulkanik muda). Serta terdapat sesar geser yang mempunyai arah utara – selatan melalui sungai Item ditandai

dengan munculnya mataair panas, uap panas dan *fumarole* ke permukaan (Indarto, et al., 2006). Melihat dari respon anomali gravitasinya daerah utara yang tersusun oleh Lava Ungaran memiliki nilai gravitasi rendah, hal ini memungkinkan bahwa daerah ini telah terdeformasi kuat sehingga densitasnya menjadi lebih kecil akibat sesar geser dengan arah utara selatan yang ternyata juga melewati titik kemunculan mata air panas di Kali Item Gedongsongo.



Gambar 4. Peta *Tilt Derivative*

Untuk memperlihatkan respon gravitasi terhadap strukturnya dilakukan *filtering TDR (Tilt Derivative)* dari peta ABL. Hasilnya menunjukkan kelurusan lain yaitu dengan arah Barat Laut-Tenggara yang dimungkinkan berupa patahan yang telah terkubur. Keberadaan kedua sesar ini juga telah teridentifikasi dalam penelitian

Setyawan, et al., 2015 yang menyatakan bahwa sumber air panas Gedongsongo berkorelasi baik dengan anomali gradien horizontal yang tinggi yang ditafsirkan sebagai batas atau patahan. Ini menunjukkan bahwa manifestasi panas bumi Ungaran dikendalikan oleh struktur geologi tersebut. Sedangkan aktifitas fumarol yang berada di daerah Gedongsongo mempunyai temperatur antara 70 – 90 °C dan pH 3,5 (asam). Mineral ubahan hidrotermal menunjukkan mineral jenis kaolinit, penciri mineral asam yang terbentuk pada zona argilik. Munculnya fumarol dan belerang mengindikasikan daerah Gedongsongo merupakan daerah *upflow* dari sistem panas bumi Ungaran (Rezky, et al 2012). Yang mana daerah *upflow* merupakan daerah yang dekat dengan *reservoir* sistem panas bumi. Berdasarkan kemunculan *fumarole* pada daerah *upflow* yang dikontrol oleh struktur maka dapat diinterpretasikan bahwa zona porous dengan densitas rendah disekitaran patahan merupakan zona *reservoir* sistem panas bumi Gedongsongo yaitu daerah yang bernilai 10 mGal - 11 mGal pada peta ABL.

4. Kesimpulan

Zona lemah yang ditunjukkan berdasarkan respon magnetic dan gravitasi menunjukkan struktur yang mengontrol sistem panas bumi daerah telitian. Penurunan nilai kemagnetan batuan pada zona tersebut terjadi karena pengaruh panas pada alterasi hidrotermal. Hal tersebut diduga dipengaruhi oleh adanya *Heat Source* yang menghantarkan panas melalui batuan permeable, kemudian fluida hydrothermal bergerak ke atas kemudian terakumulasi pada *reservoir*, lalu keluar melalui rekahan (struktur sesar) hingga ke permukaan dan menunjukkan kenampakan

zona *upflow* berupa *fumarole* dan *hot spring*. Begitupun dengan respon gravitasi, diinterpretasikan bahwa zona porous dengan densitas rendah disekitaran patahan merupakan zona *reservoir* sistem panasbumi Gedongsongo.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada “Anomali” Teknik Geofika UPN “Veteran” Yogyakarta Angkatan 2014 atas data gravity dan magnetic hasil akuisisi kuliah lapangan 2 yang berlokasi di Gedongsongo, Ungaran.

Daftar Pustaka

Budiardjo, B., Nugroho dan Budihardi, M., 1997. *Resource characteristics of the Ungaran Field, Central Java, Indonesia*. Proceeding of National Seminar of Human Resources Indonesian Geologist, Yogyakarta. Cagniard, L., 1953, Basic Theory of The Magneto-telluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics* 18, 605-35.

Claproth, R., 1989, *Geologi Indonesia*, Majalah Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Vol. Khusus 60 th. Prof. Dr. J.A. Katili, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, 511-562.

Direktorat Panasbumi, Ditjen EBTKE. 2017. *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*. Jakarta : Direktorat Panas Bumi.

Gaffar, E.Z. et al. 2007. *Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan Ungaran, Jawa Tengah, dan Implikasinya Terhadap Struktur Panasbumi*. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.

Indarto, S. et al. 2006. *Studi Batuan Vulkanik dan Batuan Ubahan Pada Lapangan Panasbumi Gedongsongo Kompleks Gunungapi Ungaran Jawa Tengah*. Bandung : Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Riset-Geologi dan Pertambangan Jilid 16 No.1 Tahun 2006

Ismail, B.I. 2016. *Advances In Geothermal Energy*. Croatia: InTech

Hadisantono, R.D., dan Sumpena, A.D., 1993, Laporan Pemetaan Daerah Bahaya G. Ungaran dan Sekitarnya, Jawa Tengah, Proyek Pengamatan/Pengawasan dan Pemetaan Gunungapi, Dep. Pertambangan dan Energi, Dir. Jend. Geol. Sumberdaya Min., Dit. Volkanologi, Bandung, 26 hal.

Kim Phuong, Nguyen, et al. 2005. *Geochemistry of the Ungaran Geothermal System, Central Java, Indonesia*. Proceedings Joint Convention Surabaya 2005 – HAGI-IAGI- PERHAPI.

N. O. Mariita, (2010) ‘Strengths and Weaknesses of Gravity and Magnetics As Exploration Tools for Geothermal Energy’, in Short course V on an exploration of geothermal resources (UNU-GTP, GDC, and KenGen, Kenya, 2010), pp. 1–8.

Nguyen, S. Garambois, D. Jongmans, E. Pirard and M. H. Loke, *Journal of Applied Geophysics* 57, 260–277 (2005).

Rezky, Y. et al. 2012. *Sistem Panas Bumi Dan Model Konseptual Daerah Panas Bumi Gunung Ungaran, Jawa Tengah*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi

Setyawan, A. et al. 2015. *Horizontal Gradient Analysis for Gravity and Magnetik Data Beneath Gedongsongo Geothermal Manifestations, Ungaran, Indonesia*. Melbourne: World Geothermal Congress 2015

S. Widarto, D., Gaffar, Eddy Z., dan Wardhana, Dadan D., 2007, Studi Geofisika Terpadu di Lereng Selatan G. Ungaran, Jawa Tengah, dan Implikasinya Terhadap Struktur Panasbumi, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* Vol. 8 No.2 November 2007: 98 - 118.

Telford, W.M., 1990, *Applied Geophysics* Second Edition, Cambridge University Press: Cambridge.

Thanden, R.E., Sumadirdja, H., Richards, P.W., Sutisna, K., Amin, T.C., 1996, *Peta*

Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Jawa, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

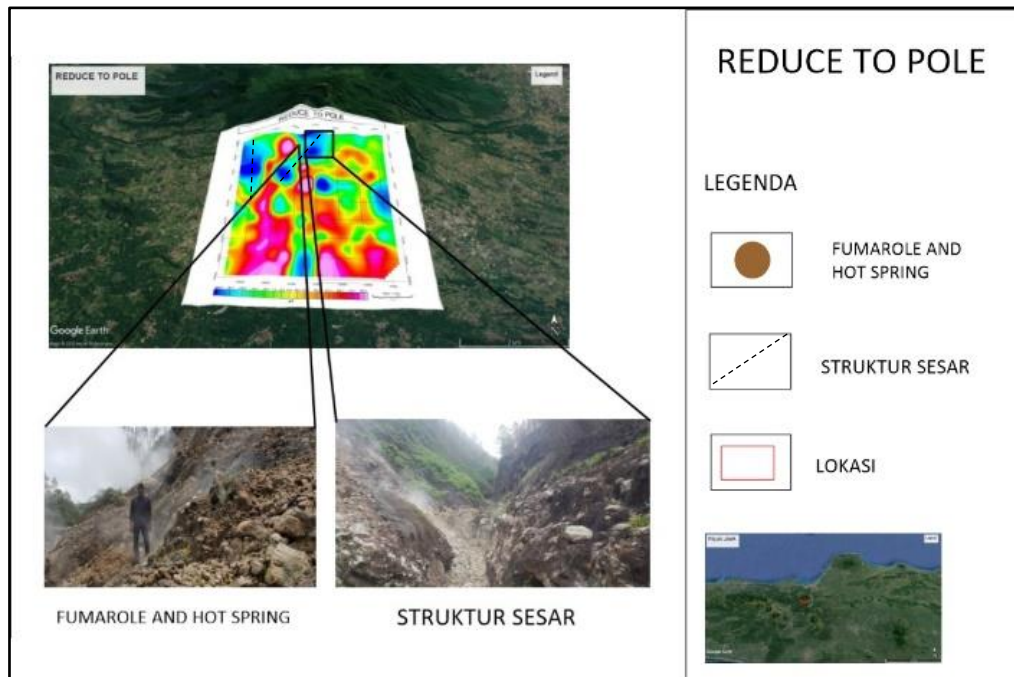
Van Bemmelen, R.W., 1941, *Bulletin of the East Indian Volcanological Survey for the Year 1941*, Bull. nrs.95-98.

Van Bemmelen, R.W., 1949, *The Geology of Indonesia, vol. I-A General Geology*, Government Print. Office, The Hague Netherland.

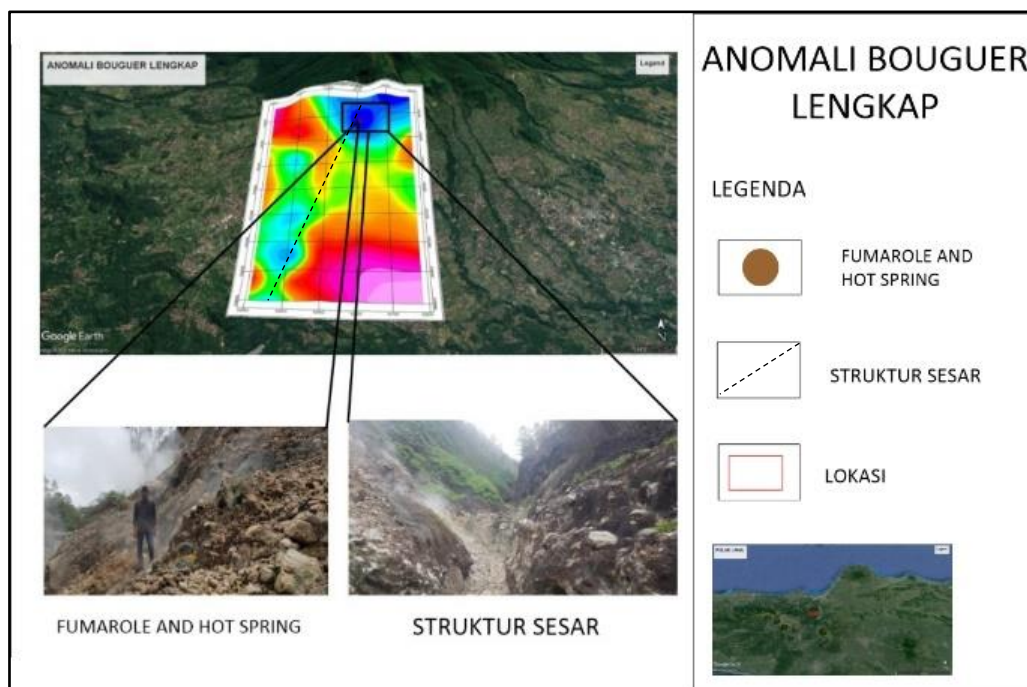
Van Padang, N., 1951, *Catalogue of the active volcanoes of the world including solfatara fields*, Part I Indonesia.

Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C. (2004) *New Insights into Magnetic Derivatives for Structural Mapping*. *The Leading Edge*, 23, 116-119.

LAMPIRAN



Gambar 5. Overlay Peta *Reduce to Pole* dengan *GoOgle Earth* serta kenampakan manifestasi



Gambar 6. Overlay Peta *Anomali Bouguer Lengkap* dengan *Google Earth* serta kenampakan manifestasi

Geo-Edu Space untuk Pengembangan Geowisata Tebing Breksi sebagai Sarana Memasyarakatkan Edukasi Ilmu Kebumian

Muhammad Iqbal¹, Hayyun Nadia² dan Adji Saiddinullah³

^{1,2}Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

³Pembangunan Wilayah, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

* muhammadiqbalpandega@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Daerah Istimewa Yogyakarta tidak hanya istimewa secara adat, budaya, dan sejarah, tetapi juga istimewa dari sudut pandang geomorfologis. Kompleksitas secara geomorfologis tersebut telah meninggalkan berbagai fenomena bentangalam yang unik, yang memiliki kekuatan potensi untuk dikembangkan sebagai *geosite* untuk wisata alam atau geowisata dalam skala nasional maupun internasional. Salah satu objek wisata alam yang telah berkembang dan banyak dikunjungi wisatawan domestik maupun mancanegara adalah Geowisata Tebing Breksi di Desa Sambirejo, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman. Tebing Breksi pada mulanya merupakan lokasi aktivitas penambangan batu oleh masyarakat sekitar. Namun, setelah dilakukannya penelitian gabungan dari Institut Teknologi Bandung (ITB) dan Universitas Pembangunan Nasional (UPN) Veteran Yogyakarta, yang menyatakan bahwa Tebing Breksi adalah salah satu bukti endapan batuan tuffan gunung api purba yang langka, maka aktivitas penambangan dihentikan pada tahun 2015, yang selanjutnya Tebing Breksi dijadikan sebagai salah satu *Geoheritage* Yogyakarta untuk kepentingan edukasi. Semenjak statusnya berubah menjadi *geoheritage*, sampai saat ini Tebing Breksi belum mampu memfasilitasi wisatawan secara edukatif untuk mengenal sisi sejarah dan karakteristik geologis maupun geomorfologis Tebing Breksi, terbukti belum adanya sarana-prasarana penunjang edukasi geowisata bagi wisatawan. Sementara, Tebing Breksi hingga sampai saat ini hanya dimanfaatkan sebatas untuk berfoto *selfie* yang *instagrammable*. Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis mencoba mengangkat tema “Geo-Edu Space Tebing Breksi” sebagai salah satu *spot* dan *space* pusat edukasi Geowisata di sisi timur Yogyakarta. *Geo-Edu Space* Tebing Breksi dirancang untuk dapat menyampaikan informasi khusus seputar Tebing Breksi, mulai dari genesis atau sejarah pembentukan secara geotektonis atau paleogeomorfologis hingga karakteristik fenomena bentang alamnya kepada wisatawan dengan teknologi *Virtual Reality (VR)* dan *Augmented Reality (AR)* yang menarik dan mudah dipahami oleh masyarakat awam. Metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode survei melalui pengamatan dan pengukuran lapangan maupun wawancara terhadap berbagai stakeholder, baik akademisi, peneliti, pengelola Geowisata Tebing Breksi, dan para wisatawan. Selain itu juga diperkuat melalui analisis data sekunder hasil-hasil penelitian ilmiah terdahulu. Harapannya *Geo-Edu Space* Tebing Breksi dapat menjadi salah satu media untuk memasyarakatkan edukasi ilmu kebumian sebagai bagian dari upaya promosi dan pengembangan Geowisata Keistimewaan Yogyakarta dari sudut pandang bentang alam geomorfologi kepada wisatawan khususnya dan masyarakat pada umumnya.

Kata Kunci : *Augmented Reality, Geo-Edu Space, Geowisata, Tebing Breksi, Virtual Reality*

1. Pendahuluan

Daerah Istimewa Yogyakarta dikenal sebagai provinsi yang istimewa dari segi adat, sistem pemerintahan, sejarah dan budaya masyarakatnya, sekaligus dikenal sebagai pusat pendidikan, dikarenakan salah satu universitas terbaik di Indonesia yaitu Universitas Gadjah Mada berasal dari Provinsi ini. Namun, tidak banyak diketahui oleh orang awam bahwa dibalik keistimewaan sejarah dan budayanya,

Yogyakarta istimewa secara penciptaan alamnya. Jika dilihat dari perspektif geomorfologi, berdasarkan aspek genesis pembentukan bentanglahan, dari 10 macam bentanglahan yang ada di dunia menurut Verstappen (1983), faktanya Yogyakarta memiliki 9 macam diantaranya. Kesembilan macam bentanglahan tersebut adalah bentang lahan asal proses fluvial DAS pada lahan bawahan di Bantul dan Kulonprogo; bentanglahan vulkanik Gunung Merapi di Sleman; bentanglahan

asal proses marin berupa fenomena gelombang laut di pesisir Gunungkidul; bentanglahan proses solusional berupa Perbukitan Karst Gunungsewu; bentanglahan proses aeolian (aktivitas angin) berupa gump pasir (*sand dunes*) di Parangtritis, yang merupakan satu-satunya di Asia Tenggara; bentanglahan proses denudasional berupa Perbukitan Menoreh di Kulonprogo; bentanglahan proses organik berupa pantai terumbu karang di Gunungkidul; bentanglahan asal proses antropogenik sebagai bentuk hasil buatan manusia khususnya wilayah perkotaan Yogyakarta dan sekitarnya; bentanglahan proses struktural berupa Perbukitan Baturagung di perbatasan antara Bantul dengan Gunungkidul. Ternyata hanya satu jenis bentanglahan yang tidak ditemukan di Yogyakarta yaitu bentanglahan asal proses glasial, yang di Indonesia hanya terdapat di Puncak Jaya Wijaya, Papua. Hal ini menambah keistimewaan Yogyakarta dari sudut pandang geomorfologi dan ilmu kebumiharian. Perpaduan antara keistimewaan budaya dengan bentuk fisiknya menjadikan Yogyakarta memiliki banyak sekali destinasi wisata andalan (Sentosa, 2015).

Salah satu destinasi wisata andalan Provinsi DI Yogyakarta adalah Geowisata Tebing Breksi yang berlokasi di Desa Sambirejo, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman. Tebing Breksi adalah salah satu contoh langka objek wisata hasil perpaduan antara proses alamiah dengan campur tangan manusia yang menyimpan daya tarik berupa bukti geologis dan geomorfologis serta bekas campur tangan

manusia berupa penambangan batu yang telah meninggalkan hasil ukiran yang memiliki daya tarik tersendiri. Hal ini berkaitan dengan sejarah Tebing Breksi yang awalnya dimanfaatkan sebagai lokasi tambang batu oleh warga setempat, sampai akhirnya pada tahun 2015 aktivitas penambangan batu dihentikan oleh pemerintah serta menetapkan Tebing Breksi sebagai *geoheritage* Provinsi DI Yogyakarta. Seiring waktu, Tebing Breksi tumbuh dan berkembang sebagai kawasan tujuan wisata yang kompetitif dan mempunyai peran strategis dalam pengembangan kepariwisataan Yogyakarta. Menurut Data Statistik Kepariwisata Provinsi DI Yogyakarta Tahun 2018, terdapat kunjungan total sebanyak 1.102.043 wisatawan dengan pembagian 4.493 wisatawan asing dan 1.097.550 wisatawan lokal (Tabel 1). Hal ini tentunya amat berpengaruh terhadap banyak sektor khususnya ekonomi masyarakat setempat, yang mulanya berprofesi sebagai penambang batu berubah menjadi pengelola wisata.

Salah satu alasan kuat penetapan Tebing Breksi sebagai *geoheritage* adalah karena hasil temuan penelitian kolaborasi antara peneliti dari ITB dan UPN Veteran Yogyakarta serta peneliti dari instansi lainnya yang menyatakan bahwa Tebing Breksi adalah bukti peninggalan Gunung Api Purba Semilir dan Gunung Api Purba Ngalanggeran berupa endapan batuan tuffan yang amat langka (UPN, 2018).

Tabel 1. Data Jumlah Pengunjung Sebagian Objek Wisata DI Yogyakarta 2018

No	Obyek Wisata	Wisatawan	Tahun 2018												Jumlah
			Jan	Peb	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agust	Sept	Okt	Nop	Des	
SLEMAN															
8	Tebing Breksi	Wisman	173	54	117	186	124	86	207	456	361	235	119	2.375	4.493
		Wisnus	84.324	64.879	80.498	116.903	92.263	125.577	85.402	58.697	75.352	116.888	42.976	153.791	1.097.550
		Jumlah	84.497	64.933	80.615	117.089	92.387	125.663	85.609	59.153	75.713	117.123	43.095	156.166	1.102.043
9	Blue Lagoon	Wisman	40	36	41	39	32	40	70	80	50	73	35	53	589
		Wisnus	5.640	5.206	6.244	10.486	5.660	1.770	5.137	4.975	5.038	7.786	3.696	10.102	71.740
		Jumlah	5.680	5.242	6.285	10.525	5.692	1.810	5.207	5.055	5.088	7.859	3.731	10.155	72.329
10	Lava Bantal	Wisman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Wisnus	1.200	1.500	1.000	1.500	100	9.800	400	4.500	1.500	1.000	1.500	2.500	26.500
		Jumlah	1.200	1.500	1.000	1.500	100	9.800	400	4.500	1.500	1.000	1.500	2.500	26.500
11	Bukit Teletubbies	Wisman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Wisnus	3.779	2.330	2.601	2.534	2.198	3.900	2.340	2.375	2.401	1.623	1.773	4.405	32.259
		Jumlah	3.779	2.330	2.601	2.534	2.198	3.900	2.340	2.375	2.401	1.623	1.773	4.405	32.259
12	Eksotika Krasak Jolontoro	Wisman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Wisnus	627	350	596	158	0	0	0	0	0	0	0	0	1.731
		Jumlah	627	350	596	158	0	0	0	0	0	0	0	0	1.731
13	Jogja Bay	Wisman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Wisnus	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	30.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	25.000	205.000
		Jumlah	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	30.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	25.000	205.000
14	Sindu Kusuma Edupark	Wisman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Wisnus	20.054	14.191	19.540	13.877	15.323	23.218	16.387	9.636	4.754	4.361	4.017	19.925	165.283
		Jumlah	20.054	14.191	19.540	13.877	15.323	23.218	16.387	9.636	4.754	4.361	4.017	19.925	165.283

Sumber: Statistik Kepariwisata DI Yogyakarta Tahun 2018

Sejak Tebing Breksi dimasukkan dalam daftar situs warisan geologi/*geoheritage*. Artinya tebing bekas lahan tambang ini merupakan situs atau area geologi yang memiliki nilai-nilai penting di bidang keilmuan, pendidikan, budaya, dan nilai estetika. Namun sampai saat ini kebanyakan nilai-nilai penting tersebut belum dapat dimasyarakatkan secara baik. Di sisi lain hanya nilai estetika sajalah yang menjadi nilai jual Tebing Breksi berupa *spot* foto bagi wisatawan yang *instagrammable*. Hal ini terbukti dari belum adanya sarana penunjang guna meningkatkan nilai-nilai positif lain dari warisan geologi Tebing Breksi khususnya edukasi. Rendahnya nilai edukasi meliputi wisatawan maupun masyarakat pengelola, bahkan dalam penamaan tempat wisata yang dinamai “Tebing Breksi” pun banyak mendapat kritik dari sebagian peneliti dan akademisi. Hal ini dikarenakan berdasarkan hasil penelitian secara ilmiah, batuan tuffan (endapan abu vulkanik) lah yang banyak ditemukan disana bukan batuan breksi, dan jika pun ingin menamai maka nama “Tebing Breksi-Tuff” lebih tepat digunakan ketimbang “Tebing Breksi”. Hal fatal inilah yang menjadikan perlu adanya usaha untuk

meningkatkan edukasi guna meluruskan banyak kekeliruan seputar Tebing Breksi serta memasyarakatkan ilmu kebumian secara luas kepada wisatawan khususnya dan masyarakat pada umumnya.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis menawarkan gagasan berupa Geo-Edu Space Tebing Breksi guna menjawab urgensi akan *spot* atau ruang penyedia informasi kebumian Tebing Breksi. Geo-Edu Space melibatkan teknologi mutakhir pada zaman ini yaitu teknologi *virtual reality* dan *augmented reality* dalam penyampaian informasi yang berkaitan dengan Tebing Breksi, khususnya dari sudut pandang ilmu kebumian, yang mana semua itu dikemas secara menarik sehingga dapat diterima oleh masyarakat awam. Tujuan utamanya yaitu menjadikan Tebing Breksi destinasi geowisata yang edukatif dan informatif. Selain itu, Geo-Edu Space juga diharapkan dapat menjadi pelopor wisata berkelanjutan yang menjunjung tinggi nilai-nilai konservasi serta mendorong upaya promosi Geowisata Tebing Breksi.

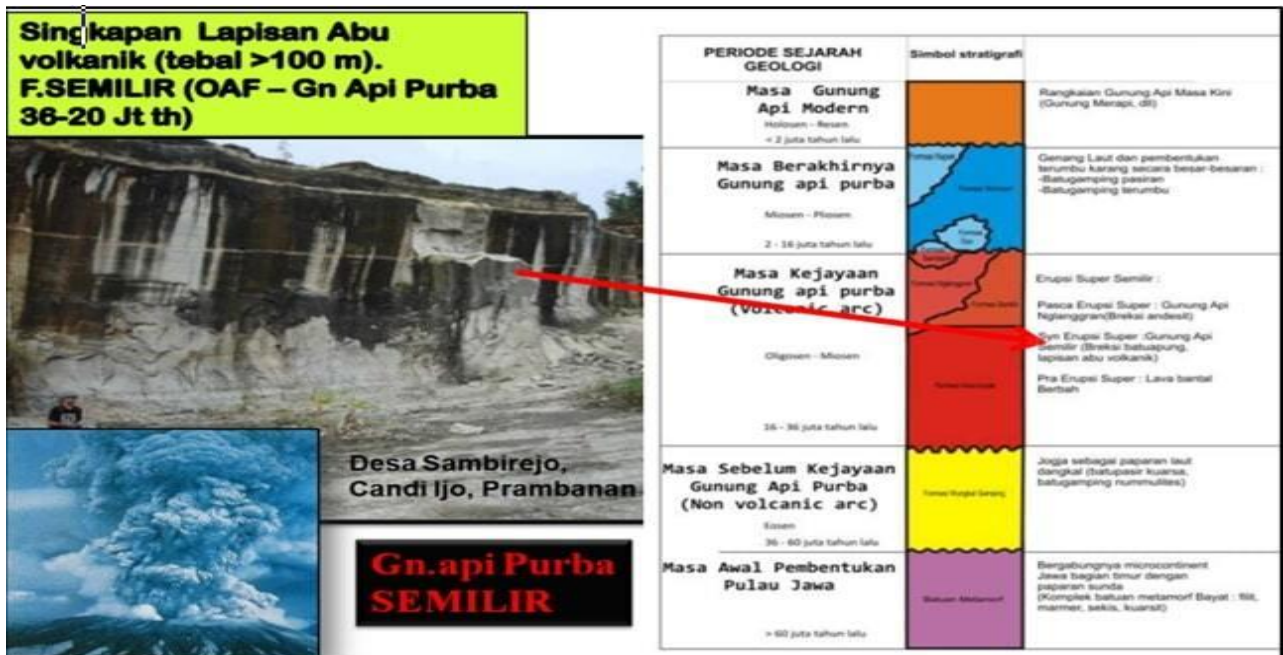
Geologi Regional Tebing Breksi

Secara geologis, Pulau Jawa merupakan penyatuan antara lempeng Paparan Sunda dan mikrokontinen Jawa Timur yang ditabrak dari arah selatan oleh lempeng Indo-Australia pada zona palung di selatan Pulau Jawa yang berarah Barat-Timur. Kejadian inilah yang menjadi alasan banyaknya ditemukan rangkaian pegunungan api yang tersebar di Selatan Pulau Jawa salah satunya adalah Gunung Api Purba Nglanggeran. Pada awalnya sebelum keberadaan Gunung Api Nglanggeran, sekitar Kala Oligo-Miosen 15 juta tahun yang lalu telah meletus Gunung Api Purba Semilir dengan letusan super eksplosif yang memuntahkan material abu vulkanik yang ketebalannya mencapai 300 meter. Sebaran abu vulkanik Gunung Api Semilir mencapai hingga ke Timur waduk Gajahmungkur, ke Selatan sampai Australia bagian Utara dan ke Barat sampai Johor Malaysia. Setelah letusan super eksplosif dari Gunung Api Semilir maka muncul gunung api baru di tengah kalderanya yang disebut Gunung Api Ngalanggeran, dimana formasi batuan disekitar gunung api purba ini disebut Formasi Semilir. Namun masa kejayaan Gunung Api Purba terus berlangsung selama Oligosen-Miosen Tengah sekitar 16-36 juta tahun lalu (UPN, 2018). Proses geologi tersebut menghasilkan warisan geologi/*geoheritage* yang menyimpan riwayat utuh berupa stratigrafi batuan yang dapat mewakili aktivitas geologi (volkanik) di masa lalu. Salah satunya adalah 9 *geoheritage* Yogyakarta yang telah mendapat SK dari pemerintah daerah (Tabel 2).

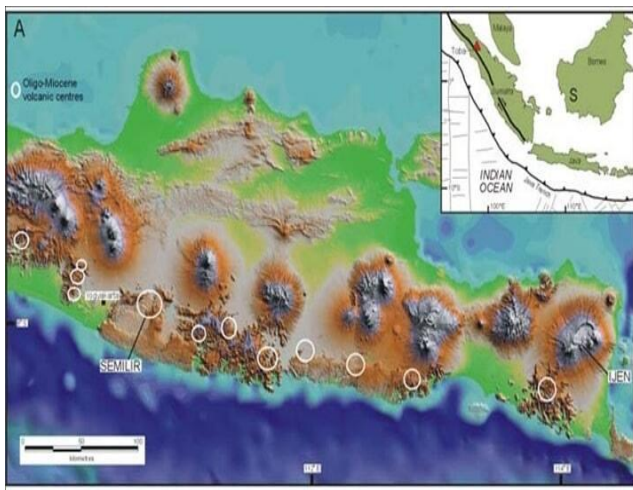
Tabel 2. Sembilan Situs Geoheritage DIY

No	Geoheritage	Lokasi
1.	Monumen Batu Gamping Eosen	Gamping Sleman.
2.	Tebing Breksi	Candi Ijo,Sleman.
3.	Goa Kiskenda	Jatimulyo,Girimulyo, Kulonprogo,
4.	Kawasan Bekas Penambangan Mangan	Kliripan,Kokap,Kulonpr-ogo.
5.	Gunungapi Purba Nglanggeran	Gedangsari,Gunungkidul
6.	Kawasan Pantai Wedi Ombo-Siung	Tepus Gunungkidul
7.	Situs Bioturbasi	Kali Ngalang, Gunungkidul
8.	Gumuk Pasir Parangtritis	Parangtritis, Kretek, Bantul.
9.	Lava Bantal Berbah	Sleman

Sumber: Papan Informasi Tebing Breksi



(A)



(B)



(C)

Gambar 1. (A) Stratigrafi Geowisata Tebing Breksi. (B) Peta Relief Jalur Gunung Api Purba (selatan) dan Modern (lebih utara) di Pulau Jawa. (C) Peta Situs *Geoheritage* DIY

Sumber : (Smyth, Hall, Hamilton, & Kinny, 2005)

Augmented Reality dan Virtual Reality

Perkembangan teknologi pada zaman sekarang sangat pesat. Salah satu teknologi yang berkembang saat ini adalah teknologi visualisasi yang biasa disebut sebagai *augmented reality* dan *visual reality*. *Augmented reality* merupakan bagian dari *virtual environment* yang memiliki kelebihan untuk menggabungkan objek virtual (teks, gambar, dan animasi) dengan memproyeksikannya ke dalam lingkungan nyata sehingga memungkinkan pengguna melihat gambaran objek virtual tersebut dalam bentuk tiga dimensi pada dunia nyata (RT Azuma, 1997). *Augmented Reality* telah menjadi pelopor dalam cara penyampaian informasi karena mengkombinasikan teks, gambar, video, model 3 dimensi, yang tidak dapat disampaikan melalui buku, maupun gambar multimedia 2 dimensi lainnya seperti video dan alat peraga (Marin-Diaz, 2017). Menurut Lee (2012) *augmented reality* sangat berpotensi dalam menarik, menginspirasi, dan memotivasi seseorang untuk mengeksplorasi dan melakukan pengontrolan dari berbagai perspektif yang berbeda. Sama halnya dengan Lee, Solak dan Cakir (2015) menyatakan bahwa *augmented reality* dapat mempengaruhi performa serta mendorong motivasi seseorang untuk belajar karena *augmented reality* menyajikan konten grafik yang dapat berinteraksi serta terlihat lebih nyata. Sementara itu, *visual reality* adalah salah satu teknologi yang memungkinkan pengguna untuk berinteraksi secara virtual dengan lingkungan yang disimulasikan oleh komputer (Sihite dkk, 2013). *Virtual reality* adalah sebuah teknologi yang dapat membuat penggunanya memasuki dan berinteraksi di lingkungan virtual (Gamberini dkk, 2015). Menurut Herlambang dan Aryoseto (2016), dengan sistem *virtual reality* ini pengguna dapat

melakukan suatu aktivitas berkali-kali tanpa perlu takut merusak objek karena hanya berupa ilusi visual. Hal ini menjadikan *virtual reality* dapat digunakan sebagai strategi pembelajaran alternatif yang menarik dan mudah dipahami (Arief dan Umniati, 2012). Selain itu, *virtual reality* juga dapat menjadi media pembelajaran yang mampu memotivasi setiap orang untuk aktif dan berkonsentrasi (Purwoko dalam Suryanto dan Kusumawati, 2017).

2. Metodologi Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

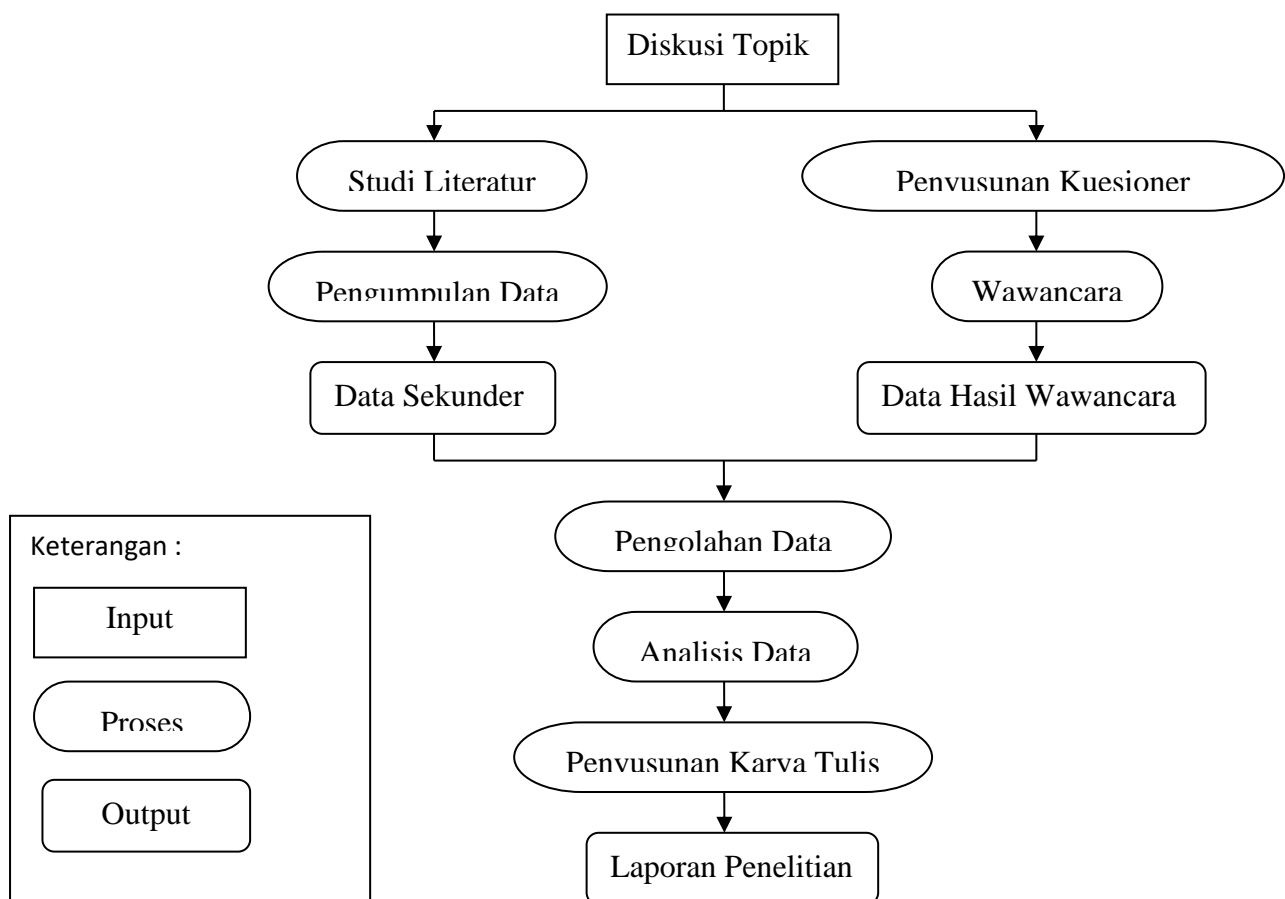
Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif yaitu berupa wawancara dan survei lapangan, Metode penelitian kuantitatif bertujuan untuk menjelaskan, meringkaskan berbagai kondisi, berbagai situasi dan variabel yang menjadi objek penelitian berdasarkan apa yang terjadi (Bungin, 2005: 44). Pada penelitian kuantitatif ini, peneliti juga menyajikan hasil penelitian dengan angka. Data tersebut berasal dari hasil wawancara dan data sekunder. Berdasarkan fokus penelitian dan pengumpulan data-data yang telah diambil, peneliti menggunakan metode kuantitatif deskriptif. Penelitian kuantitatif merupakan penelitian dengan cara wawancara atau tanya jawab antara peneliti dan informan sebagai narasumber, sehingga mampu memperoleh informasi secara langsung. Peneliti melakukan wawancara dengan pihak terkait dalam pengembangan objek wisata taman tebing breksi di Desa Sambirejo. Subyek penelitian diantaranya yaitu: masyarakat sekitar objek wisata, pengelola objek wisata, akademisi, peneliti dan pengunjung (wisatawan). Selain itu, metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah

analisis deskriptif, analisis evaluatif dan analisis pengembangan.

1. Analisis deskriptif digunakan untuk menjelaskan mengenai karakteristik Geowisata Tebing Breksi yang disajikan dalam bentuk tabel dan dokumentasi serta deskripsi mendalam terkait kondisi fisik maupun sosialnya.

2. Analisis evaluatif dengan menggunakan analisis kebijakan untuk membandingkan antara kebijakan yang berlaku dengan kondisi eksisting, hal ini dapat diwakili dari dokumentasi Tebing Breksi di masa lalu dan masa kini.
3. Analisis pengembangan menggunakan analisis akar masalah dan strategi yang akan ditempuh berupa usulan Geo-Edu Space Tebing Breksi.

2.2 Desain Penelitian



3. Hasil dan Pembahasan

Deskripsi Wilayah

Tebing Breksi merupakan tempat wisata yang berada di wilayah Kabupaten Sleman. Lokasi wisata Tebing Breksi tepatnya berada di Desa Sambirejo, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kawasan itu juga berdekatan dengan objek wisata Candi Prambanan, Keraton Ratu Boko, Candi Kalasan, Candi Ijo, Candi Banyunibo dan Candi Barong. Desa Sambirejo memiliki ketinggian 150,00 mdpl dari permukaan laut, curah hujan 2.000,00 mm, suhu rata-rata harian 27,00 °C, dan kelembaban 80,00%. Luas wilayah Desa Sambirejo menurut penggunaan lahan adalah 541,58 Ha yang terdiri dari luas pemukiman 37,50 Ha, luas pesawahan 173,00 Ha, luas ladang 378,65 Ha, luas pekarangan 239,85 Ha, luas kuburan 0,45 Ha, luas perkantoran 0,25, dan luas prasarana umum lainnya 90,53 Ha. Desa Sambirejo terdiri dari 8 Dusun yaitu Dusun Dawangsari, Gedang, Gunung Cilik, Gunung Sari, Kikis, Mlakan, Nglengkong, dan Sumberwatu.

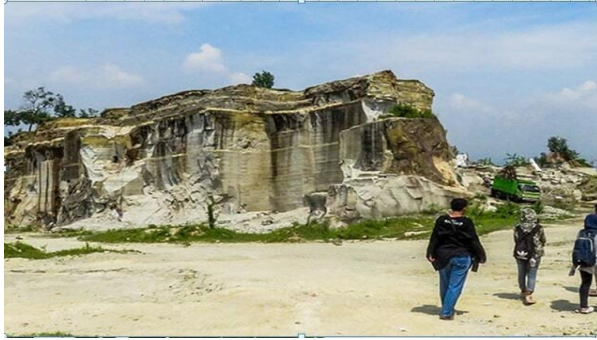
Deskripsi Komparatif

Penduduk Desa Sambirejo pada bulan Desember 2015 berjumlah 2089 Kepala Keluarga dengan komposisi jumlah penduduk laki-laki adalah 2817 orang sedangkan jumlah penduduk perempuan berjumlah 2820 orang. Sedangkan menurut Data Jumlah Penduduk tahun 2019 terdapat 2518 Kepala Keluarga dengan komposisi jumlah penduduk laki-laki adalah 3900 orang dan penduduk perempuan sebanyak 3823 orang. Mata pencaharian penduduk Desa Sambirejo mengalami perubahan signifikan yang

sebelumnya berprofesi sebagai penambang batu, saat ini beralih profesi menjadi pengelola Geowisata Tebing Breksi ataupun sebagai pedagang. Pendapatan rata-rata masyarakat pun meningkat tajam. Jika awalnya hanya mendapat sekian ratus ribu saat menambang batu saat ini pendapatan total Geowisata Tebing Breksi bahkan mencapai angka 7 miliar. Hal itu tidak mengherankan dikarenakan jumlah kunjungan yang rata-rata sebanyak 1000an wisatawan di hari biasa dan dapat mencapai 10.000an lebih di hari libur semisal hari raya. (Tabel 3).

Tabel 3. Komponen Manfaat Tebing Breksi

Komponen Manfaat (per tahun)		
No	Jenis Manfaat	Nilai (Rp)
1	Parkir	720.000.000
2	Tiket Turis Domestik	3.840.000.000
3	Tiket Turis Mancanegara	240.000.000
4	Toilet	205.000.000
5	Sewa Kios	1.200.000
6	Jeep Offroad	2.700.000.000
Total		7.706.200.000



Gambar 2. Pemandangan Tebing Breksi Agustus 2016 (atas). Pemandangan Tebing Breksi Februari 2019 (bawah).

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Perubahan juga terjadi dari segi objek wisata yang menjadi daya tarik utama, dimana pengelola berusaha untuk selalu menambah atau memperbaiki objek wisata agar wisatawan tidak bosan, diantara objek wisata andalan yaitu Amphiteater Tlatar Seneng, spot foto diberbagai tempat, embung dan fasilitas sewa mobil jip. Selain itu fasilitas juga semakin lengkap dibanding beberapa tahun terakhir semisal lahan parkir, mushola, restoran atau tempat makan, *home stay* dan dua buah papan informasi (Gambar 3). Papan informasi sendiri terdiri atas satu papan berisi informasi berupa peta objek wisata dan satunya lagi adalah papan informasi yang ada sedikit menyinggung sisi keilmuan dari Tebing Breksi. Namun, hal ini masih sangat minim mengingat tempat wisata memiliki luas 6-7 hektar, namun hanya memiliki satu papan informasi. Sebenarnya pengelola telah menyediakan fasilitas ruang khusus yang menyimpan informasi terkait Tebing Breksi, namun akibat keterbatasan sumber

daya manusia maka ruangan ini hanya di buka dari hari Senin sampai Kamis sedangkan hari libur atau hari Sabtu dan Minggu ruangan ini tidak beroperasi atau tutup. Pengelola wisata juga memberikan informasi bahwa tidak banyak wisatawan yang tertarik memasuki ruangan khusus tersebut, biasanya hanya berasal dari pihak-pihak yang butuh informasi terkait Tebing Breksi semisal mahasiswa. Indikasi lain yang menunjukkan rendahnya edukasi khususnya terkait ilmu kebumian terlihat dari ketidaktahuan wisatawan terhadap arti “breksi”, dari seluruh responden (wisatawan) tidak satupun yang mengetahui arti dari breksi, malahan ada beranggapan sangat keliru semisal mengartikan breksi sebagai “BREXIT” atau peristiwa keluarnya Negara Inggris dari Uni-Eropa. Oleh karena itu amat perlu inovasi dalam mendukung masyarakat maupun wisatawan dalam hal ilmu kebumian. Salah satu solusi masalah minimnya edukasi di Geowisata Tebing Breksi yaitu berupa inovasi ruangan/spot penyedia informasi yang melibatkan teknologi-teknologi mutakhir semisal *virtual reality* dan *augmented reality* dalam memberikan edukasi dengan cara yang lebih mudah ditangkap masyarakat awam.



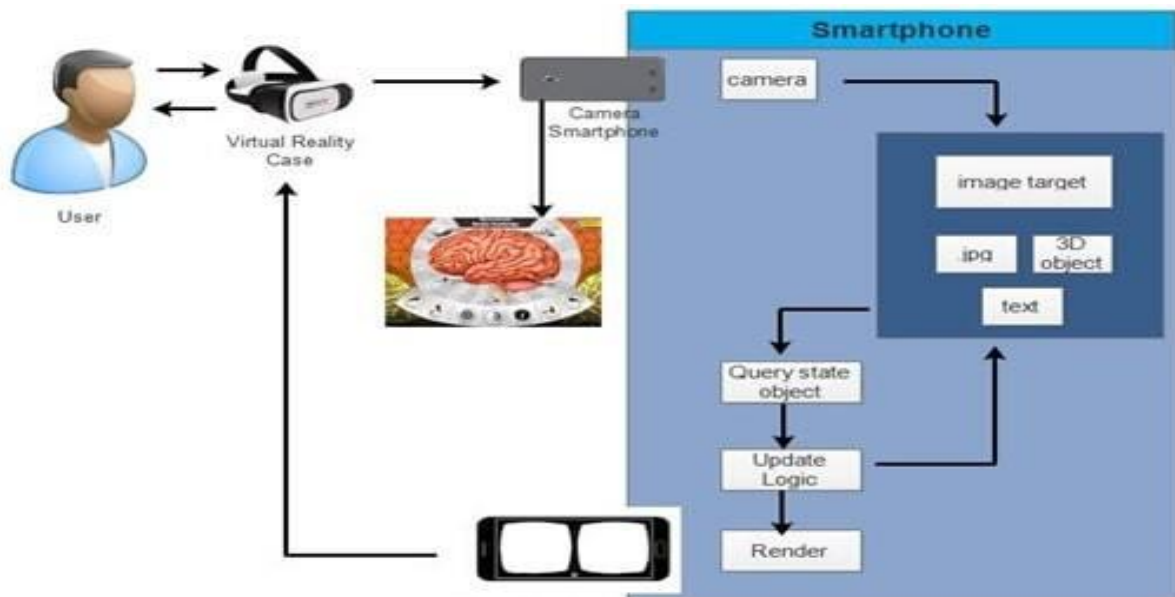


Gambar 3. (A) Spot Foto di puncak Tebing. (B) Tlatar Seneng. (C) Lahan Parkir. (D) Satu-satunya papan informasi terkait sisi keilmuan Tebing Breksi.
Sumber : Dokumentasi Pribadi

Geo-Edu Space Tebing Breksi

Tebing Breksi memiliki nilai edukasi yang sangat penting terhadap perkembangan ilmu kebumihan. Akan tetapi,

di kawasan Tebing Breksi sendiri belum ada media atau fasilitas yang mampu menyampaikan nilai-nilai edukasi tersebut kepada para wisatawan. *Geo-Edu Space* Tebing Breksi dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan tersebut. *Geo-Edu Space* Tebing Breksi merupakan sebuah ruangan edukasi yang dilengkapi dengan penggabungan teknologi *virtual reality* dan *augmented reality* atau biasa disebut sebagai teknologi *mixed reality*. Menurut Tsramirsis dkk. (2015), *mixed reality* adalah teknologi yang memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan dunia nyata dan juga mengerti berbagai objek yang ada di lingkungan sekitar sehingga memungkinkan juga untuk dapat meningkatkan kualitas objek melalui peningkatan grafik komputer. Dalam pengaplikasiannya pada Tebing Breksi, harapannya teknologi ini mampu efektif dalam menyampaikan nilai edukasi Tebing Breksi. Model sistem usulan *Geo-Edu Space* Tebing Breksi dengan memanfaatkan teknologi *mixed reality* dapat di lihat pada kerangka konseptual aplikasi.



Gambar 4. Model Sistem Usulan Teknologi *Mixed Reality* dalam *Geo-Edu Space* Tebing Breksi
Sumber : Wahyudi dkk. 2018

Gambar 1 merupakan gambaran umum dari teknologi *mixed reality* dalam *Geo-Edu Space* Tebing Breksi. Pada gambar 1 menjelaskan tahap-tahap yang terjadi secara umum. Pada tahap awal, pengguna membuka aplikasi dan meletakkan *smartphone* ke *VR Case*. Kemudian *user* mengarahkan kamera ke *image target* untuk diproses oleh aplikasi. Selanjutnya, aplikasi akan melakukan *tracking* pada *image target* untuk menampilkan visualisasi genesis Tebing Breksi. Setelah itu aplikasi akan melakukan *rendering* serta menganalisa *image target* dengan tahapan-tahapan yaitu: 1) *Query state object*, berfungsi untuk mengenali target atau objek yang terbaca oleh marker; 2) *Update logic*, pada bagian ini proses pengecekan target dilakukan. Apabila *target* yang dibaca oleh *marker* sesuai dengan *logic code* maka akan dilanjutkan ke proses *render*, jika *target* tidak sesuai maka prosesnya akan membaca kembali *image target*; 3) *Render*, aplikasi menampilkan data yang sesuai dengan *tracking marker*. Setelah berhasil melewati tahapan tersebut, maka aplikasi akan menampilkan visualisasi genesis Tebing Breksi dari sudut pandang ilmu kebumihan.

4. Kesimpulan

Berkembang pesatnya Geowisata Tebing Breksi tak terlepas dari peran masyarakat setempat maupun kelompok karang taruna yang telah bertindak kooperatif dengan berbagai *stakeholder* seperti pemerintah, akademisi, maupun instansi lainnya. Hal ini terlihat dari fasilitas maupun objek wisata yang semakin beragam dan menarik. Namun di sisi lain terdapat berbagai tantangan yang sampai saat ini belum bisa dipenuhi oleh masyarakat pengelola maupun

stakeholder yaitu terkait nilai edukasi yang masih amat minim bagi tempat wisata sekelas Geowisata Tebing Breksi. Oleh karena itu, perlu untuk memprioritaskan sisi edukasi dari Tebing Breksi agar eksistensi dari tempat wisata ini tetap terjaga. Salah satu solusi yang penulis tawarkan adalah *Geo-Edu Space* Tebing Breksi yang menawarkan sensasi berwisata sambil belajar dengan teknologi mutakhir abad ini yaitu *virtual reality* dan *augmented reality*.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih kepada Pengelola Geowisata Tebing Breksi yang telah memberikan penjelasan terkait sejarah, kondisi, maupun data-data terkait Tebing Breksi. Selain itu ucapan terimakasih juga kepada wisatawan yang telah bersedia menjadi responden dalam penelitian ini, serta terimakasih kami sampaikan kepada Awang Subang Negara, S.T., selaku perwakilan dari pihak akademisi sekaligus peneliti, yang notabene merupakan lulusan Teknik Geologi UPN yang telah menjadi anggota tetap IAGI (Ikatan Ahli Geologi Indonesia) dan sudah lama berkecimpung dalam dunia geowisata misalkan saat ini bertugas dalam Tim Survei Penyusunan *Geoheritage* dan KCAG (Kawasan Cagar Alam Geologi) di DI Yogyakarta dan Kalimantan Selatan. Serta ucapan terimakasih sebesar-besarnya kepada dosen Fakultas Geografi UGM Dr. Langgeng Wahyu Sentosa, S.Si., M.Si. yang telah bersedia menjadi dosen pembimbing dalam penelitian kali ini sehingga jalannya penelitian ini tetap berada dalam koridor yang benar.

Daftar Pustaka

- Arief, R., Umniati, N., "Pengembangan Virtual Class untuk Pembelajaran Augmented Reality Berbasis Android," *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, vol. 21, pp. 114 – 122, 2012.
- Dinas Pariwisata Daerah Istimewa Yogyakarta, 2018. Statistik Kepariwisata 2018. Yogyakarta: Dinas Pariwisata DIY
- E. Solak and R. Cakir, "Exploring the Effect of Materials Designed with Augmented Reality on Language Learners' Vocabulary Learning," *Journal of Educators Online*, vol. 12, pp. 50-72, 2015.
- Gamberini L, Chittaro L, Spagnolli A, Carlesso C., "Computers in human behavior psychological response to an emergency in virtual reality: Effects of victim ethnicity and emergency type on helping behavior and navigation". *Comput Human Behav. Elsevier Ltd*; 2015;48:104–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2015.04.013>.
- Herlambang, P. M., Aryoseto, L., "Potensi Virtual Reality Berbasis Smartphone sebagai Media Belajar Mahasiswa Kedokteran". *Jurnal CDK*, vol. 43, pp. 412 – 415, 2016.
- K. Lee, "Augmented Reality in Education and Training," *TechTrendsLink. Res. Pr. Improve Learn.*, vol. 56, no. 2, pp. 13–21, Mar. 2012.
- Marin-Diaz, "The Relationships Between Augmented Reality and Inclusive Education In Higher Education," *Bordon. Revista de Pedagogia*, vol. 69, pp. 125-142, 2017.
- R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 6, p. 355, 1997.
- Sentosa, L. W. (2015). *Keistimewaan Yogyakarta dari Sudut Pandang Geomorfologi* (Pertama; Dewi, ed.). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Smyth, H., Hall, R., Hamilton, J., & Kinny, P. (2005). *East Java: Cenozoic Basins, Volcanoes and Ancient Basement*. (August), 251–266.
- UPN, 2018. Breksi, Bekas Lahan Tambang Yang Jadi Destinasi Seksi. http://upnyk.ac.id/web/detail_berita/776/html, diakses pada 05 Februari 2020 pukul 09:34
- Verstappen, H. Th, 1983. *Applied Geomorphology: Geomorphological Surveys for Environmental Development*. Elsevier. Amsterdam-Oxford-New York.

INVESTIGASI OBJEK ARKEOLOGI MENGGUNAKAN METODE *THREE-DIMENSIONAL GROUND PENETRATING RADAR (GPR)* : STUDI KASUS CANDI SOJIWAN, KLATEN, JAWA TENGAH

Luthfi Yufajjiru¹, Muhammad Dhiwaurrais¹ dan Ericko Rinanto¹

¹ Program Studi Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.

¹ Program Studi Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.

¹ Program Studi Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.

*luthfi.yufajjiru@ui.ac.id

ABSTRAK

Candi Sojiwan merupakan salah satu peninggalan kuno kaum Budha yang terletak di Klaten, Jawa Tengah. Candi Sojiwan berada di area dengan luas 8140 m² yang terdiri dari bangunan candi utama serta pagar candi. Beberapa area di sekitar candi sudah terkubur oleh peristiwa erupsi vulkanik. Pada area ini banyak ditemukan batuan beku andesit di permukaan sekitar candi utama yang dianggap sebagai batu yang membentuk pagar candi. Survey *Ground Penetrating Radar (GPR)* telah dilakukan di area ini untuk melihat kemenerusan dari objek yang diduga terkubur. Alat yang digunakan yaitu Cobra CBD *Triple-Frequency* yang bekerja pada frekuensi 200 MHz, 400 MHz, dan 800 MHz dengan *bandwidth* 50 MHz – 1400 MHz. Kedalaman yang dapat terbaca pada survei kali ini yaitu mencapai 5 meter. Proses pengolahan data dilakukan dengan perangkat lunak Prism 2.6 untuk memfilter data serta perangkat lunak Voxler untuk menampilkan bentuk 3D dari objek terkubur tersebut. Hasil dari survey GPR ini menunjukkan bahwa ditemukan objek yang diduga pagar candi pada kedalaman sekitar 1 meter dengan bentuk persegi yang menyudut.

Kata Kunci : *Ground Penetrating Radar (GPR); arkeologi; bawah permukaan*

Pendahuluan

Candi Sojiwan merupakan peninggalan kuno kaum Buddha yang terletak di Kebon Dalem Kidul, Prambanan, Klaten, Jawa Tengah. Komplek Candi Sojiwan ini memiliki luas daerah sekitar 8140 m² yang berisi candi utama dan beberapa pagar candi. Candi ini dibangun antara 842 dan 850 C.E. Karakteristik dari candi ini yaitu terdapatnya dua puluh relief pada sekitar candi utama di kaki candi yang berisi tentang kisah-kisah Pancatantra atau dongeng Jataka dari India (Jan Rambout van Blom, 1935). Namun berdasarkan pengamatan di lokasi terdapat beberapa bagian relief yang hilang sehingga alur cerita dari dongeng tersebut menjadi tidak lengkap.

Di bagian selatan lokasi Candi Sojiwan terdapat area kosong di sepanjang pagar candi. Berdasarkan informasi tersebut kami

menduga bahwa terdapat objek yang terkubur di bawah area ini yang mana seharusnya menjadi pelengkap pagar di lokasi yang kosong tersebut. Hal inilah yang menjadi dasar kami untuk melakukan penelitian ini sebagai langkah pertama untuk mengeksplorasi bagian candi yang hilang.

Candi Sojiwan terletak di selatan Gunung Merapi. Formasi di bawah candi Sojiwan sekarang ini adalah produk vulkanik dari Kuartar Holocene dan terdiri dari bahan longgar sebagai akibat dari letusan Gunung Merapi. Endapan produk vulkanik Gunung Merapi adalah abu (*ash*), tufa, dan breksi. Endapan piroklastik letusan Merapi

diendapkan ke daerah selatan karena tektonisme vulkanik. Kami menduga bahwa penguburan pagar yang terjadi disebabkan oleh proses geologis, letusan gunung berapi kuarternar.

Melalui aplikasi metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) ini kami memetakan keberadaan objek arkeologi yang terkubur. Adapun metode GPR sendiri merupakan metode geofisika aktif yang banyak diaplikasikan untuk memetakan bodi arkeologi yang terkubur (Harald 2005, dalam Buttler 2005; Goodman, D., Piro, S., 2013). Metode ini sangat dipengaruhi oleh perbedaan properties elektromagnetik antar material sehingga sangat tepat digunakan pada survey arkeologi yang tentunya terdapat perbedaan *electromagnetic properties* dengan lingkungan sekitar. Kontras dielektrik antara material pembentuk candi dengan penguburnya menjadikan metode GPR sangat baik untuk diaplikasikan.

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Radar merupakan sistem elektromagnetik yang digunakan untuk mendeteksi dan melokalisasi suatu objek dengan cara memanfaatkan gelombang yang ditransmisikan dan kemudian dipantulkan kembali ke komponen penerima sinyal (*receiver*) (Skolnik, 1981). Pada *Ground Penetrating Radar* (GPR), fungsi radar ini diterapkan ke bawah permukaan bumi ataupun objek lainnya seperti bangunan, jembatan, dan lain sebagainya (Daniels, 2004). GPR pada dasarnya mengukur amplitudo terhadap waktu dari gelombang elektromagnetik yang dipantulkan karena perubahan sifat material yang terkubur di bawah permukaan sehingga merefleksikan kondisi bawah permukaan (Utsi, 2017).

Prinsip kerja dari metode GPR sangatlah bergantung pada perbedaan propertis

elektromagnetik antar material di bawah permukaan. Pemanfaatan dari gelombang elektromagnetik dalam metode GPR didasarkan atas persamaan Maxwell (M. Jol, 2009).

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4)$$

dengan H adalah intensitas medan magnet (Ampere/m); D adalah perpindahan listrik (C/m^2); J adalah kerapatan arus konduksi (Ampere/m²); E adalah kuat medan listrik (Volt/m); B adalah flux magnetik (Ampere/m); q adalah muatan listrik (C/m^3); dan t adalah waktu (s). Persamaan pertama menunjukkan bahwa medan magnetik disebabkan oleh medan listrik. Kemudian persamaan kedua menunjukkan bahwa medan listrik dihasilkan dari adanya fluks magnetik yang berubah terhadap waktu.

Kemudian terdapat persamaan konstitutif yang merupakan persamaan yang menggambarkan respon material terhadap medan elektromagnetik. Persamaan konstitutif ini menjelaskan bagaimana elektron, atom, dan molekul pada material memberikan respon terhadap medan elektromagnetik yang diberikan (M. Jol, 2009).

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (5)$$

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (6)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (7)$$

Dimana σ adalah konduktivitas material (Ohm^{-1}/m); ε adalah permitivitas material (Farad/m); dan μ adalah permeabilitas material (Henry/m).

Perambatan gelombang elektromagnetik pada aplikasi GPR sangat bergantung pada 3 parameter tersebut, yaitu konduktivitas, permitivitas, dan permeabilitas. Konduktivitas dan permitivitas material sangat dipengaruhi oleh medan listrik (persamaan 5 dan 6), sedangkan permeabilitas material sangat dipengaruhi oleh medan magnetik (persamaan 7).

Kecepatan gelombang elektromagnetik yang merambat tidaklah konstan, melainkan sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai permitivitas material yang dilaluinya (Utsi, 2017).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon r}} \quad (8)$$

dimana v adalah kecepatan gelombang radar (m/ns); dan c adalah kecepatan cahaya (0.3 m/ns). Semakin besar nilai permitivitas material yang dilalui, maka kecepatan gelombang radarnya juga akan semakin lambat. Adapun keberadaan atau kadar air pada lokasi penelitian menjadi pengontrol utama kecepatan gelombang karena air ini memiliki nilai permitivitas paling besar dibanding material lain ($\epsilon = 81$).

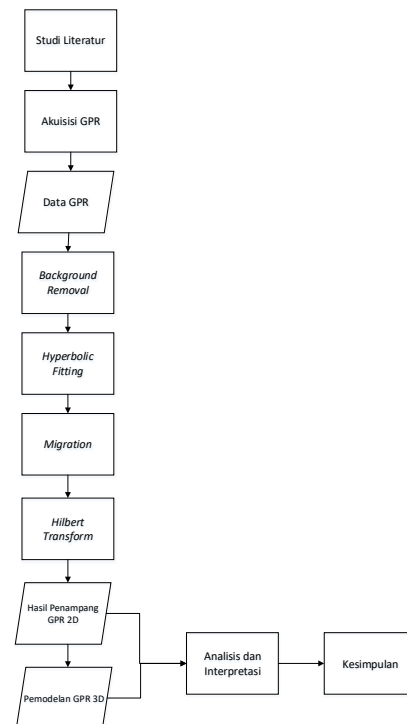
Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan melakukan pengukuran GPR pada wilayah yang diduga terdapat bagian candi yang terkubur. Candi yang terkubur diketahui terbuat dari material batuan andesit, yang dikelilingi oleh piroklastik yang bersifat seperti lempung. Kondisi tersebut menjadikan batuan candi memiliki kontras dielektrik dengan kondisi sekitarnya, maka dari itu sinyal yang dihasilkan oleh GPR adalah memiliki amplitudo yang tinggi. Setelah melakukan migrasi pada data GPR, langkah berikutnya adalah melakukan filter Hilbert untuk memberikan kuantitas yang berdasarkan hanya amplitudo yang tinggi untuk keperluan visualisasi tiga dimensi dengan aplikasi Voxler. Adapun tahapan



Gambar 1. Lokasi penelitian

singkat dari penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada bagan 1.



Bagan 1. Diagram alir penelitian

Pengukuran *Ground Penetrating Radar* (GPR)

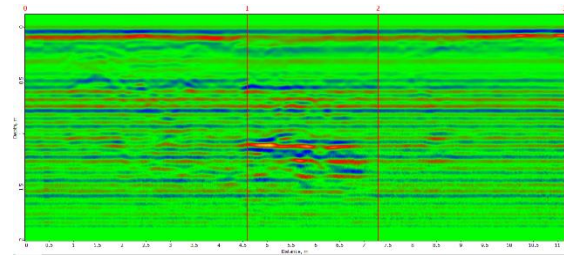
Pengukuran dilakukan dengan membentuk *grid* pada tujuh garis pengukuran arah barat-timur sebagai sumbu x, dan arah utara-selatan sebagai garis y. Pengukuran dilakukan di antara tiga buah pagar candi yang tata letak seperti pada gambar 1. Total lintasan pengukuran yang dilakukan yaitu sebanyak 19 lintasan, dengan 7 lintasan berarah barat-timur dan 12 lintasan berarah utara-selatan. Tujuan pengukuran pada wilayah ini adalah untuk mencari kontinuitas dari pagar candi.

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan instrumen GPR Cobra CBD dengan spesifikasi antena yang menembakkan tiga frekuensi, yaitu 200 Mhz, 400 Mhz, dan 800 Mhz dalam satu buah gelombang dengan waktu yang bersamaan, maka kebisingan (*noise*) berupa gema (*reverberation*). Pengukuran dilakukan dengan permitivitas dielektrik relatif (*Relative Dielectric Permittivity*) sebesar 14.4 dengan rentang waktu 50 ns dengan penguatan sebesar 5.

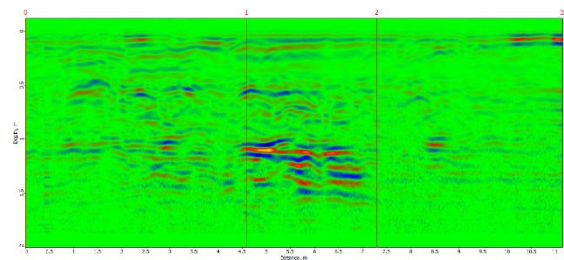
Pengolahan Data

Data yang didapatkan dari kegiatan akuisisi selanjutnya dilakukan proses pengolahan. Gambar 2 menunjukkan contoh data hasil

akuisisi di salah satu lintasan survei GPR di Candi Sojiwan.



Gambar 2. RAW Data



Gambar 3. Background Removal

Background Removal

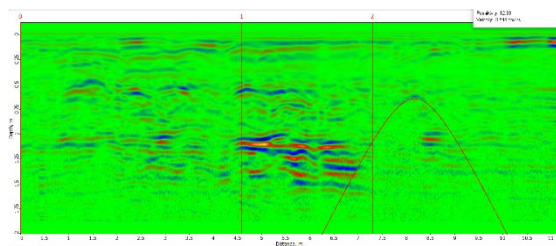
Proses pertama yang dilakukan adalah melakukan *Background Removal* pada raw data. *Background Removal* sendiri adalah metode untuk menghilangkan elemen-elemen lingkungan sekitar untuk menampilkan setiap anomali dalam kumpulan data sehingga bagian yang menjadi anomali dapat lebih mudah dilihat. Hasil *Background Removal* dari kumpulan data dapat dilihat pada gambar 3.

Hyperbolic Fitting

Hyperbolic Fitting adalah proses menyesuaikan kecepatan transmisi dari gelombang elektromagnetik dan permitivitas dielektrik relatif (RDP). Penyesuaian kecepatan dan permitivitas ini akan digunakan dalam proses selanjutnya yaitu migrasi. Proses ini dilakukan dengan

menyesuaikan kurva hiperbolik secara teoritis dengan hiperbolik yang diamati.

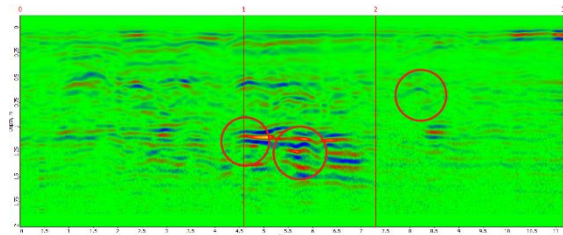
Permittivitas dengan nilai sekitar 12 merupakan nilai permittivitas dari batuan lempung (E. Musset et al., 2000) yang mana setara dengan batuan tuff dengan ukuran butir lempung sehingga kita mempertimbangkan bahwa permittivitasnya memiliki nilai yang setara. Proses *hyperbolic fitting* ini dapat dilihat pada gambar 4.



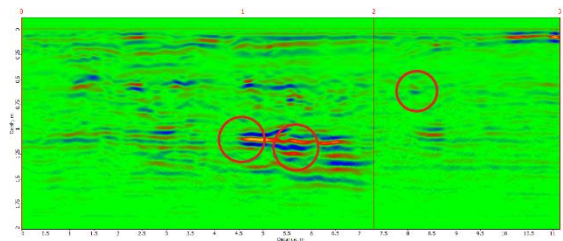
Gambar 4. Hyperbolic Fitting

Migrasi

Migrasi berguna untuk mengembalikan kelengkungan hiperbolik waktu tempuh refleksi menjadi satu titik data. Migrasi dilakukan untuk meningkatkan akurasi kedalaman dari objek yang diduga anomali. Sebelum melakukan migrasi, kita perlu melakukan *hyperbolic curve fitting* untuk mendefinisikan permittivitas. Permittivitas mendefinisikan transmisi kecepatan. Permittivitas yang lebih tinggi mengarah ke kecepatan yang lebih rendah. Jika kita menggunakan permittivitas lebih rendah dari yang seharusnya, kurva hiperbolik akan menjadi *upward hyperbolic curve*. Kami melakukan migrasi dengan *Hyperbolic Summation* dengan lebar window 55, dan tinggi window 51. Hasilnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, bahwa yang dilingkari menunjukkan perubahan kurva hiperbolik menjadi satu titik data.



Gambar 5. Data GPR sebelum Migrasi



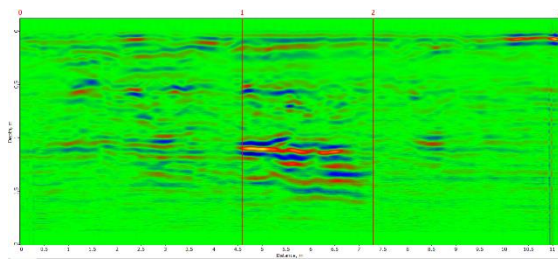
Gambar 6. Data yang telah di migrasi. Bagian yang dilingkari adalah kurva hiperbolik yang *collapse*, sebagai satu titik data yang memvisualisasikan anomali linier dengan jelas.

Hilbert Transform (Envelope)

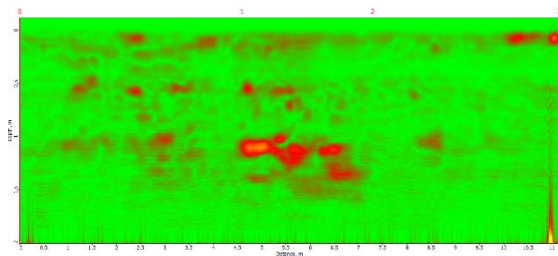
Langkah selanjutnya dari pengolahan data adalah untuk menunjukkan *envelope* dari data yang sudah dimigrasi menggunakan *Hilbert Transform*. Transformasi ini menghasilkan sinyal yang sepenuhnya berada di domain positif dan mewakili *envelope* dari data yang dimigrasi. Hilbert transform data sangat berguna dalam situasi pencitraan untuk hanya menunjukkan daerah refleksi lemah atau kuat sehingga lebih merepresentasikan struktur bawah permukaan daripada data migrasi sebelum di *envelope*.

Hasil Transformasi Hilbert dari data yang dimigrasi dapat dilihat pada Gambar 8. Seperti yang dapat kita lihat amplitudo pada kedalaman 1 hingga 1,5 meter terlihat tinggi sehingga kami mempertimbangkan bahwa area ini merupakan bodi yang menjadi target. Setelah itu, kami melakukan

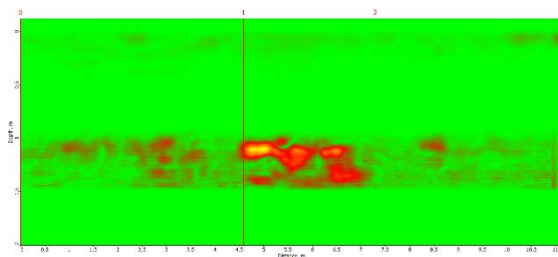
gain atau penguatan sinyal di area target tersebut dan mengurangi kurva gain di kedalaman di luar area target data transformasi Hilbert. Proses ini meningkatkan sinyal anomali dan memotong informasi yang kami anggap sebagai objek non-target. Hasil penambahan gain ditunjukkan pada Gambar 9. Kemudian kami mengekstrak data dalam bentuk file teks amplitudo untuk keperluan langkah selanjutnya di perangkat lunak Voxler.



Gambar 7. Data yang telah dimigrasi sebelum Hilbert Transform.



Gambar 8. Hilbert Transform pada data yang sudah dimigrasi



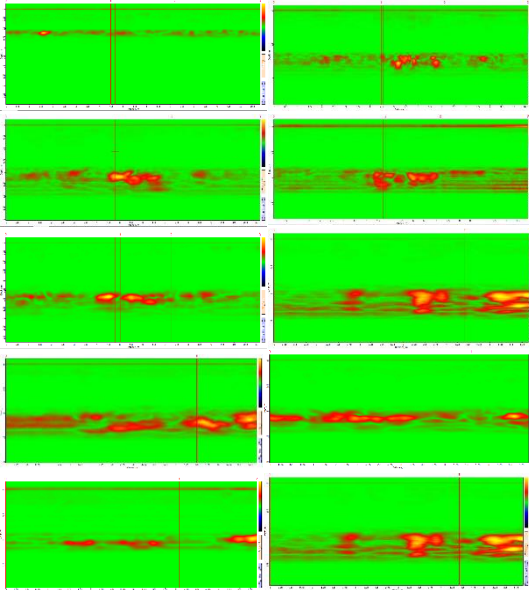
Gambar 9. Hilbert Transformed Data with an Appropriate amount of gain added

Visualisasi Voxler

Masukkan dua dataset inline dan cross-line, lalu kami *grid* setiap dataset dalam opsi "*computational*". Setelah dataset di *grid*, kami menggabungkan dataset menjadi satu *grid*. Setelah itu kami memberi *filter* pada *grid* yang dibuat dengan "*Threshold Crossing*" dengan nilai ambang batas 13000 untuk membuat amplitudo seragam sehingga kami memvisualisasikan satu benda padat. Batas berasal dari upaya coba-coba, menyesuaikan dengan bodi sesungguhnya yang kami duga berdasarkan hasil *Hilbert Transform* untuk mempertahankan dari kehilangan data. Kemudian kita bekerja dalam output grafis kemudian "*volrender*", seperti yang dapat dilihat pada Gambar 12-16. Sekarang kita menyisipkan gambar Google Earth, lalu memilih "*output grafis*" dan melakukan transformasi untuk menyesuaikan dengan kondisi nyata, dengan melakukan translasi dan rotasi. Setelah itu, kami menghitung volume objek yang terkubur menggunakan pilihan "*facender*".

Hasil dan Pembahasan

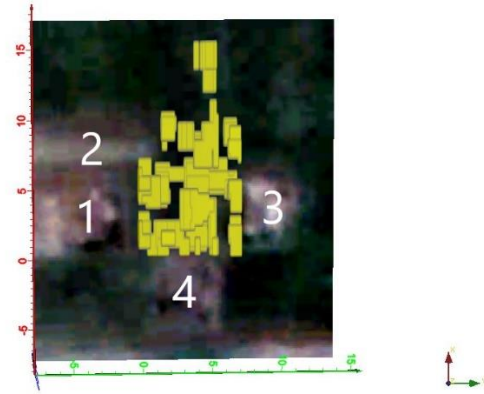
Gambar 10 menunjukkan hasil pengolahan akhir dari beberapa garis survey yang dilakukan (5 garis dari 7 garis dalam arah x dan 5 garis dari 12 garis dalam arah y). Hasil pengolahan menunjukkan bahwa terdapat anomali dengan amplitudo yang tinggi dengan tebal 80 cm pada kedalaman yang relatif sama yaitu 1 meter. Anomali ini lah yang diinterpretasikan sebagai objek pagar candi yang telah terkubur. Namun kami tidak dapat mengatakan bahwa objek yang terkubur itu merupakan pagar dengan relief atau tanpa relief.



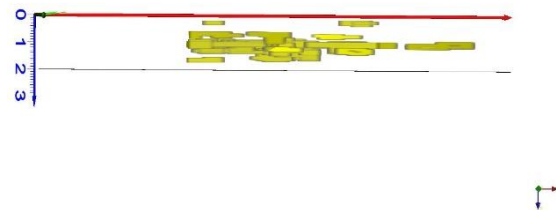
Gambar 10. Hasil pengolahan akhir dari beberapa line survey

Setelah itu, kami membentuk visualisasi anomali tiga dimensi dengan perangkat lunak Voxler. Anomali tiga dimensi ini diletakkan diatas citra Google Earth Satellite seperti yang dapat dilihat pada gambar 11. Pagar candi di permukaan memiliki empat objek dengan geometri persegi. Penelitian kami menunjukkan bahwa celah antara pagar pertama dan ketiga memiliki anomali yang berbentuk persegi bersudut yang memiliki geometri yang sama dengan yang tersingkap di permukaan sehingga kami percaya bahwa pagar tersebut saling terhubung.

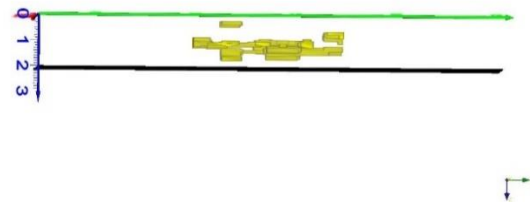
Pagar candi yang merupakan objek nomor dua memiliki kelanjutan pada sumbu x ke arah timur. Obyek pertama dan ketiga adalah saling terhubung seperti yang diilustrasikan pada gambar 11. Pada gambar 12 sampai 16 merupakan bentuk visualisasi 2D dari model 3D yang dilihat dari beberapa sudut pandang.



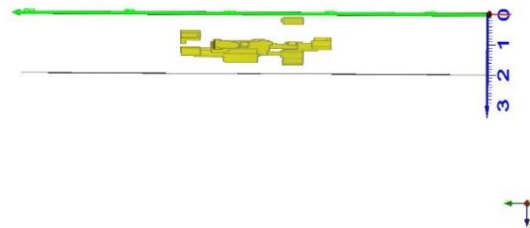
Gambar 11. Tampak atas dari Sojiwan 3D Model



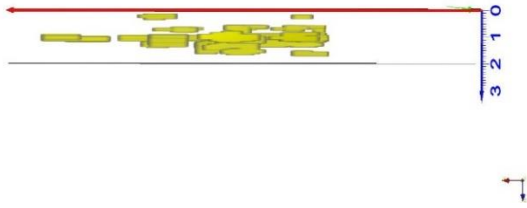
Gambar 12. Tampak kanan dari Sojiwan 3D Model



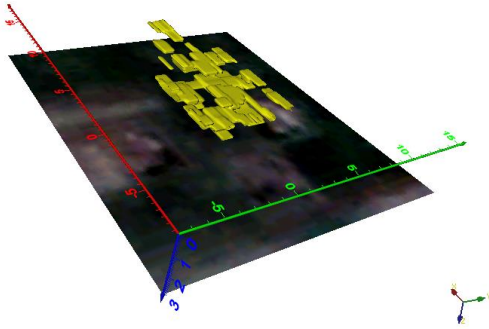
Gambar 13. Tampak kiri dari Sojiwan 3D Model



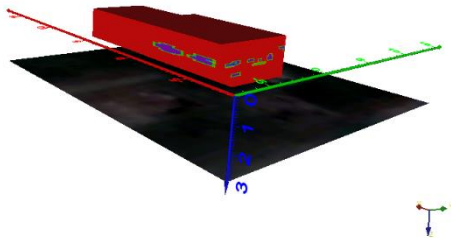
Gambar 14. Tampak samping dari Sojiwan 3D Model



Gambar 15. Tampak belakang dari Sojiwan 3D Model



Gambar 16. Perspektif lain dari Sojiwan 3D Model



Gambar 17. Block count / Block render

Gambar 17 adalah aproksimasi volumetrik dari obyek terkubur berdasarkan fitur “*facender*”. Hasil perhitungan dari fitur ini menunjukkan bahwa objek yang terkubur tersebut memiliki volume sebesar 232 m^3 . Namun bagaimanapun juga perhitungan ini tidak dapat dijadikan acuan mutlak, karena dapat memungkinkan adanya objek selain candi yang masuk dalam perhitungan volumetrik yaitu berupa objek fisik yang

terkubur selain candi atau *noise* pengukuran dan pengolahan GPR.

Kesimpulan

Penelitian ini dapat memetakan potensi keberadaan candi yang terkubur. Penelitian kami menunjukkan bahwa terdapat kemenerusan pada wilayah yang kosong di antara tiga pagar candi pada kedalaman satu meter dan memiliki tebal 80 cm dengan volume 232 m^3 dan geometri yang membentuk seperti kotak. Bagaimanapun penelitian kami belum bisa menjawab apakah di bawah lokasi penelitian adalah sebuah arca yang hilang dari cerita atau hanya sebuah pagar candi biasa. Oleh karena itu kami menyarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut seperti melakukan penggalian.

Daftar Pustaka

Daniels, D. J. (2004) *Ground Penetrating Radar*. London: The Institution of Electrical Engineers.

E. Musset, A. and Khan, M. A. (2000) *Looking Into the Earth*. New York: Cambridge University Press.

Harald Von Der Osten-Woldenbur. (2005). SEG investigations in geophysics series, 13, 621-626.

Jan Rambout van Blom. (1935) *Tjandi Sadjiwan*. Leiden-Amsterdam: Stenfert Kroese.

M. Jol, H. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science.

Skolnik, M. (1981) *Introduction to Radar System, International Edition*. 2nd edn. Singapore: McGraw Hill.

Utsi, E. C. (2017) *Ground penetrating radar: Theory and practice*. Oxford: Butterworth Heinemann.

PERHITUNGAN KONSEPTUAL POTENSI REE DALAM MINERAL LEMPUNG MELALUI PERBANDINGAN KAPASITAS TUKAR KATION, KAOLINITE, DAN HALLOYSITE

Mochammad Kivlan Marcellyo Darma Putra¹, Immanuel Ezra Deminto Panggabean¹

¹Program Studi SI Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB), Institut Teknologi Bandung

*kiv.muhammad563@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu faktor unsur logam terkayakan pada suatu lapisan lempung karena adanya kapasitas tukar kation. Pada sebuah penelitian Montmorilonit menunjukkan efisiensi adsorpsi dan regenerasi tertinggi untuk La^{3+} dan Yb^{3+} dan menurun dalam urutan Montmorilonit, Muskovit, Illite, dan yang terendah adalah Kaolinite. Tetapi Kaolinite memiliki efisiensi ekstraksi tertinggi untuk REE yang disebutkan sebelumnya. Alasan mengapa Kaolinite memiliki efisiensi ekstraksi untuk REE tertinggi karena Kaolinite terdiri dari lembaran oktahedral $AlO_2(OH)_4$ dan lembaran tetrahedral SiO_4 dengan morfologi seperti pelat. Lembaran yang berdekatan dihubungkan oleh oksigen sehingga membentuk sebuah lapisan, sedangkan lapisan-lapisannya dihubungkan dengan ikatan hidrogen. Di bawah kondisi yang geologi yang mendukung, dibantu oleh ketidakcocokan antara sistem kristal tetrahedral dan oktahedral dalam berbagi oksigen, lapisan-lapisan tersebut menyatu dan membentuk Halloysite tabular, sehingga permukaan eksternal dan internal membentuk siloxane (Si-O-Si) dan kelompok aluminol (Al-OH) seperti Gibbsite. Adsorpsi REE terjadi di tempat dengan muatan negatif yang ditentukan oleh adanya Si dan AlO yang tersingkap sehingga dapat memerangkap REE. Peran pH juga penting dalam ekstraksi REE. Dari mineral lempung alami dibuktikan ketika terjadi kontak antara REE dan mineral lempung alami dengan amoniak, pH meningkat dengan cepat dari pH awal. Hal ini menuju kepada berkurangnya kemampuan pertukaran ion REE dengan NH_4^+ . Kaolinite memiliki kapasitas tukar kation yang baik sehingga REE akan terikat dengan Kaolinite ketika pembilasan. Penelitian ini membuktikan bahwa pengayaan REE karena kapasitas tukar kation pada Kaolinite yang baik dan pemerangkapan REE terjadi akibat perubahan mineral Kaolinite menjadi Halloysite akan menjadi tinggi dengan melihat perbandingan Kaolinite dengan Halloysite.

Kata Kunci : REE, Halloysite, Kapasitas tukar kation, Kaolinit

1. Pendahuluan

Rare Earth Elements (REE) atau unsur logam tanah jarang merupakan sebutan untuk unsur yang berada pada golongan lantanida di tabel periodik. REE terdiri dari 15 unsur dengan rentang nomor atom dari 57 hingga 71 dan termasuk Itrium yang memiliki nomor atom 39. Scandium yang memiliki nomor atom 21 memiliki persamaan secara kimia dan sering dijumpai bersamaan dengan REE namun dia tidak dikelompokkan ke dalam REE lantaran tidak memiliki konsentrasi yang ekonomis di kondisi geologi yang ada. REE memiliki nilai jual ekonomi tinggi karena kegunaannya

dalam berbagai aplikasi seperti katalis kimia, paduan logam, pemoles kaca, dan magnet permanen (Philip, 2017). Proses alterasi menyebabkan perubahan pola distribusi unsur tanah jarang dan kemudian ikut memengaruhi kelimpahannya. Unsur tanah jarang termasuk dalam unsur inkompatibel dan jumlahnya melimpah dalam fraksi geokimia dan batuan beku granitik termasuk hasil pelapukannya (Hanini, 2017).

Halloysite merupakan mineral lempung dioktahedral dan termasuk ke dalam grup

kaolin. Halloysite memiliki kesamaan kimiawi dengan kaolinite tetapi memiliki struktur kristal yang berbeda. Halloysite terbentuk pada kondisi batuan ultramafik yang mengalami pelapukan atau alterasi hidrotermal (Yuan, 2015). Halloysite memiliki berbagai macam tipe asosiasi mineral berdasarkan perbedaan cara pembentukannya. Endapan Halloysite dapat terbentuk pada alterasi hidrotermal bersuhu rendah di batuan riolit dan dasit yang banyak mengandung kuarsa, kristobalit, dan feldspar atau alterasi hidrotermal batuan dolomit yang berasosiasi dengan kaolinite, gibbsit, alunit, dan kuarsa (Pasbakhsh, dkk., 2013, Yuan, 2015). Kondisi kristalisasi ketika pembentukan Halloysite dapat memengaruhi bentuk morfologinya. Misalkan pada kondisi rekristalisasi dari larutan jenuh gelas vulkanik dan batu apung menyebabkan Halloysite berbentuk bundar (Joussein, dkk., 2005 dalam Yuan, 2015). Kemudian alterasi hidrotermal pada biotit menghasilkan Halloysite dengan bentuk tubular (Papoulis, dkk., 2009 dalam Yuan, 2015).

Kaolinite merupakan mineral lempung dengan struktur 1:1 dan memiliki tingkat reaktivitas kimia yang rendah. Mineral ini berwarna putih dan sangat rapuh sehingga mudah dibentuk dan dihancurkan terutama dalam kondisi basah. Kaolinite terbentuk dari proses alterasi utamanya pelapukan dari batuan beku, sedimen, dan metamorf. Umumnya mineral ini berasosiasi dengan muskovit, kuarsa, dan feldspar (Wainipee, 2013).

Cation Exchange Capacity atau kapasitas tukar kation (KTK) merupakan kemampuan tanah untuk melakukan pertukaran kation pada permukaan koloid yang bermuatan

negatif agar dapat menyeimbangkan muatannya. Muatan ini timbul karena adanya interaksi antar unsur penyusun yang membentuk senyawa dan mineral. Umumnya, mineral yang dijumpai di tanah adalah mineral lempung. Nilai KTK umumnya dinyatakan dalam satuan cmolc/kg (Meimaroglou, 2019). KTK dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tekstur tanah, jenis mineral yang terkandung di tanah dan kandungan bahan organik dalam tanah (Zaqyah, 2016). Penggunaan KTK saat ini mulai banyak dikembangkan untuk pertambangan dan konstruksi seperti menganalisa kekuatan tanah dalam menerima beban bangunan di atasnya.

Tanah merupakan hasil pelapukan batuan dan terdiri dari mineral dan bahan organik. Mineral yang umum dijumpai adalah mineral lempung seperti Kaolinite, Halloysite, dan lain-lain. Mineral lempung memiliki kapasitas tukar kation di permukaannya karena muatan unsur dan struktur atom yang menyusun mereka (Newman, 1987). Kaolinite dan Halloysite memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi dibandingkan mineral lain. Hal ini disebabkan struktur Kaolinite dan Halloysite yang berlapis serta jarak antar lapisannya cukup longgar sehingga ion-ion dapat saling berinteraksi dan berpindah tempat dalam larutan yang mengandung konsentrasi ion yang tinggi. Akibatnya, kedua mineral tersebut dapat terkayakan oleh ion-ion lain termasuk unsur tanah jarang. Unsur tanah jarang dapat terkayakan lewat alterasi atau berbagai hal lainnya. Unsur tanah jarang merupakan unsur dengan nilai kation yang tinggi sehingga mudah berinteraksi dengan mineral lempung yang memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi. Dalam suasana asam, mineral lempung dengan lapisan muatan yang negatif

memiliki efektivitas tinggi dalam menyerap unsur tanah jarang melalui pertukaran ion, interaksi elektrostatis, kompleksasi permukaan dan migrasi ke dalam struktur lempung (Granados-Correa, dkk., 2013 dalam Yang, 2019). Kapasitas penyerapan dipengaruhi oleh struktur permukaan, komposisi, dan muatan permukaan dari mineral lempung.

Tujuan dari penelitian ini untuk mencari hubungan secara semi kuantitatif antara Kaolinite, Halloysite, kapasitas tukar kation, dan unsur tanah jarang.

Geologi Regional

Daerah yang menjadi lokasi penelitian adalah Kepulauan Bangka Belitung dan pulau-pulau kecil sekitarnya. Wilayah ini terletak di sebelah timur Pulau Sumatera dan secara geografis terletak pada koordinat 104°50'-109°30' BT dan 0°50'-4°10' LS. (Badan Pusat Statistik, 2015). Secara umum daerah ini merupakan dataran rendah, lembah, dan sebagian kecil perbukitan. Kepulauan ini merupakan bagian dari Dataran Sunda yang dihubungkan oleh laut dangkal yang memiliki kedalaman tidak lebih dari 30 m. Kondisi stratigrafi dari Pulau Bangka terdiri dari 5 satuan batuan, yaitu kompleks Malihan Permali, Formasi Tanjunggenting, Granit Klabat, Formasi Ranggung, dan aluvial. Urutan stratigrafi di daerah tersebut (Andi-Mangga, 1994 dalam Hanini, 2017), yaitu:

- Kompleks Malihan Permali (CPp)

Kompleks ini terdiri dari kuarsit, sekis, dan filit. Kuarsit berwarna putih kecokelatan dan tersusun oleh kuarsa dan feldspar dengan perlapisan mencapai 1 cm. Sekis berwarna

abu-abu kehijauan dengan struktur mendaun, berselingan dengan kuarsit, terkekarkan, dan terisi oleh kuarsa atau oksida besi. Filit berwarna abu-abu kecokelatan dengan struktur mendaun dan berurat kuarsa. Umurnya tidak dapat dipastikan tetapi diperkirakan berumur antara Permian atau Karbon melihat dari kedudukannya yang tidak selaras dan berada di bawah Formasi Tanjunggenting.

- Diabas Penyabung (Ptrd)

Diabas ini mengintrusi Kompleks Pemali lalu keduanya diintrusi pula oleh Granit Klabat. Lapisan ini tersusun oleh diabas yang tersesarkan dan terkekarkan. Lapisan ini memiliki umur Permian dan terletak di bagian barat Pulau Bangka.

- Formasi Tanjunggenting (Trt)

Formasi ini tersusun dari perselingan batulempung dan batupasir. Batupasir berwarna abu-abu kecokelatan, butir halus-sedang, keras, terpilah baik, memiliki ketebalan 2-60 cm dengan struktur sedimen silang siur dan laminasi bergelombang. Umur formasi ini diperkirakan pada Trias awal dan terbentuk di lingkungan pengendapan laut dangkal berdasarkan penemuan fosil *Montlivaultia molukkana*, *Entrochus sp.*, *Peronidella G.*, dan *Encrinus sp.* Formasi Tanjunggenting tersusun tidak selaras dan berada di atas Kompleks Pemali.

- Granit Klabat (TrJkg)

Granitoid di Pulau Bangka dikelompokkan dalam satu jenis granitoid yaitu Granit Klabat (Andi-Mangga, 1994 dalam Hanini, 2017). Granit Klabat terdiri dari granodiorit, granit genesan, dan granit biotit. Granodiorit berwarna putih keruh dengan bintik hitam, granit genesan berwarna abu-abu dengan struktur perdaunan, dan granit biotit berwarna abu-abu dengan tekstur porfiritik, ukuran butir sedang-kasar, ukuran feldspar mencapai 4 cm, dan terlihat struktur foliasi. Umur satuan granit ini antara Trias awal hingga Jura awal serta menembus Formasi Tanjunggending dan Kompleks Malihan Pemali.

sedimen silang siur, sejajar, perlapisan bersusun. Dalam batupasir ditemukan fosil moluska seperti *Turitella terebra* dan *Olivia tricincta*, fosil foraminifera bentos antara lain *Celanthus craticulatus*, *Amonia* sp., dan *Brizalina* sp., lensa-lensa batubara dengan tebal 0,5 m, dan kandungan pasir timah sekunder yang bercampur dengan batupasir kuarsa. Konglomerat terdiri dari pecahan kuarsa, granit, dan batuan metamorf. Diperkirakan umur Formasi Ranggam antara Miosen akhir hingga Plistosen akhir dengan lingkungan pengendapan fluvial. Ketebalan Formasi Ranggam sekitar 150 m dan menindih tidak selaras di atas formasi lain yang lebih tua.

- Aluvial (Qa)

Lapisan ini merupakan endapan rawa, sungai, dan pantai. Fragmen terdiri dari bongkah, kerakal, kerikil, pasir, lempung, dan gambut.

Masa	Zaman	KALA	SIMBOL	KETERANGAN		
Kenozoikum	Kuartar	Holosen	Qa	Aluvium (Qa)		
		Plistosen	TQ r	Formasi Ranggam (TQr)		
	Tersier	Neogen	Pliosen			
			Miosen			
		Paleogen	Oligosen			
			Eosen			
			Paleosen			
			Mesozoikum	Kapur		
Jura	Akhir					
	Tengah					
Trias	Awal			Tr Jkg	Granit Klabat (TrJkg)	
	Trias	Akhir				
		Tengah				
		Awal			Trt	Formasi Tanjunggending (Trt)
	Paleozoikum	Perm			Pttd	Diabas Penyabung (Pttd)
			CP p	Kompleks Pemali (CPp)		

Gambar 1. Urutan stratigrafi batuan di Pulau Bangka bagian utara (Andi-Mangga, 1994 dalam Hanini, 2017)

2. Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode analisis data laboratorium, pengambilan sampel tanah serta metode analisis berupa analisis petrografi dari data sekunder untuk melihat nama batuan, analisis XRF untuk mengetahui unsur tanah jarang dalam *soil*, analisis XRD untuk mengetahui mineral lempung dalam tanah dan pengolahan data geokimia dengan batuan statistik.

- Formasi Ranggam (TQr)

Formasi Ranggam terdiri dari perselingan batupasir, konglomerat, dan batulempung. Batupasir berwarna putih, ukuran butir halus-kasar, menyudut-membundar tanggung, berlapis baik, mudah diremas, struktur

3. Hasil dan Pembahasan

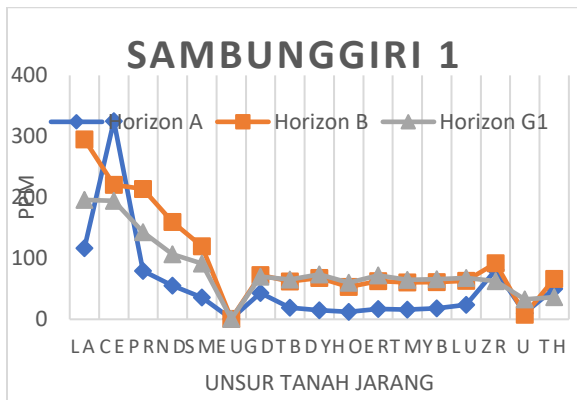
3.3 Pengolahan Data Geokimia dan Analisis

3.3.1 Data Geokimia

Hasil analisis contoh *soil* didapatkan beberapa unsur yaitu: Ce, Dy, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Y, Yb, Li, dan Sn yang diambil untuk dianalisis lebih lanjut.

Lokasi	Kode Sampel	Mineral
Belinyu 1	IR-B1-AB	Kao, Qz
	IR-B1-B	Kao, Qz
Sambunggiri 1	IR-AB-A	Kao, Il
	IR-AB-B	Gibs, Hal, Mon, Qz
Sambunggiri 2	IR-G1-AB	Kao, Gibs
	IR-G1-B	Kao, Dik
Air Nyatoh	IR-N-B2	Hal, Qz
Pemali	IR-P-B	Ver, Kao, Dik, Qz
Kangurung	IR-K-AB	Kao, Gbs
	IR-K-B	Kao

Gambar 2. Tabel lokasi, kode sampel, dan mineral

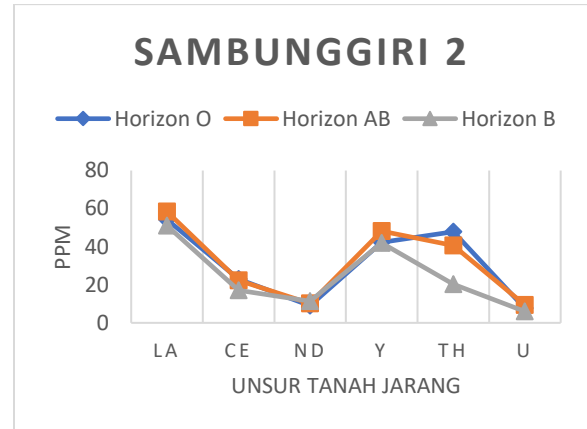


Grafik 1. Kadar unsur tanah jarang pada daerah Sambunggiri 1

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon A = 919,53

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon B = 1678,51 Terdapat mineral halloysite

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon G1 = 1403,65

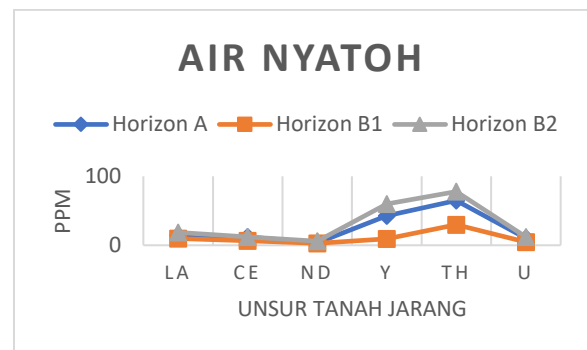


Grafik 2. Kadar unsur tanah jarang pada daerah Sambunggiri 2

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon O = 183,83

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon AB = 189,04

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon B = 147,71

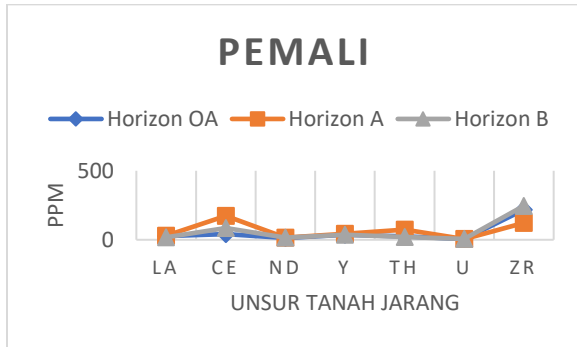


Grafik 3. Kadar unsur tanah jarang pada daerah Air Nyatoh

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon A = 147,96

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon B1 = 63,07

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon B2 = 186,45 terdapat halloysite



Grafik 4. Kadar unsur tanah jarang pada daerah Pemali

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon OA = 368,16

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon A = 459,63

Total ppm unsur tanah jarang pada horizon B = 424,68

Keterdapatannya mineral kaolinite dan Halloysite terdapat pada daerah Air Nyatoh IR-N-B2 dan Sambunggiri 1 IR-AB-B.

3.3.2 Analisis

3.3.2.1 Tes Korelasi Data

Untuk mendapatkan korelasi antara UTJ terhadap mineral kaolinite dan halloysite dapat menggunakan tes *null hypothesis*. Didapatkan kadar rata-rata unsur tanah jarang untuk La, Ce, Nd, dan Th berturut-turut adalah 74,1, 94,4, 34,2, dan 45,8. Melalui

data XRF didapatkan juga standart deviasi dan *Correlation Coefficient* yang dipadukan dengan *Canonical Correlation Analysis* untuk masing-masing unsur tanah jarang diatas.

Correlation Coefficient (Ma, 2013)

$$r_{xy \text{ linear}} = \frac{S_{xy \text{ linear}}}{\sqrt{S_{xx \text{ linear}}} \sqrt{S_{yy \text{ linear}}}} \dots\dots(1)$$

$$= \frac{S_{xy} + k_3 C_0 + k_4 C_0^2}{\sqrt{S_{xx}} \sqrt{S_{yy} + k_1 C_0 + k_2 C_0^2}}$$

Canonical Correlation Analysis (Zhou, 2020)

$$R = \sum_x^{-1/2} \sum_y^{-1/2} \sum xy \dots\dots(2)$$

Modified correlation analysis method (Bi, 2018)

$$\begin{aligned} \sum f &= E[(X - m, f)(X - m)] \dots (3) \\ &= \int_E K(s, s') f(s') d\mu(s') \end{aligned}$$

Null hypothesis table

	Null Hypothesis
La	Reject
Ce	Reject
Nd	Reject
Th	Reject

4. Kesimpulan

Kaolinite dan halloysite adalah mineral paling penting dari kelompok mineral kaolin dengan struktur lapisan 1: 1 dioctahedral yang terdiri dari satu lembar tetrahedral dan satu lembar oktahedral. Kation pada tetrahedral dan struktur tabung masing-masing biasanya Si^{4+} dan Al^{3+} . Sub-status Si^{4+} dengan Al^{3+} di lembar tetrahedral menciptakan muatan negatif permanen di dalam lapisan. Hal ini menyebabkan kapasitas pertukaran kation (KTK) kaolinite dan halloysite tertentu (Yang, 2019) Selain itu, gugus OH di tepi atau permukaan dasar / bidang dasar gibbsite dari halloysite dan kaolinite adalah gugus fungsi asam basa atau Lewis, yang merupakan sumber muatan yang tergantung pH (Strawn and Sparks, 1999).

Dari hasil pengolahan data dengan metode diatas didapatkan bahwa adanya relasi antara REE (La, Ce, Nd, Th) terhadap perbandingan Kaolinite, Halloysite, dan kapasitas tukar electron. Didapatkan tren bahwa pelapukan batu granit yang mengandung REE dari penelitian lapangan dimana mineral dari batuan tersebut terubahkan menjadi mineral lempung seperti kaolinite dan halloysite menyebabkan kadar ppm REE (La, Ce, Nd, Th).

Ucapan Terimakasih

Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Tuhan YME, Dr. Ir. Bambang Priadi atas bimbingannya, saudari Fildzia Irsina Hanini dari GEA 2013 yang sudah berbaik hati mengizinkan penggunaan data skripsinya untuk pembuatan karya ilmiah ini, dan orang tua kami yang selalu

menyemangati dan memberi dukungan kepada kami.

Daftar Pustaka

Badan Pusat Statistik (2015): Kepulauan Bangka Belitung dalam Angka, *BPS Provinsi Kepulauan Bangka Belitung*, 11-14.

Bi, Yunfeng, Mengge Yan, Xiaozhou Dong, Zhuang Li, Ying Zhang, Ying Li. 2018. Recognition of 25 natural geological samples using a modified correlation analysis method and laser-induced breakdown spectroscopic data. *Elsevier Optik* 158 (2018) 1058-1062.

Hanini, Fildzia Irsina. 2017. Studi Petrografi dan Geokimia Terhadap Distribusi Unsur Tanah Jarang Pada Lapukan Granit di Pulau Bangka. Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung.

Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., Delvaux, B., 2005. Halloysite clay minerals: a review. *Clay Miner.* 40 (4), 383–426.

Ma, Denglong, Jianqiang Deng, Zaoxiao Zhang. 2013. Correlation analysis for online CO₂ leakage monitoring in geological

sequestration. *Elsevier Energy Procedia* 37 (2013) 4374-4382.

Meimaroglou, Nikiforos dan Charalampos Mouzakis. 2019. Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars. *Construction and Building Materials* 221 (2019) 27-39.

Newman, A. C. D., 1987. *Chemistry of Clays and Clay Minerals*. London: Mineralogical Society Monograph No. 6.

Strawn, Daniel G. dan Donald L. Sparks. 1999. The Use of XAFS to Distinguish Between Inner and Outer Sphere Lead Adsorption Complexes on Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science* 216, 257-269.

Verplanck, Philip L., 2017. The role of fluids in the formation of rare earth element deposits. *Procedia Earth and Planetary Science* 17 (2017) 758-761.

Wainippee, Wimolporn, Javier Cuadros, Mark A. Sephton, Catherine Unsworth, Martin G. Gill, Stanislav Strekoptytov, Dominik J.

Weiss. The effects of oil on As(V) adsorption on illite, kaolinite, montmorillonite and chlorite. *Elsevier Geochimica et Cosmochimica Acta* 121 (2013) 487-502.

Yang, Meijun, Xiaoliang Liang, Lingya Ma, Jian Huang, Hongping He, Jianxi Zhu. 2019. Adsorption of REEs on kaolinite and halloysite: A link to the REE distribution on clays in the weathering crust of granite. *Elsevier Chemical Geology* 525 (2019) 210-217.

Yuan, Peng, Daoyang Tan, Faiza Annabi-Bergaya. 2015. Properties and Applications Of Halloysite Nanotubes: Recent Research Advances and Future Prospects. *Elsevier Applied Clay Science* 112-113 (2015) 75-93.

Zaqyah, Irene. 2016. Morfologi dan Beberapa Sifat Kimia Tanah Pada Lahan Pertanian Ubi Kayu (*Manihot esculenta* Crantz) dan Kebun Campuran di Desa Adi Jaya Kecamatan Terbanggi Besar, Kabupaten Lampung Tengah. *Digital Repository UNILA*.

Zhou, Yang, Di-Rong Chen. 2020. The optimal rate of canonical correlation analysis for stochastic processes. *Elsevier Journal of Statistical Planning and Inference* 207 (2020) 276-287.