



# JURNAL GEOSAINS TERAPAN

VOLUME 5 NO. 1 | JULI 2022 | DEPARTEMEN GEOSAINS FMIPA UI

**REZKY ADITIYO, DWIHARSO NUGROHO, NURCAHYO I. BASUKI, RIZA AGUSTIANA,  
ANOM PRASETYA**

- 1 – 5 Diagenetic Controls on Carbonate Reservoir Quality of Kujung I Formation in KE-2  
Field, East Java Basin, East Java

**MEIDYANA AULISTI, REZKY ADITIYO**

- 6 – 11 Analisis Fasies dan Lingkungan Pengendapan Batuan Karbonat Formasi Klapanunggal,  
Kecamatan Klapanunggal, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat

**ISKANDARSYAH, URWATUL WUSQA, SATRIA AJIDARMA HADIKUSUMO**

- 12 – 18 Analisis Potensial Longsor Menggunakan Investigasi Metode di Sumedang, Indonesia

**MICHELLAIN MILLENIA SETYOWARDHANI, REZKY ADITIYO, M. RIZQY**

**SEPTYANDY**

- 19 – 29 Identifikasi Fasies Menggunakan Metode Pembelajaran Mesin pada Formasi Pucangan,  
Daerah Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur

**NURSANITA IMAN SARI, DYAH NINDITA SAHDARANI, FELIX MULIA HASUDUNGAN  
SIHOMBING**

- 30 – 37 Karakteristik dan Pemodelan Lapisan Batuan Non-Batu Bara untuk Identifikasi  
Persebaran Potensi Pembentukan Air Asam Tambang di Area Tambang Air Laya,  
Sumatera Selatan

# JURNAL GEOSAINS TERAPAN

Volume 5, No. 1, Juli 2022

Jurnal Geosains Terapan (J. Geos T.) adalah jurnal nasional yang dipublikasikan dua kali setahun oleh Pusat Studi Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Indonesia.

Jurnal Geosains Terapan memberikan kesempatan bagi kontributor untuk menuliskan paparan ilmiah untuk mendukung atau berhubungan dengan ilmu kebumian, meliputi: Geologi, Geofisika, Geokimia, Geodesi, Geomorfologi, Geografi Fisik, dan terapannya. Jurnal Geosains Terapan akan dipublikasikan dalam bentuk buku jurnal dan jurnal *on-line*.

## DEWAN REDAKSI JURNAL GEOSAINS TERAPAN

<b>Penasehat</b>	:	Dekan FMIPA UI
<b>Pengarah</b>	:	Manajer Riset dan Pengabdian Masyarakat FMIPA UI
<b>Penanggungjawab</b>		
Pimpinan Redaksi	:	Dr. Supriatna, MT
Wakil Pimpinan Redaksi	:	Eko Waludi, ST, M. Si.
<b>Dewan Editor</b>		
Ketua	:	Sukiato Khurniawan, M.Sc., FMIPA UI
Anggota	:	Winda Novianti, M.Sc., FMIPA UI
		Abd Hafidz, M.T., FMIPA UI
		Prof. Dr. Jan Sopaheluwakan, LIPI
		Dr. Idwan Suhardi, Kemenristek RI
		Dr. Agus Guntoro, Universitas Trisakti
		Dr. Ildrem Safri, Unpad
		Dede Djuhana, M. Si., Ph. D., FMIPA UI
		Dr. Supriyanto, FMIPA UI
		Dr. Suryantini, ITB
		Dr. <i>rer. nat.</i> Abdul Haris, FMIPA UI
		Dr. Khasani, ST, M.Eng., UGM
		Dr. Yuni Krisyuningsih Krisnandi, FMIPA UI
<b>Redaktur Pelaksana</b>	:	Elisha Christy Rotua BR Tobing, S.Si.
	:	Luthfi Yufajjiru Surya Dharma, S.Si
<b>Keuangan</b>		
Staf Administrasi	:	Agus Riyanto, S.Si

## JURNAL GEOSAINS TERAPAN

ISSN: 2502-468X (media cetak)

SK ISSN: 0005.2502468X/JL.3.1?SK.ISSN/2016.2 (15 Februari 2016)

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](mailto:jgt@sci.ui.ac.id)

## DAFTAR ISI

Diagenetic Controls on Carbonate Reservoir Quality of Kujung I Formaion in KE-2 Field, East Java Basin, East Java <b>Rezky Aditiyo, Dwiharso Nugroho, Nurcahyo I. Basuki, Riza Agustiana, Anom Prasetya</b> .....	1 – 5
Analisis Fasies dan Lingkungan Pengendapan Batuan Karbonat Formasi Klapanunggal, Kecamatan Klapanunggal, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat <b>Meidyana Aulisti, Rezky Aditiyo</b> .....	6 – 11
Analisis Potensial Longsor Menggunakan Investigasi Metode di Sumedang, Indonesia <b>Iskandarsyah, Urwatul Wusqa, Satria Ajidarma Hadikusumo</b> .....	12 – 18
Identifikasi Fasies Menggunakan Metode Pembelajaran Mesin pada Formasi Pucangan, Daerah Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur <b>Michellain Millenia Setyowardhani, Rezky Aditiyo, M. Rizqy Septyandy</b> .....	19 – 29
Karakteristik dan Pemodelan Lapisan Batuan Non-Batu Bara untuk Identifikasi Persebaran Potensi Pembentukan Air Asam Tambang di Area Tambang Air Laya, Sumatera Selatan <b>Nursanita Iman Sari, Dyah Nindita Sahdarani, Felix Mulia Hasudungan</b> .....	30 – 37
<b>Sihombing</b>	

## Diagenetic Controls on Carbonate Reservoir Quality of Kujung I Formation in KE-2 Field, East Java Basin, East Java

Rezky Adityo<sup>1</sup>, Dwiharso Nugroho<sup>2</sup>, Nurcahyo Indro Basuki<sup>2</sup>, Riza Agustiana<sup>3</sup>, and Anom Prasetya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geology Study Program, Geoscience Department, FMIPA, Universitas Indonesia,

Kampus UI Depok, Jalan Margonda Raya, Pondok Cina, Beji, Depok 16424, West Java, Indonesia

<sup>2</sup> Geological Engineering Study Program, Faculty of Earth Sciences and Technology (FITB), Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, West Java, Indonesia

<sup>3</sup> PT. Pertamina WMO

PHE Tower, Jalan T.B. Simatupang Kav. 99, Jakarta 12520

\*Corresponding author: rezky.adityo@gmail.com

### Abstract

Early Miocene Kujung I Formation in KE-2 Field is a shelf edge barrier reef on North Madura Platform, East Java Basin. It was subsequently modified in near surface and burial diagenetic environments. Study has been made to establish the paragenetic sequence and effect of diagenesis on reservoir quality.

Rock type identification was conducted using Rock Quality Index (RQI) and Flow Zone Indicator (FZI) methods from routine core analysis data. Subsequently, thin section, SEM, and XRD analysis were carried out to find out the link between geological attributes and petrophysical properties.

Five major facies were identified: skeletal packstone, larger foraminifera wackestone, larger foraminifera packstone, coral packstone, shale, rhodolithic packstone, rhodolithic grainstone, and larger foraminifera grainstone. Diagenetic process which formed pore type and pore size is likely geological attributes controlling rock type association. Fibrous and botryoidal cement formed during shallow marine diagenesis. Subsequent exposure to a meteoric diagenetic environment resulting in leaching of high Mg calcite and aragonite, created separate vugs, moldic porosity. Burial diagenesis has resulted in compaction and stylolitization. Post burial diagenesis may result touching-vugs porosity and permeability, primarily in grain-dominated facies.

Studied interval then can be classified into 5 rock type (RT), those are RT A – touching vugs porosity, RT B – touching vugs dan separate vugs, RT C – interparticle and separate vugs, RT D – separate vugs porosity, RT E – interparticle and separate vugs porosity. The rock type could define the reservoir quality, thus important to further exploration and development planning in KE-2 Field.

### 1. Introduction

KE-2 Field is an offshore oil and gas field located on the northern part of East Java (Figure 1). Rancak and Kujung Formation were proven hydrocarbon reservoir. East-west trending Oligo-Miocene carbonate at KE-2 field is situated on the southern part of North Madura Platform as shelf edge barrier reef (Satyana and Djumlati, 2003).

Hydrocarbon discoveries started in 1973 within Kujung-II Formation, then Rancak and Kujung I Formation in early 1987. Since 2000, KE-2 field was not actively producing hydrocarbon. However, most wells are drilled on central part and few on east and west part of the structure, while the southern part and northern part of the structure remains unexplored (Figure 2). Therefore, KE-2 field is still interesting to be developed.

This study will be focused on understanding the Early Miocene Kujung I reservoir. Detailed study was carried out with cores, well logs, and available data from drilled wells to define Kujung I facies assemblages, diagenesis, and its effect on reservoir quality. Detail reservoir descriptions and determining paragenetic stages were based on core thin section analysis. Diagenetic processes and episodes responsible for generation and destruction of porosity, thus affecting reservoir quality in different lithofacies. Rock type (RT) analysis approach were conducted to reveal porosity-permeability relationship (petrophysical attributes) in response of depositional/ diagenetic processes occurred.

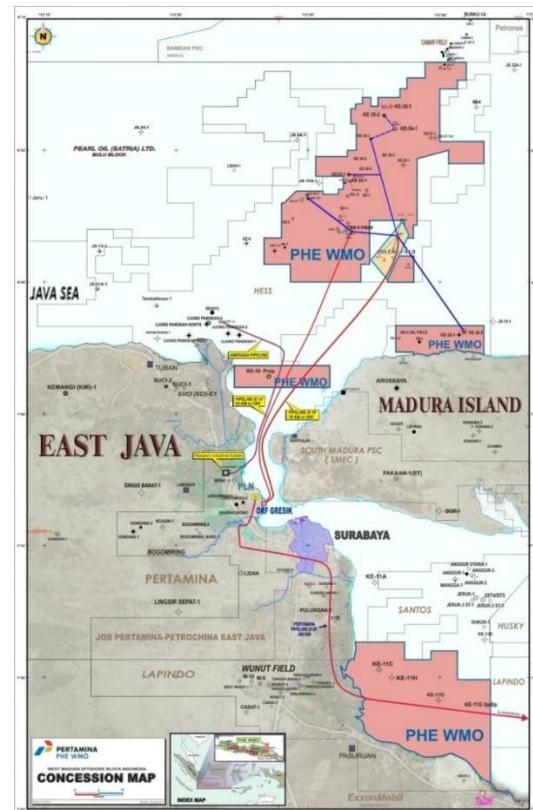


Figure 1. Study area at offshore Madura Island (green square).

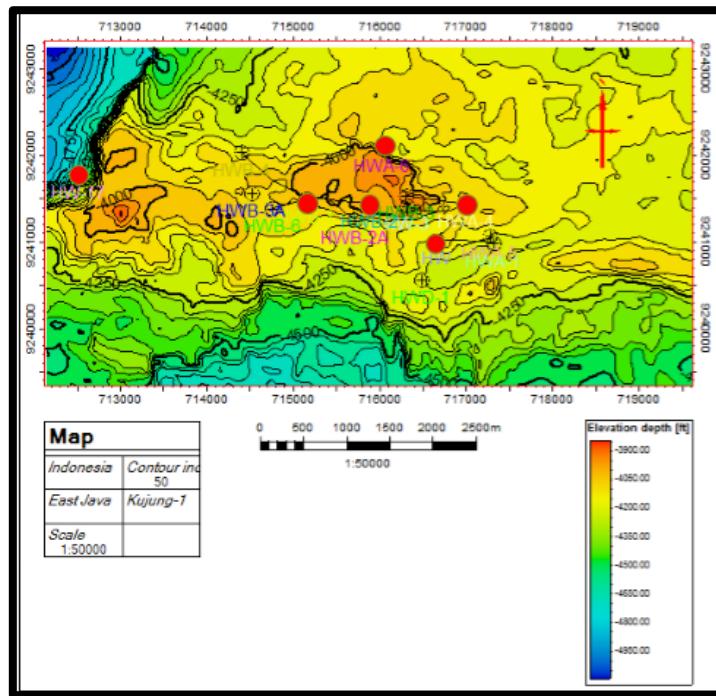


Figure 2. Depth structure map with drilled well location. Red-colored circles are wells with conventional core data.

## 2. Data and Methods

Several data were applied in this study:

- Well log from 12 wells,
- 3D seismic data (about 121,5 km<sup>2</sup>),
- 6 Conventional core, 6 sidewall core (secondary data), and 5 cuttings (secondary data) from wells,
- 114 core-derived porosity and permeability from RCAL (Routine Core Analysis),
- 17 thin section from core and sidewall core data,
- XRD (X-Ray Diffraction) analysis (secondary data), and
- 2 MICP data (Mercury Injection Capillary Pressure).

In order to build link between geological attributes (lithofacies, porosity type, cement type, etc) and petrophysical attributes (por-perm relationship), main workflow is facies and facies association identification based on core and thin section description. Diagenesis and paragenetic stages analysis were combined with core-derived porosity to build integrated rock type (RT) analysis.

Rock type were identified using the Rock Quality Index (RQI) and Flow Zone Indicator (FZI) approaches introduced by Amaefule (1993) and Abbaszadeh (1996). It is based on the previous research that the pore throat size controls petrophysical character (Abbaszadeh et al., 1996). RQI and FZI can be defined in simple equation:

$$I_{rq} = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\Phi_e}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Phi_z = \frac{\Phi_e}{1-\Phi_e} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$FZI = \frac{RQI}{(\frac{\Phi}{1-\Phi})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

with:

$I_{rq}$  (RQI) : Rock Quality Index (micron),

$k$  : permeability (mD),

$\Phi_e$  : effective porosity (%), and

$\Phi_z$  : porosity in fraction.

FZI : Flow Zone Indicator value ( $\mu\text{m}$ )

DRT (Discrete Rock Type) value was determined to yield discrete value for rock type classification:

$$\text{DRT} = \text{ROUND}(2 * \text{LN}(FZI) + 10.6) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Various FZI values will reflect a unique gradient distribution and cluster trends that represent the rock character and fluid deliverable characteristics (Amaefule, 1993, and Abbaszadeh et al., 1996). This study will emphasize thin section analysis data as a main tool to identify the pore type, pore geometry and distribution, cement type, lithofacies, and other geological aspects. The pore type was classified based on Lucia (1983, 1995) and measurement of the pore geometry following Lonoy (2006) classification.

Based on classified RT that supported by thin section data, validation should be performed to check whether RT classification are valid or not. This could be done with Mercury Injection Capillary Pressure (MICP). Moreover, capillary pressure from MICP data are useful to quantify pore geometry. This could be used to differentiate rock type based on their pressure profile on capillary pressure - brine saturation crossplot.

## 3. Results and Discussion

Based on detailed core description, Kujung I interval lithofacies are skeletal packstone, larger foraminifera wackestone and packstone, coral packstone, shale,

rhodolithic packstone, rhodolithic grainstone, and larger foraminifera grainstone. Red algae, coral, and larger foraminifera were predominant bioclast beside echinoderm, mollusc, and small benthic foraminifera.

Early diagenesis consisting of microbial micritization and precipitation of fibrous, botryoidal, and radiaxial-fibrous calcite cement within marine environment (Figure 3). The next stage of diagenesis is related to subaerial exposure or near-surface exposure. This exposure may involve vuggy (touching vugs) and moldic (separate vugs) porosity formed during this phase, coincide with precipitation of blocky calcite cement. Neomorphism was likely occurred intensively.

Burial diagenesis on later stage created stylolite, brittle-grain fracture, dissolution seam, and precipitation of drusy mosaic of equant spar. Compaction and pressure solution was responsible to those diagenetic product. Stylolite porosity developed intensively where marine diagenesis looks more active (Figure 3). XRD analysis shows that kaolinite was predominant clay mineral, whereas calcite was dominant composition as carbonate mineral. The stages of paragenetic sequence of Kujung I Formation are shown in (Figure 4). Dissolution/ leaching related to meteoric environment, creating vuggy and moldic porosity. The second phase porosity generation appears to have occurred in burial condition. Stylolite porosity and brittle fracture of grain were results of the mechanical and chemical diagenesis occurred.

Five Rock types (RT) classification were determined based on FZI, thus DRT value. Porosity and permeability plot then could be done. FZI and DRT average value on

each sample indicating that RT A has the biggest pore throat among others RT based on MICP data. Bigger pore throat means better capability to flow fluid.

Five rock types have been classified from rock type analysis (Figure 5). Crossplot between lithofacies, sorting, grain size, grain type and petrophysical rock type classification, revealed that all of these geological attribute/parameter are indirectly correlated to RT distribution.

Figure 6 shows different pressure profile indicating differences on pore throat and pore size between both samples. Considering there were only 2 MICP data on Kujung I interval were available, representing RT A and B, other Rock Types have been validated using only thin section and core description.

Generally, dominant porosity type and porosity size aspect associate with specific rock type. Hence, each rock type could be classified based on these aspects: RT A - touching vugs porosity, RT B – touching vugs and separate vugs, RT C – interparticle and separate vugs porosity, RT D – separate vugs porosity, and RT E – interparticle and separate vugs porosity (Figure 7).

#### 4. Conclusions

1. Lithofacies were described on this study are skeletal packstone, larger foraminifera wackestone, larger foraminifera packstone, coral packstone, serpih, rhodolithic packstone, rhodolithic grainstone, dan larger foraminifera grainstone.

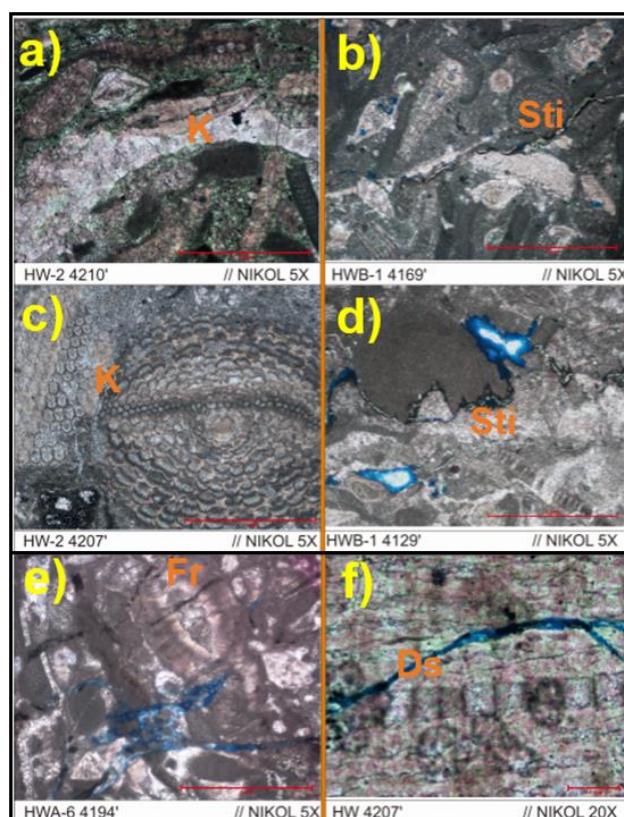


Figure 3. a-d) Compaction feature (K) and pressure solution (stylolite) in KE-2 and KE-2B1 well, the latter become initiation of porosity generation; e) and f) is fracture (Fr) and dissolution seam (Ds) in KE-2A6 and KE-2 respectively, formed by mechanical process.

No.	Diagenesis Process	Relative Timing		
		Marine Phreatic	Meteoric Phreatic	Burial
1	<b>Microbial micritization</b>			
2	<b>Fibrous cement</b>			
3	<b>Botryoidal cement</b>			
4	<b>Radial-fibrous calcite cement</b>			
5	<b>Dissolution/ leaching</b>			
6	<b>blocky calcite cement</b>			
7	<b>Neomorphism</b>			
8	<b>Compaction</b>			
9	<b>Stylolitization</b>			
10	<b>Brittle-fracture of Grain</b>			
12	<b>Semen drusy mosaic of equant spar</b>			
13	<b>Calcite fracture filling</b>			

Color	Remark
Orange	reducing porosity
Green	increasing porosity
Blue	both reducing and increasing porosity

Figure 4. Paragenetic stages of diagenesis process. Green and blue cell indicating increasing porosity processes, while the others are reducing porosity processes.

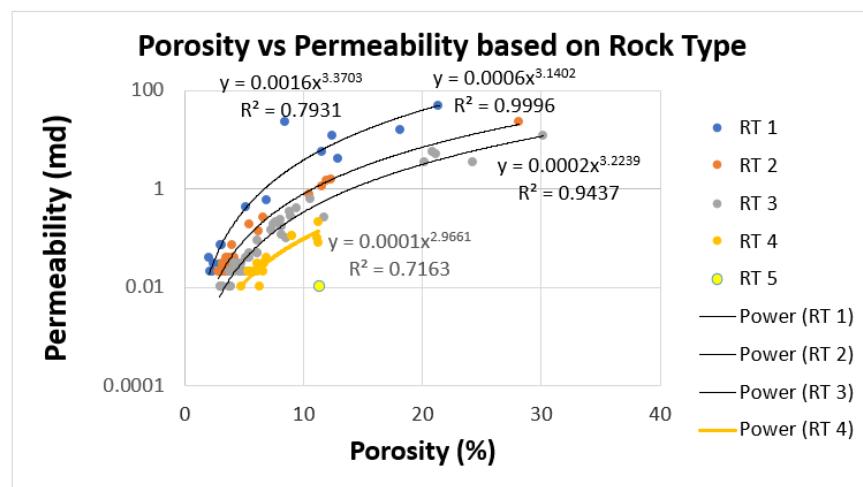


Figure 5. Porosity and permeability plot based on rock type classification. RT A distribution is at the top, to the RT E distribution at lowermost.

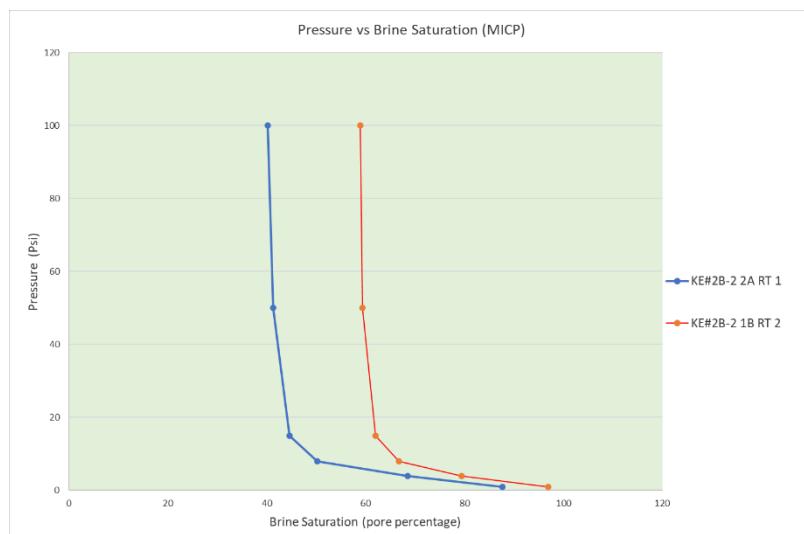


Figure 6. Capillary pressure vs brine saturation (MICP) from 2 samples representing RT A and RT B. The profile difference was used to validate Rock Type classification.

No.	Well	Textural Classification	FZI	RT	Por (%)	Perm (md)	Dominant Fragment	Others Component	Sorting	Dominant Grain Size	Dominant Porosity Type
1	KE-2B-1 4169'	Packstone	1,73	B	11,48	5,89	red algae, LBF (lepidocyclina, cyclocypris?, textularina)	Bivalve, Bryozoa	moderate	0.5-2 mm	touching vugs (solution enlarged porosity)
2	KE-2B-1 4106'	Packstone	1,4	C	2,43	0,03	Coral	Red Algae (crustose), foraminifera besar (amphistegina, lepidocyclina), small benthonic & planktonic foram, mollusk, gastropod, bryozoa	poor	0.25-1 mm	interparticle, separate vugs (intraparticle)
3	KE-2B-2 4713'	Packstone	1	C	5,5	0,19	red algae (rhodolith)	Brachiopod, small benthonic foram, LBF (rotalid, lepidocyclina, amphistegina), planktonic foram (I)	poor	0.25-1 mm	interparticle (patchy micropore), separate vugs (intraparticle)
4	KE-2B-1 4076'	Packstone	0,79	C	3,54	0,03	-	coral, LBF (lepidocyclina, amphistegina), gastropod, bryozoa, small benthonic foram	poor	0.125-2 mm	not visible
5	KE-2-1 4207'	Packstone	0,75	C	10,59	0,59	LBF (lepidocyclina, a mphistegina(b), miogypsind (Sj))	Echinoderm (lempeng echinoid?), brachiopod spine, small benthonic foram coraline red algae, bryozoa.	moderate	1-2 mm	interparticle (patchy micropore), separate vugs (intraparticle)
6	KE-2B-1 4129'	Packstone	0,72	C	3,75	0,03	Coral	LBF (amphistegina, lepidocyclina, austrotrilina (Sj)) (planorbilinid? (I)), small benthonic foram, red algae, echinoderm	very poor	0.25>4 mm	, separate vugs ((moldic micropore), intrapartikel)

Figure 7. Result example of integrated petrography-rock type analysis. Dominant porosity and pore size, likely factors controlling petrophysical properties. Sample numbers are based on well name and depth.

2. Kujung I formation experienced several diagenetic episodes in marine phreatic, meteoric phreatic, and burial, having significant role in porosity evolution. Marine cementation reducing primary porosity, while meteoric diagenesis creating secondary porosity such as touching vugs and separate vugs (moldic and intraparticle) porosity. Mechanical and chemical compaction occurred in burial environment reducing primary porosity, but tend to initiate the formation of stylolite porosity that associate with RT with a better flow properties.
3. Product of depositional processes such as lithofacies, major grain component, sorting, and grain size evidently in this case not having a direct link with petrophysical properties (RT), while diagenesis process likely control the petrophysical properties (RT classification).
4. RT A has the best flow unit capacity among others, associate with touching vugs (stylolite porosity). This type of porosity well developed in a grain supported rocks such as packstone and grainstone.
5. Additional porosity and permeability measurement and thin section data needed for further study, mainly to build a proper geological model and petrophysical properties distribution in uncored interval.

#### Acknowledgements

This study is part of author's thesis work at the Department of Geology, Institut Teknologi Bandung. The authors would like to thank Manager of Exploration PT. PHE WMO, Bintoro Wibowo,

also Arya Nugraha for the permission to use company data for study. The authors acknowledges Dir. Gen. Migas, SKK Migas, and CNOOC SES Ltd. for their permission to publish this paper. The authors would also like to thank all those who directly or indirectly helped in completion of the study.

#### References

- Abbaszadeh, M., Fujii, H., & Fujimoto, F. (1996). Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units-Theory and Applications. *SPE Formation Evaluation, SPE paper 30158*, 263-271.
- Amaefule, J.O., Altunbay, D., Tiab, D., Kersey, D.G., & Keelan, D.K. (1993). Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) unit and predict permeability in uncored intervals/wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE paper, 26436*.
- Lonoy, A. (2006). Making sense of carbonate pore systems. *AAPG Bulletin, 90*, 1381-1405.
- Lucia, F.J. (1983). Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks, a fields classification of carbonate pore space. *Bulletin of The Journal of Petroleum Technology, 35(3)*, 629-637.
- Lucia, F.J. (1995). Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *AAPG Bulletin, 79(9)*, 1275-1300.
- Satyana, A.H. & Djumlati, M. (2003): Oligo-Miocene carbonates of the East Java Basin, Indonesia: facies definition leading to recent significant discoveries. *AAPG International Conference, Barcelona*.

## **Analisis Fasies dan Lingkungan Pengendapan Batuan Karbonat Formasi Klapanunggal, Kecamatan Klapanunggal, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat**

Meidyana Aulisti\* dan Rezky Aditiyo

Program Studi Geologi, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,  
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia  
\*Narahubungan: mardiyansuciati@gmail.com

### **Abstrak**

**Abstrak** Daerah penelitian terletak pada Formasi Klapanunggal yang berlokasi di Kecamatan Klapanunggal, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Formasi Klapanunggal merupakan salah satu formasi yang mengisi Cekungan Bogor pada umur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir dan terdiri atas litologi batugamping. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui fasies dan lingkungan pengendapan pada Formasi Klapanunggal selama formasi ini terendapkan. Metode yang digunakan yaitu analisis data lapangam (deskripsi dan *measuring section*) dan analisis laboratorium (petrografi). Berdasarkan analisis secara lanjut, Formasi Klapanunggal menghasilkan 6 fasies karbonat diantaranya *Bioclastic Wackstone* (FK 1), *Bioclastic Packstone* (FK 2), *Bioclastic Rudstone* (FK 3), *Larger Foraminifera Rudstone* (FK 4), *Larger Foraminifera Grainstone* (FK 5), dan *Bioclastic Bindstone* (FK 6) serta 3 asosiasi fasies lingkungan pengendapan yaitu *Platform Margin Reef* (AF 1), *Platform Interior-Normal Marine (Open Marine)* (AF 2), dan *Platform Interior-Restricted* (AF 3).

**Kata kunci:** Fasies, Formasi Klapanunggal, Batugamping, Foraminifera, Asosiasi Fasies

## 1. Pendahuluan

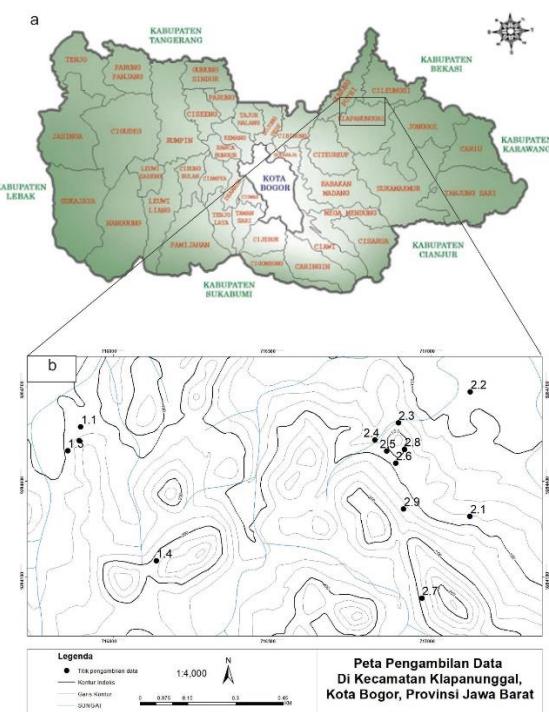
Formasi Klapanunggal merupakan salah satu Formasi pengisi Cekungan Bogor yang diendapkan pada umur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir yang berisikan litologi batugamping, dengan ciri batugamping terumbu (Reminton & Nasir, 1986). Seperti yang kita ketahui, batuan karbonat sangat berperan penting dalam industri permifyakan, yaitu sebagai media penyimpan minyak bumi (reservoir). Oleh karena itu studi fasies ini dilakukan untuk memberikan informasi mengenai lingkungan pengendapan. Hal ini dapat diketahui melalui analisis karakteristik sedimentologi dan paleontologinya secara keseluruhan yang dikandung oleh batuan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik fasies karbonat dan lingkungan pengendapan yang terjadi pada Formasi Klapanunggal. Fasies karbonat sendiri merupakan hasil dari proses berlangsungnya pengendapan.

Secara fisiografis, Formasi Klapanunggal terdapat di Zona Bogor. Formasi ini merupakan salah satu formasi yang mengisi Cekungan Jawa Barat Utara dan Cekungan Bogor (Martodjojo, 2003; Suyono, et al. 2005) Formasi Klapanunggal terdiri atas litologi penyusun yaitu batugamping terumbu (Reminton & Nasir, 1986).

## **2. Metode Penelitian**

Lokasi penelitian dilakukan di Formasi Klapanunggal yang berada di Kecamatan Klapanunggal, Bogor, Jawa Barat (Gambar 1.a). Objek penelitian difokuskan pada batugamping yang tersebar di daerah penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang didapatkan langsung dari lapangan. Data ini berupa data log stratigrafi dan data hasil deskripsi petrografi. Kedua data tersebut akan diolah lebih lanjut

untuk ditentukannya fasies karbonat daerah penelitian. Alur penelitian digambarkan pada Gambar 2.



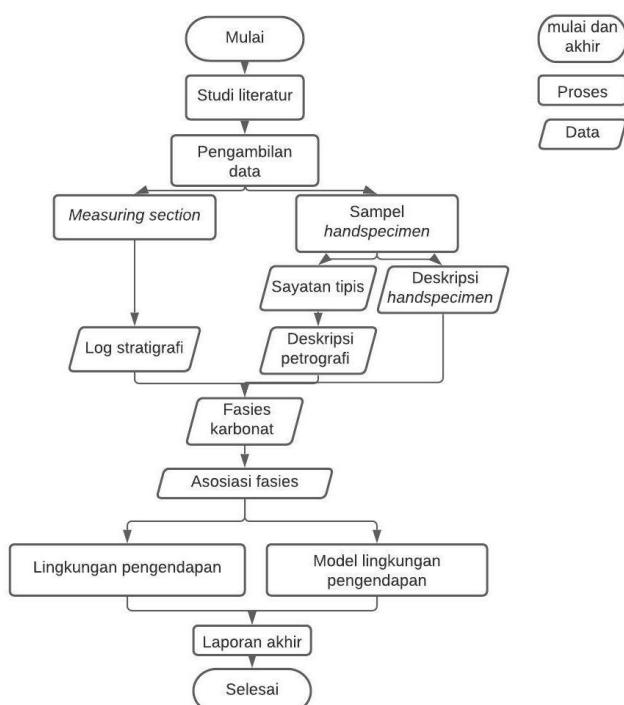
Gambar 1. (a) Lokasi penelitian pada peta Kabupaten Bogor (kotak merah); (b) Lokasi titik pengambilan sampel.

Dua puluh delapan sampel batuan yang didapatkan dari lapangan Formasi Klapanunggal menghasilkan tiga puluh tujuh sampel sayatan tipis. Sampel sayatan tipis ini dianalisis dengan mikroskop di laboratorium departemen Geosains Universitas Indonesia. Mikroskop yang digunakan yaitu mikroskop polarisasi Olympus POS dengan perbesaran mikroskop sebesar 400x (perbesaran

mikroskop sama dengan perbesaran lensa objektif dikalikan dengan perbesaran lensa okuler).

Beberapa hal yang diidentifikasi secara petrografi diantaranya tekstur, matriks, porositas, tipe semen, fosil, sortasi, ukuran butir dan kandungan mineral. Penamaan fasies karbonat mengacu pada Dunham (1962) modifikasi Embry & Klovan (1971) sedangkan untuk merekonstruksi lingkungan pengendapan menggunakan zona fasies oleh Wilson (1975).

Lokasi titik pengambilan sampel pada Gambar 1.b tersebar di beberapa lokasi. Sampel diambil secara berurutan dari lapisan tertua hingga muda dengan melihat kemenerusan singkapan dari bagian bawah hingga bagian atas dari singkapan. Pengambilan sampel di lapangan menghasilkan log stratigrafi pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram alur penelitian.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Ketiga puluh tujuh sampel sayatan tipis dikategorikan ke dalam fasies karbonat. Terdapat 6 fasies karbonat daerah penelitian yaitu (1) *Bioclastic Wackstone*, (2) *Bioclastic Packstone*, (3) *Bioclastic Rudstone*, (4) *Larger Foraminifera Rudstone*, (5) *Larger Foraminifera Grainstone*, dan (6) *Bioclastic Bindstone*.

#### 1. FK 1: Bioclastic Wackstone

*Bioclastic wackstone* memiliki ketebalan 1 m yang tersebar di barat daya daerah penelitian. Secara singkapan, memiliki warna abu-abu dengan fosil >2 mm yang sangat jarang keterdapatannya. Sedangkan secara petrografi didominasi oleh matriks dengan porositas *channel*, semen *fibrous* dan *blocky*, serta memiliki sortasi yang baik dengan derajat kebundaran *sub-rounded* yang berisikan fosil koral, bivalvia dan brachiopoda.

#### 2. FK 2: Bioclastic Packstone

*Bioclastic packstone* memiliki ketebalan 0,4–1 m yang terletak di barat daya daerah penelitian. Secara singkapan, umumnya *bioclastic packstone* memiliki warna putih kecoklatan dengan fosil >2mm yang jarang keterdapatannya. Sedangkan secara petrografi, didominasi oleh matriks dengan porositas *vuggy* dan *channel* dan tipe semen *fibrous* dan *blocky*, serta memiliki sortasi yang baik dengan derajat kebundaran *sub-rounded* yang berisikan fosil koral, dan bivalvia.

#### 3. FK 3: Bioclastic Rudstone

*Bioclastic rudstone* memiliki ketebalan 0,4–5 m, beberapa terdapat fosil jejak dan tersebar di seluruh daerah penelitian. Secara singkapan, umumnya memiliki warna abu-abu. Sedangkan secara petrografi, *bioclastic rudstone* beberapa didominasi oleh matriks dan beberapa didominasi oleh butiran, dengan porositas *vuggy*, *interpartikel*, *intrapartikel*, *fracture*, dan *moldic* dengan tipe semen *bladed* dan *blocky*, serta memiliki sortasi yang baik hingga buruk, dengan derajat kebundaran *sub-rounded* hingga *sub-angular*, yang berisikan fosil-fosil foraminifera bentonik, echinodermata, koral, bivalvia, dan brachiopoda.

#### 4. FK 4: Larger Foraminifera Rudstone

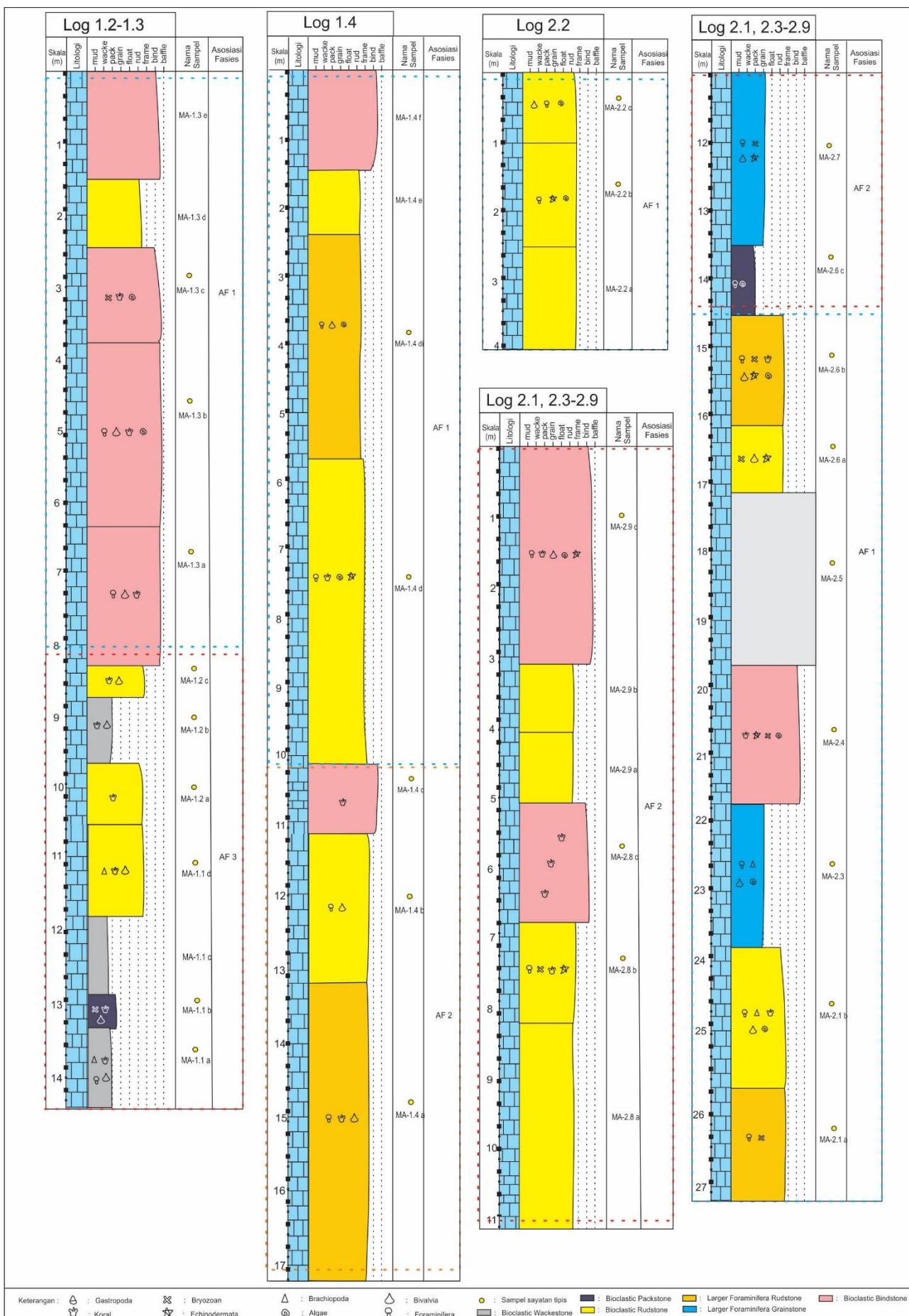
*Larger foraminifera rudstone* umumnya memiliki ketebalan 1,5–4 m yang tersebar di barat daya daerah penelitian. Secara singkapan, umumnya *bioclastic rudstone* memiliki warna krem. Sedangkan secara petrografi, *larger foraminifera rudstone* didominasi oleh oleh butiran, dengan porositas *vuggy*, *channel*, *intrapartikel*, *fracture*, dan *moldic* dengan tipe semen *bladed* dan *blocky*, serta memiliki sortasi yang buruk, dengan derajat kebundaran *sub-rounded* hingga *sub-angular*, yang berisikan fosil foraminifera bentonik (*imperforate test* dan *perforate test*), dan fosil lain korall, alga, echinodermata, bivalvia.

#### 5. FK 5: Larger Foraminifera Grainstone

*Larger foraminifera grainstone* yang memiliki ketebalan 2–2,5 m dan terletak di tenggara peta daerah penelitian, Secara singkapan, umumnya *larger foraminifer grainstone* memiliki warna abu-abu kecoklatan. Secara petrografi, *larger foraminifera rudstone* didominasi oleh butiran, dengan porositas *vuggy*, dan *channel* dengan tipe semen *bladed*, serta memiliki sortasi yang buruk hingga sedang, dengan derajat kebundaran *sub-rounded* hingga *sub-angular*, yang berisikan fosil foraminifera bentonik (*perforate test* dan *imperforate test*), dan fosil lainnya alga, bivalvia dan echinodermata.

#### 6. FK 6: Bioclastic Bindstone

*Bioclastic bindstone* memiliki ketebalan 1–3 m, dengan porositas semakin ke atas semakin membesar dan tersebar di seluruh daerah penelitian. Secara singkapan, umumnya *bioclastic bindstone*



Gambar 3. Log stratigrafi daerah penelitian. Log stratigrafi dibagi kedalam empat log, yaitu MA-1.1 hingga MA-1.3, MA-1.4, MA-2.2 dan MA-2.3, MA-2.3 hingga MA-2.9. (Keterangan warna: Abu-abu=Bioclastic Packstone, Kuning=Bioclastic Rudstone, Jingga=Larger Foraminifera Rudstone, Biru=Larger Foraminifera Grainstone, Merah Muda=Bioclastic Bindstone)

memiliki warna krem kecoklatan dan banyak ditemukan fosil koral. Sedangkan secara petrografi, *bioclastic bindstone* didominasi oleh butiran, dengan porositas *vuggy*, interpartikel, intrapartikel, *fracture*, dan *moldic* dengan tipe semen *bladed*, *fibrous* dan *blocky*, serta memiliki sortasi yang baik hingga buruk, dengan derajat kebundaran *sub-rounded* hingga *sub-angular*, yang berisikan fosil dominan koral, diikuti bivalvia, bryozoa, alga, echinodermata dan foraminifera bentonik

Keenam fasies ini dapat menunjukkan hubungan antarfasis yang menunjukkan lingkungan pengendapan fasies-fasies tersebut, sehingga dibuatlah asosiasi antarfasis. Asosiasi ini dibuat berdasarkan hubungan fasies satu dengan lainnya yang dapat dilihat pada log stratigrafi Gambar 3. Terdapat 4 log stratigrafi daerah penelitian, diantaranya Log 1.1 - 1.3, Log 1.4, Log 2.2 dan Log 2.1, 2.3-2.9.

Berdasarkan analisis asosiasi fasies, dihasilkan 3 asosiasi fasies pada daerah penelitian, diantaranya yaitu AF 1 pada lingkungan *platform-margin reef*, AF 2 *platform interior-normal marine (open marine)*, dan AF 3 *platform interior-restricted* (Tabel 1).

Tabel 1. Asosiasi fasies penelitian

Kode Fasies	Fasies Karbonat	Zona Fasies (Wilson, 1975)
AF 1	FK 3, FK 4, FK 5, dan FK 6	<i>Platform-Margin reef</i>
AF 2	FK 2, FK 3, FK 4, FK 5, dan FK 6	<i>Platform Interior-Normal Marine (Open Marine)</i>
AF 3	FK 1, FK 2, dan FK 3	<i>Platform Interior-Restricted</i>

#### 1. AF 1: Lingkungan *platform-margin reef*

AF 1 terdiri atas batuan rudstone, grainstone dan bindstone, menurut Flugel (2004) tekstur-teksutri ini dapat ditemui pada lingkungan *platform-margin reef*. Organisme yang terdapat pada AF 1 merupakan organisme reef builder seperti koral, alga merah (*coralline*), bryozan, bivalvia dan foraminifera (Maxwell 1968; Purdy 1974 dalam Sallam & Ruban, 2020). Adanya biota seperti echinodermata, bivalvia, algae dan koral ini menunjukkan bahwa lingkungan yang ditempatinya merupakan lingkungan dengan salinitas *marine (euhaline)* (Flugel, 2004) dengan kondisi lingkungan oligotrophic (Hallock & Schlager, 1986; Flugel, 2004; Amirshahkarami & Karavan, 2015). Berdasarkan adanya kelimpahan alga merah yang *encrusting* pada AF 1 mengindikasikan zona dengan energi yang tinggi (Hussain & Al-Ramadan, 2009) dan alga merah (*coralline*) juga menunjukkan lingkungan dengan kedalaman 20 hingga 80 (Flugel, 2004).

#### 2. AF 2: Platform interior-normal marine (open marine)

AF 2 yang terdiri atas batuan grainstone dan packstone (Flugel, 2004) serta keberagaman foraminifera dengan perforate test (*Miogypsina* sp.,

*Sphaerogypsina* sp. dan *Lepidocylinidae*) dan *imperforate test (milliolid)* hal ini menunjukkan lingkungan *open marine* (Dupraz & Strasser, 2002; Banerjee et al., 2018). Keberagaman *perforate test* foraminifera juga dapat menunjukkan zona euphotic hangat dengan lingkungan yang dangkal pada bagian *interior platform* (Geel, 2000; Corda dan Brandano, 2003; Bassi et al., 2007; Boudagher-Fadel, 2008). Organisme lainnya yang dapat ditemukan yaitu alga *coralline* dan foraminifera *Miogypsinaoids* sp. Alga dapat mengindikasikan lingkungan dengan kedalaman <250m bergantung pada spesiesnya (Flugel, 1982) sedangkan foraminifera *Miogypsinaoids* sp. mencirikan lingkungan dangkal dengan salinitas yang normal (Geel, 2000 dalam Amirshahkarami & Karavan, 2015). Butiran batuan dengan derajat kebundaran *sub-angular* hingga *rounded* dengan komponen matriks <50% dan fosil beragam yang dimiliki oleh AF 2, menunjukkan lingkungan dengan energi yang rendah hingga *moderate* (Flugel, 2004).

#### 3. AF 3: Platform interior-restricted

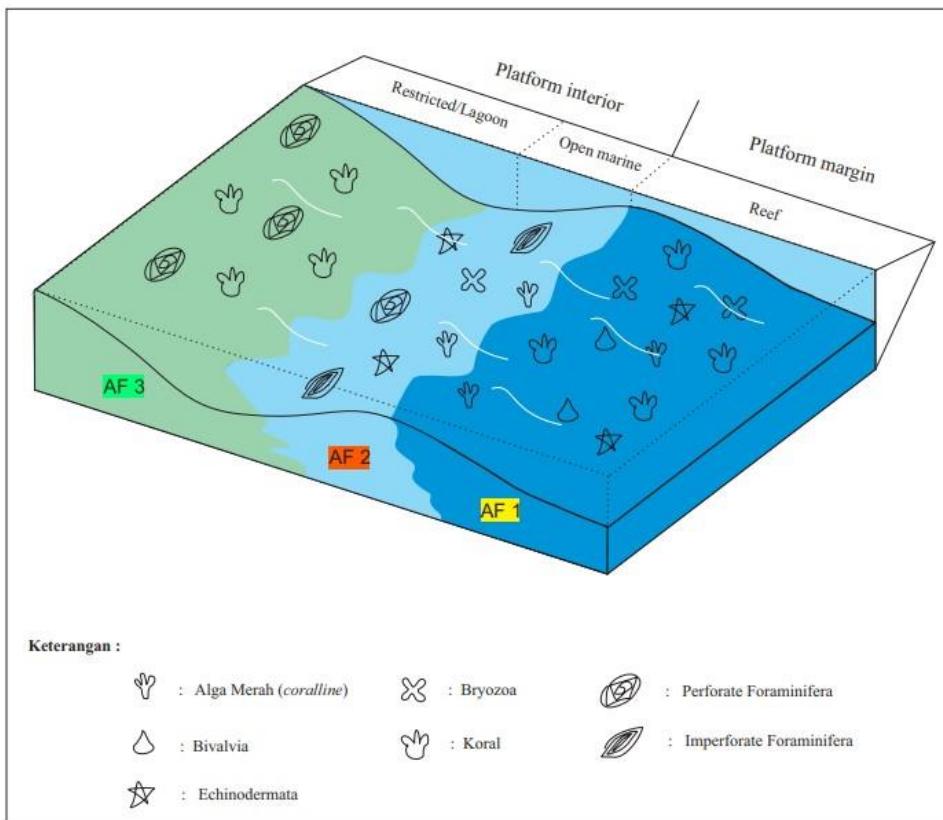
AF 3 yang terdiri atas batuan wackestone dan packstone yang memiliki kelimpahan mikrit, dan mengandung koral dari hasil transportasi yang tercampur dengan foraminifera, hal ini menunjukkan lingkungan pengendapan *lagoonal*, dengan lingkungan *mesophotic* hingga *oligophotic* berenergi rendah (Folk, 1965; Pomar, 2001; Zamagni et al., 2007; Novak et al., 2013; Mihaljevic et al., 2014). Organisme lainnya pada AF 3 seperti milliolid foraminifera, koral (*sclerectina* dan *coral reef*) dan alga merah dapat menunjukkan ciri lingkungan. Milliolid foraminifera menunjukkan lingkungan pengendapan *restricted* (Banerjee et al., 2018) dengan kedalaman yang sangat dangkal (Geel, 2000 dalam Habibi, 2016) dengan salinitas yang normal hingga *hypersaline* (Flugel, 2004). Sedangkan koral (*sclerectina* dan *coral reef*) dan alga merah, menunjukkan kedalaman kurang dari 100 m (Flugel, 2004).

Skema model lingkungan pengendapan daerah penelitian (Gambar 4) merujuk pada zona fasies oleh Wilson (1975).

#### 4. Kesimpulan

Terdapat tiga lingkungan pengendapan pada daerah penelitian, diantaranya yaitu:

1. *Platform margin reef*, yang terdiri atas *bioclastic rudstone*, *larger foraminifera rudstone*, *larger foraminifera grainstone* dan *bioclastic bindstone*. Lingkungan ini memiliki ciri dengan energi yang tinggi, salinitas yang normal dan pada kedalaman 20 hingga 80 meter pada lingkungan yang dangkal.
2. *Platform interior-Normal marine*, yang terdiri atas *bioclastic packstone*, *bioclastic rudstone*, *larger foraminifera rudstone*, *larger foraminifera*



Gambar 4. Skema model lingkungan pengendapan daerah penelitian. Lingkungan AF 1 dengan biota *reef building* (koral, bryozoa, echinodermata, bivalvia dan alga), AF 2 dengan *perforate* dan *imperforate* foraminifera serta alga, bryozoa dan echinodermata, dan AF 3 dengan *imperforate* foraminifera dan koral pada packstone/wackstone (tanpa skala).

grainstone dan *bioclastic bindstone*. Lingkungan ini memiliki ciri dengan energi yang rendah hingga *moderate*, salinitas normal dan terjadi pada kedalaman dangkal (<250m).

3. *Platform interior-Restricted*, yang terdiri atas *bioclastic wackstone*, *bioclastic packstone*, dan *bioclastic rudstone*. Lingkungan ini memiliki ciri dengan energi yang rendah, salinitas normal hingga *hypersaline* dan terjadi pada lingkungan yang dangkal (<100m).

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih dipanjatkan kepada Bapak Rezky Aditiyo, M.T. yang telah meluangkan tenaga serta waktunya untuk membimbing penulis dari awal berlangsungnya penelitian hingga jurnal ini diterbitkan.

### Daftar Pustaka

- Amirshahkarami, M. & Karavan, M. (2015). Microfacies models and sequence stratigraphic architecture of the Oligocene-Miocene Qom Formation, south of Qom City, Iran. *Geoscience Frontiers* 6(4), 593-604.
- Banerjee, S., Khanolkar, S. & Saraswati, P.K. (2018). Facies and depositional settings of the Middle Eocene-Oligocene carbonates in Kutch. *Geodinamica Acta* 30(1), 119-136.
- Bassi, L., Boni, E., Dallai, A., Guidi, F., Ricci, S., & Tortoli, P. (2007). 8A-2 ULA-OP: A Novel ULtrasound Advanced Open Platform for Experimental Research. In 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings.
- Bondy, S.C. & Purdy, J.L. (1974). Selective regulation of the blood-brain barrier by sensory input. *Brain Res* 76(3), 542-5.
- Boudaughier-Fadel, M.K. (2018). *Evolution and geological significance of larger benthic foraminifera*. UCL Press.
- Corda, L. & Brandano, M. (2003). Aphotic zone carbonate production on a Miocene ramp, Central Apennines, Italy. *Sedimentary Geology* 161(1-2), 55-70.
- Dunham, R.J. (1962). *Classification of carbonate rocks according to depositional textures*.
- Dupraz, C. & Strasser, A. (2002). Nutritional modes in coral-Microbialite reefs (Jurassic, Oxfordian, Switzerland): Evolution of trophic structure as a response to environmental change. *Palaios* 17(5), 449-471.
- Embry, A.F., & Klovan, J.E. (1971). A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 19(4), 730-781.
- Flügel, E. (1982). Evolution of Triassic reefs: current concepts and problems. *Facies* 6(1), 297-327.
- Flügel, E. (2004). Microfacies data: fabrics. In *Microfacies of carbonate rocks*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Folk, R. L. (1965). Some aspects of recrystallization in ancient limestones.
- Geel, T. (2000). Recognition of stratigraphic sequences in carbonate platform and slope deposits: empirical models based on microfacies analysis of paleogene deposits in

- southeastern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 155, 211–238.
- Habibi, T. (2016). Biostratigraphy, paleoenvironment and foraminiferal associations of the Rupelian-Chattian sediments in Zagros Basin, SW Iran. *Journal of African Earth Sciences* 123, 370-380.
- Hallock, P. & Schlager, W. (1986). Nutrient excess and the demise of coral reefs and carbonate platforms. *Palaios*, 389-398.
- Hussain, M. & Al-Ramadan, K. (2009). Microfacies analysis of Wadi Waqb member (Miocene) in Wadi Aynunah, northwest of Saudi Arabia. *Carbonates and Evaporites* 24(2), 139-149.
- Martodjojo, S. (2003). *Evolusi Cekungan Bogor Jawa Barat*. Bandung: Penerbit ITB.
- Maxwell, W.G.H. (1968). *Atlas of the great barrier reef*.
- Mihaljević, M., Renema, W., Welsh, K. & Pandolfki, J. M. (2014). Eocene-Miocene Shallow-water Carbonate Platforms and Increased Habitat Diversity in Sarawak, Malaysia. *Palaios* 29(7), 378-391.
- Novak, V., Santodomingo, N., Rösler, A., Di Martino, E., Braga, J.C., Taylor, P.D. & Renema, W. (2013). Environmental reconstruction of a late Burdigalian (Miocene) patch reef in deltaic deposits (East Kalimantan, Indonesia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 374 110-122.
- Pomar, L. (2001). Types of carbonate platforms: a genetic approach. *Basin research* 13(3), 313-334.
- Purdy, E.G. (1974). Reef configurations: cause and effect. In: Laporte LF (ed) *Reefs in time and space, vol 18*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, pp 9–76.
- Reminton, C.H. & Nasir, H. (1986), Potensial Hidrokarbon Pada Batuan Karbonat Miosen Jawa Barat Utara. *PIT IAGI XV, Yogyakarta*.
- Sallam, E.S. & Ruban, D.A. (2020). Facies analysis and depositional environments of the Miocene syn-rift carbonate-siliciclastic rock packages in the northwest Gulf of Suez, Egypt. *Carbonates and Evaporites* 35(1), 1-20.
- Suyono, K.S. (2005). Exploration In West Java: Play Concepts In The Past, Present And Future, Efforts To Maintain Reserves Growth. *Thirtieth Annual Convention & Exhibition, Proceedings, Indonesian Petroleum Association*.
- Wilson, J. L. (1975). The lower carboniferous Waulsortian facies. In *Carbonate facies in geologic history*. Springer, New York, NY.
- Zamagni, J., Mutti, M. & Košir, A. (2008). Evolution of shallow benthic communities during the Late Paleocene-earliest Eocene transition in the Northern Tethys (SW Slovenia). *Facies* 54(1), 25-43.

# Analisis Potensial Longsor Menggunakan Investigasi Metode di Sumedang, Indonesia

Iskandarsyah, Urwatal Wusqa, Satria Ajidarma Hadikusumo

Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Indonesia,  
Kampus UI Depok, Jalan Margonda Raya, Pondok Cina, Beji, Depok 16424, West Java, Indonesia

\*Narahubung: iskandarsyah17@ui.ac.id

## Abstrak

Longsor yang terjadi pada beberapa bulan belakangan menjadi bencana yang serius di daerah Sumedang, Jawa Barat, Indonesia. Pada awal tahun 2021, terdapat kejadian longsor yang mengakibatkan 64 orang menjadi korban. Telah dilakukan beberapa penelitian oleh pemerintah untuk menentukan penyebab terjadinya longsor di lokasi tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendeteksi lokasi lain di daerah ini yang memiliki potensi longsor. Pendekatan pertama yang dilakukan adalah pendekatan regional berdasarkan data satelit untuk mengklasifikasikan informasi potensi berdasarkan data kemiringan lahan dan tutupan lahan dari data *remote sensing*. Pendekatan kedua adalah pendekatan investigasi secara lokal menggunakan GPR yang merupakan metode elektromagnetik. Metode ini dapat mendeteksi keberadaan *microcracking* yang terdapat di bawah permukaan untuk mengevaluasi klasifikasi longsor dari data *remote sensing*. Berdasarkan analisis *microcracking*, dihasilkan daerah aman dari longsor dengan klasifikasi secara kualitatif dari potensi tinggi ke rendah.

**Kata kunci:** Longsor, Sumedang, GPR, *Microcracking*, *Remote Sensing*.

## Abstract

*Landslides in the last few months became a serious disaster in Sumedang, West Java Indonesia. At the beginning of 2021, the disaster happens and, 64 people become a victim of it. There has been a study held by the government to determine the cause of the landslide. The purpose of this paper is to define another area in Sumedang that has the potential for ground movement due to the high rainfall season. The first approach is from regional information based on satellite data to classify potential from dipping and land cover parameter. The second approach is local investigation from Electromagnetic Method using GPR. This method is used to detect the micro-cracking feature in the subsurface to evaluate landslide potential classification zones from remote sensing. Based on the micro-cracking analysis, the recommendation of a landslide safe area is classified qualitatively from high to low potential.*

**Keywords:** Landslide, Cimanggung, GPR, *Microcracking*, *Remote Sensing*.

## 1. Introduction

Longsor adalah salah satu bencana geologi yang berdampak negatif pada lingkungan dan manusia. Definisi tanah longsor telah banyak dituliskan oleh beberapa penulis, dimana longsor adalah pergerakan massa batuan, sedimen, tanah, atau timbunan buatan di bawah pengaruh gravitasi (Hung et al., 2014; Varnes, 1978, 1981). Longsor atau pergerakan tanah, seperti yang digunakan di sini, adalah lapisan tipis yang langsung mendasari permukaan tanah yang dibentuk oleh proses pedogenik (Bobrowsky, 2013; Crozier & Glade, 2005; Varnes, 1978). Faktor yang mendorong terjadinya longsor adalah faktor eksternal, seperti curah hujan tinggi, guncangan seismik, letusan gunung berapi, erosi sungai/pantai, atau keruntuhan bendungan alam (Crozier & Glade, 2005; Schuster & Wieczorek, 2002; Varnes, 1978), dan faktor pemicu internal berupa ketidakstabilan lereng yang diakibatkan oleh kondisi geologi dan geomorfologi seperti kekuatan jenis material, struktur dan geometri dari lereng tersebut (McColl, 2022; Varnes, 1978; Wieczorek, 1996).

Meskipun semakin banyak informasi umum mengenai longsor, prediksi dan penilaian resiko bencana menggunakan pengindraan jauh seperti penggunaan inSAR pada penelitian terdahulu (Novellino et al., 2021; Rosi et al., 2018; Sun et al., 2015; Tomás et al., 2016;

Zhang et al., 2020), investigasi lapangan secara langsung diperlukan untuk mendapatkan data prediksi dan penilaian resiko bencana longsor (Glade et al., 2006). Investigasi lapangan sangat penting dalam meneliti struktur dari massa gelincir dan pola pergerakannya. Pola pergerakan tanah dapat diindikasikan dari keberadaan *micro-cracking* yang terbentuk dari proses pembobotan dan pelemahan ikatan antar butir. *Micro-cracking* yang terbentuk menjadi jalur rekanan yang menimbulkan bentuk longsoran *sliding* dan *topple* (Hung et al., 2014). Dalam mendeteksi perkembangan *micro-cracking*, dapat dilakukan pencitraan 2D bawah permukaan menggunakan metode geofisika non-destruktif (Turner & Jayaprakash, 1996). *Ground penetrating radar* (GRP) adalah salah satu metode geofisika yang dalam sepuluh tahun belakangan ini banyak digunakan untuk menginvestigasi stabilitas lereng dari potensi longsor pada penelitian geoteknik (Benedetto et al., 2012; Hu & Shan, 2016; Irawan et al., 2017; Lissak et al., 2015; Sokolov & Dyagileva, 2021). Instrumentasi GPR yang memiliki resolusi tinggi dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan *micro-cracking* yang dapat menjadi salah satu pemicu terbesar perkembangan longsor (Bichler et al., 2004).

Di Indonesia, tercatat sebanyak 5944 kejadian tanah longsor dari tahun 2015 hingga 2022 pada geoportal data

bencana Indonesia BNPB. Jawa adalah salah satu daerah yang terkategorikan sebagai daerah yang rawan longsor berdasarkan laporan resiko gempa Indonesia (Cepeda et al., 2010). Berdasarkan data dari BPBD Jawa Barat, pada tahun 2021 sendiri terdapat 157 longsor di Jawa Barat (Haniya, 2021). Ketertarikan akan bencana longsor di daerah Sumedang meningkat dengan kejadian longsor pada awal tahun 2021 (Haniya, 2021). Penelitian ini ditujukan untuk meneliti potensi bencana longsor di Sumedang dengan melihat perkembangan *micro-cracking* yang terbentuk pada daerah lereng. Penelitian mengenai *micro-cracking* telah banyak dilakukan sebelumnya oleh (Carey et al., 2007; Carey & Petley, 2014; Spickermann et al., 2009). Perkembangan ini dapat terjadi karena respon terhadap perubahan stress yang terpicu oleh pembobotan.

Daerah penelitian terletak di Desa Sukamaju, Kecamatan Rancakalong dan Desa Cilayung, Kecamatan Jatinangor, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat, Indonesia. Daerah penelitian merupakan bekas kejadian longsor pada 7 April 2020 (Desa Sukamaju) dan 24 Maret 2021 (Desa Cilayung). Longsoran di Desa Sukamaju terletak di tepi jalan raya penghubung Sumedang–Subang, sementara longsoran di Desa Cilayung terletak di kompleks perumahan yang meruntuhkan tembok penahan tebing. Kedua kejadian longsor ini terjadi setelah hujan deras yang berdurasi panjang. Daerah keterjadian longsor di Desa Sukamaju merupakan jalan raya penghubung Kabupaten Sumedang dan Subang. Kondisi jalan raya cukup ramai sehingga menimbulkan kemacetan ketika terjadi longsor pada 6 April 2020. Di sisi timur lereng yang mengalami longsor merupakan lahan pertanian persawahan, sementara di sisi barat lereng adalah jalan raya yang langsung berbatasan dengan lembah sungai dengan kedalaman sekitar 10 meter dari tepi jalan raya. Sebagai akibat dari pembangunan jalan raya, bagian kaki lereng yang mengalami longsoran menjadi kurang mendapat dukungan. Hal ini yang membuat lereng tersebut menjadi rawan untuk terjadi longsoran di masa depan. Lereng di bagian lembah sungai, di sisi barat jalan raya juga mengalami potensi longsoran serupa. Karena terdapat aliran sungai yang deras yang mengerosi bagian kaki lereng dan menghilangkan daya dukung di bagian bawah lereng. Kondisi Desa Sukamaju dapat terlihat seperti pada Gambar 1. Gambar 1a menunjukkan peta tutupan lahan yang terdapat di lokasi tersebut, yang sebagian besar dari lahan tersebut dimanfaatkan sebagai sawah tada hujan dan semak belukar. Gambar 1b dan Gambar 1c menunjukkan foto pengambilan data dari lokasi tersebut.

Adapun lokasi keterjadian longsoran di Desa Cilayung merupakan pemukiman warga. Longsoran yang terjadi berupa runtuhnya tembok penahan tanah yang menimpa rumah warga di bagian bawah tembok. Tembok dengan tinggi sekitar 5 meter tersebut runtuh setelah diguyur hujan lebat yang panjang. Akumulasi air yang meningkatkan tekanan pori di dalam tanah diduga menjadi penyebab terjadinya longsoran ini. Kondisi tembok yang tidak dilengkapi dengan saluran drainase mengakibatkan air yang berinfiltasi terus bertambah banyak di dalam tanah. Gambaran dari lokasi Desa Cilayung dapat dilihat pada Gambar 2.

Teknik terbaru terkait penilaian bencana longsor telah banyak dibahas oleh (Pardeshi et al., 2013) yang membahas mengenai pendekatan secara tidak langsung seperti zonasi.

Secara morfologi daerah penelitian dominan berbukit sampai bergunung dengan ketinggian antara 0–2100 mdpl. Lereng bervariasi dari landai hingga curam dengan dataran lokal. Zona fisiografi wilayah terdiri dari zona Pegunungan Selatan dan zona Depresi Vulkanik Bandung (Van Bemmelen, 1949).

Kabupaten Sumedang terdiri dari produk vulkanik muda di bagian barat, utara dan timur. Sedimen tersier terletak di sebelah utara wilayah kabupaten yang mengandung interkalasi batupasir dan batulempung. Daerah Sumedang terutama tersusun oleh material vulkanik, umumnya batuan vulkanik berumur Plio-Pleistosen dan Kuarter.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendeteksi potensi longsor lanjutan yang dapat terjadi pada kedua lokasi tersebut berdasarkan gambaran bawah permukaan yang diindikasikan dengan keberadaan *micro-cracking* yang hampir vertikal. Kondisi tersebut menjadi faktor pembobotan yang dapat menghasilkan pergerakan tanah ketika intensitas hujan meningkat.

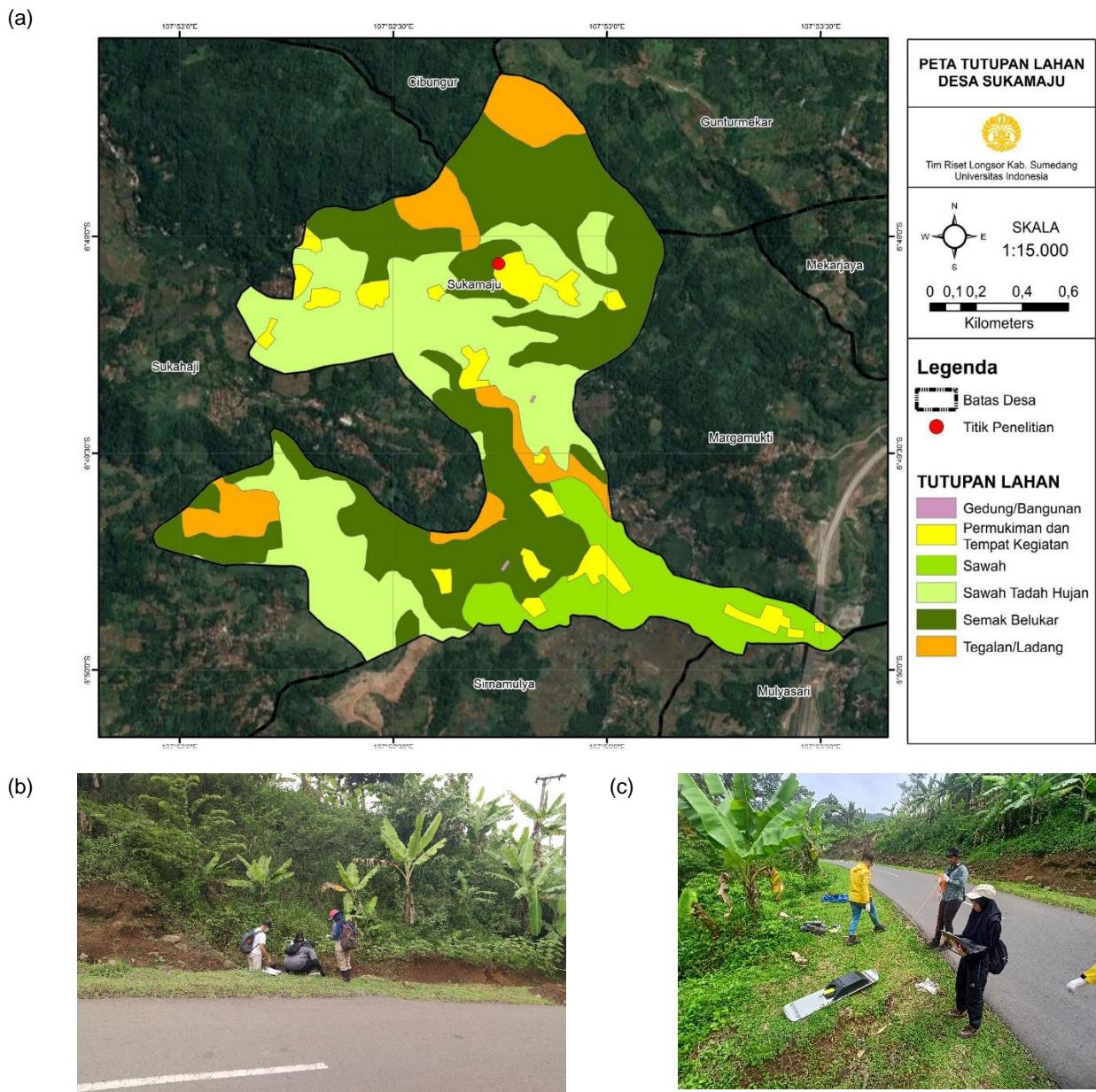
## 2. Metode

Metode geofisika yang diterapkan di lokasi ini adalah metode GPR dan pengindraan jauh. Metode ini dipilih berdasarkan karakteristik dan kondisi lingkungan lokasi penelitian. Survei ini ditujukan untuk mengetahui struktur internal longsoran dan mendapatkan gambaran spasial perpindahan tanah. Informasi tersebut dapat berguna dalam menilai potensi pengembangan pergerakan tanah longsor. Perangkat GPR yang digunakan adalah Phyton-3 yang merupakan instrumen dari perusahaan Latvia RadasSystem, Inc. yang memiliki variasi frekuensi 100/50 /38/25 MHz. pada penelitian ini kami memanfaatkan frekuensi tinggi yaitu 100 dan 50 MHz dengan tujuan untuk mendapatkan gambaran resolusi tinggi (Reynolds, 2011). GPR yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh keberadaan kandungan air dibawah permukaan (Du & Rummel, 1994; Grote et al., 2010; Topp et al., 1980). Keberadaan kandungan ini dideteksi dari *micro-cracking* yang terbentuk secara vertikal.

## 3. Hasil dan Diskusi

Berdasarkan data pengindraan jarak jauh dari kedua desa tersebut, didapatkan bahwa kedua desa tersebut memiliki kemiringan lereng yang curam hingga ke agak curam. Kondisi kemiringan lereng dari kedua desa tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan penampang 2D vertikal pengukuran GPR yang ditunjukkan pada Gambar 4, terlihat bahwa terdapat beberapa jalur jalur *micro-cracking* yang terbentuk pada penampang tersebut. Pembentukan *micro-cracking* ini sebagian memiliki kemenerusan hingga ke permukaan dan sebagian lain tidak. Terbentuknya fitur ini diperkirakan karena pergerakan bidang tanah secara perlahan akibat pengaruh gravitasi dan pembobotan oleh hujan yang



Gambar 1. (a) Peta tutupan lahan pada Desa Sukamaju dengan persentase terbesar ditutupi oleh sawah tada hujan dan semak belukar; (b) Foto samping jalan penghubung antar kabupaten; (c) Proses pengambilan data GPR secara tegak lurus dari badan jalan untuk mendeteksi keberadaan *micro-cracking* yang terbentuk pada *soil*.

diindikasikan dengan pelemahan amplitudo. Penggambaran *micro-cracking* dapat terlihat dari garis putih putus-putus. Gambar 4.a adalah interpretasi dari pencitraan GPR di Desa Cimalaka. Pada lokasi ini terlihat banyaknya terbentuk rekahan yang memiliki kemenerusan hingga kedalaman lebih dari 8 meter di bawah permukaan. Kecenderungan dari rekahan ini memiliki sebagian dari rekahan yang sampai ke permukaan. Pola kemenerusan yang sampai ke permukaan membuat rekahan ini menjadi rekahan yang efektif dalam menyimpan fluida ketika terjadinya hujan dengan intensitas tinggi.

Pada Desa Cilayung yang cenderung lebih mendatar dari segi kemiringan lereng, terdapat pola *micro-cracking* yang lebih dangkal. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 4.b. yang menunjukkan kemenerusan *micro-cracking* pada penampang 2D yang hanya menerus sepanjang 1 sampai

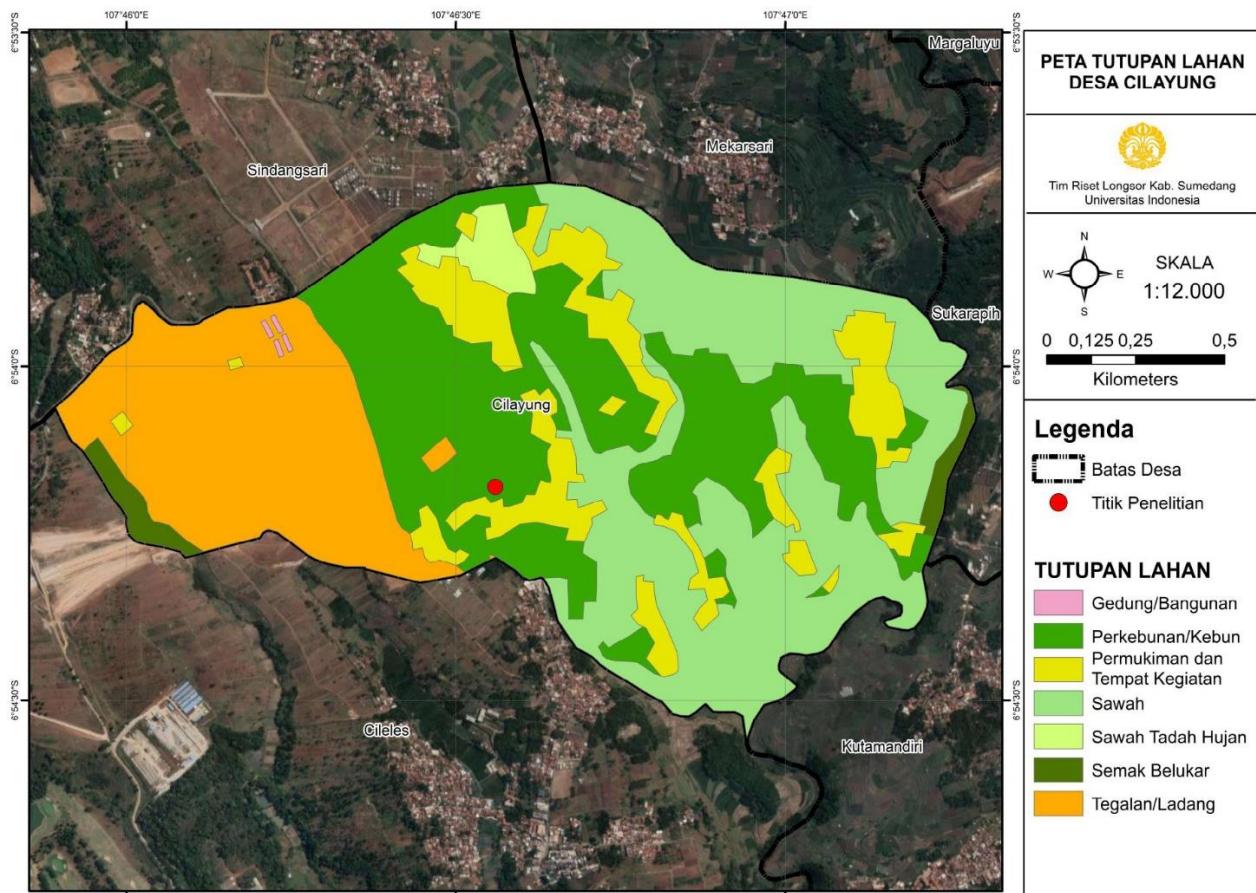
2 meter di bawah permukaan. Kecenderungan dari rekahan ini juga lebih banyak menerus hingga permukaan.

#### 4. Kesimpulan

Disimpulkan bahwa terdapat banyak *micro-cracking* yang terbentuk pada hasil survei kali ini. Fitur tersebut dapat menjadi indikasi awal dari potensi longsor yang dapat terjadi kedepannya. Berdasarkan informasi tersebut diperlukan upaya lebih lanjut agar proses pergerakan tanah dapat di tanggulangi sebelum bencana berikutnya terjadi.

#### Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih atas dana penelitian yang telah diberikan oleh Hibah Riset FMIPA UI 2021 920/SK/F3.D/UI/2021. Kepada masyarakat di Sumedang, kami mengucapkan terima kasih atas bantuan dalam melakukan penelitian di lokasi.



(a)



(b)

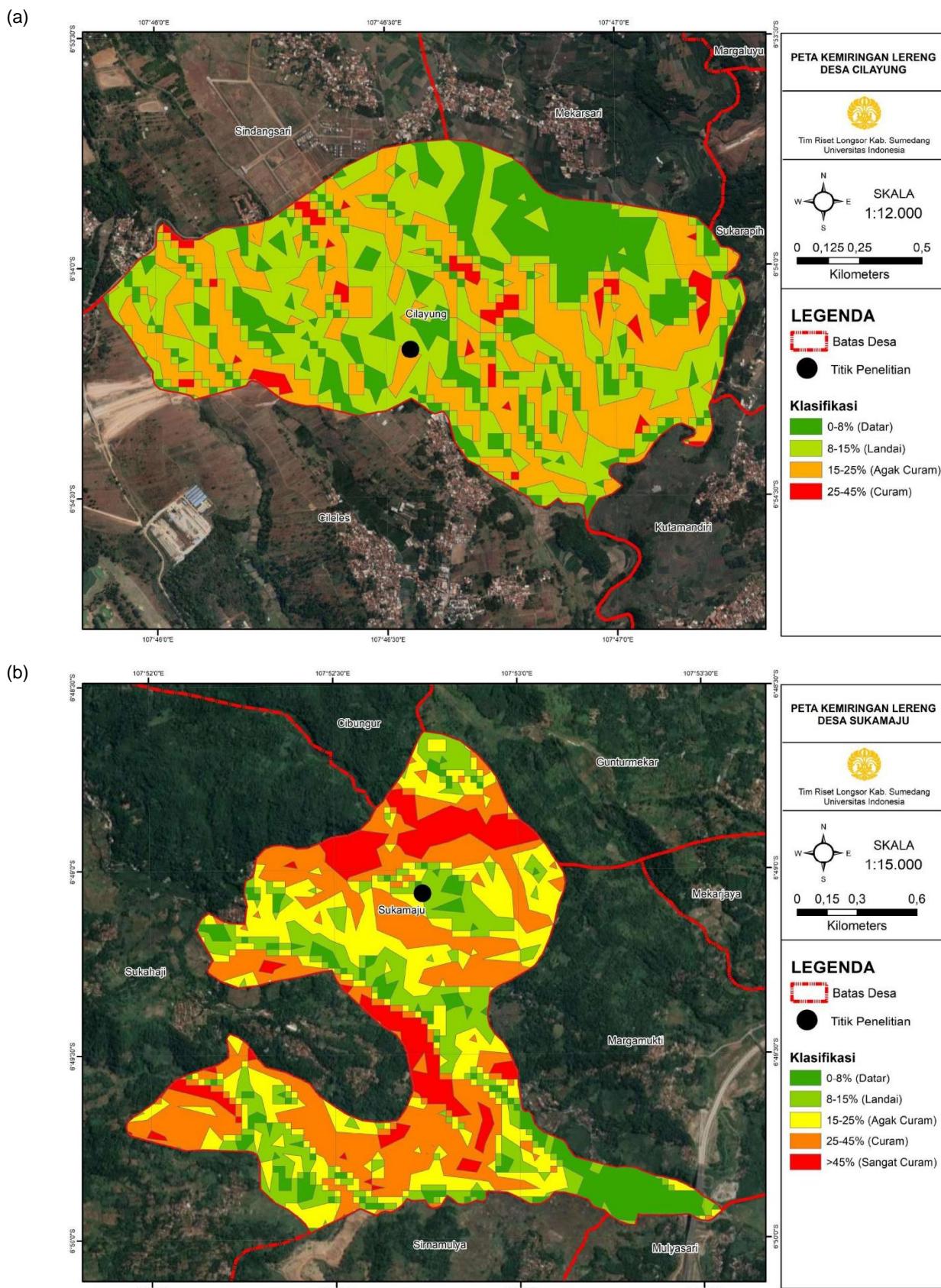


(c)

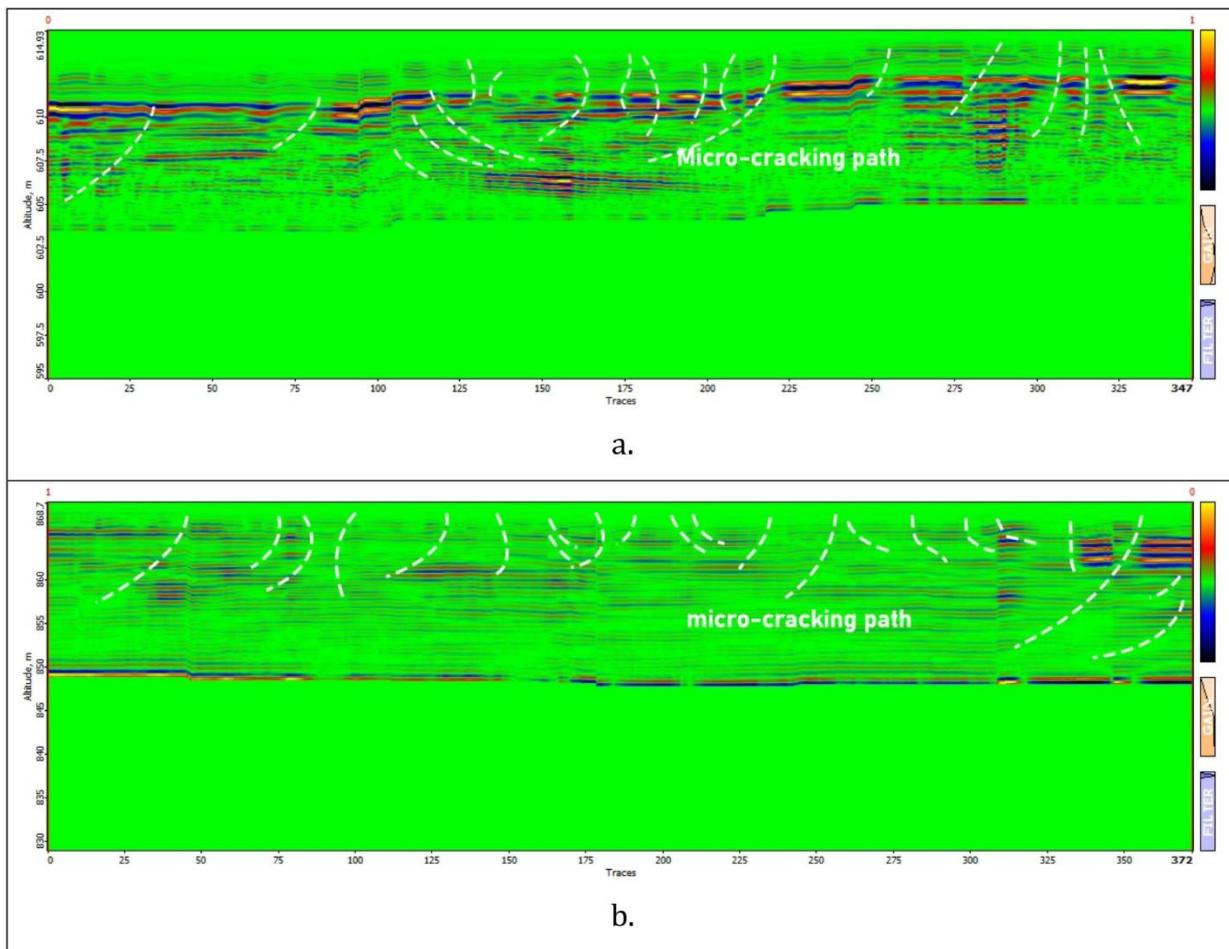


(d)

Gambar 2. (a) Tutupan lahan pada Desa Cilayung yang kebanyakan terdiri dari perkebunan dan sawah tадah hujan; (b), (c), dan (d) adalah gambaran longsoran yang terjadi pada 24 Maret 2021.



Gambar 3. (a) Gambaran peta kemiringan lereng pada Desa Cilayung yang memiliki banyak daerah dengan kemiringan lereng dalam klasifikasi agak curam; (b) Peta kemiringan lereng pada Desa Sukamaju yang menunjukkan banyak daerah masuk kedalam kategori kemiringan sangat curam.



Gambar 4. (a) Salah satu lintasan GPR pada Desa Sukamaju; (b) Salah satu lintasan GPR pada Desa Cilayung.

## Referensi

- Benedetto, A., Benedetto, F., & Tosti, F. (2012). GPR applications for geotechnical stability of transportation infrastructures. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 253–262.
- Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, M., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T., & Burns, R. (2004). Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: The Quesnel Forks landslide. *Landslides*, 1(1), 29–40.
- Bobrowsky, P. T. (2013). *Encyclopedia of natural hazards* (Vol. 1135). Dordrecht: Springer.
- Carey, J., Moore, R., Petley, D., Siddle, H., McInnes, R., Jakeways, J., Fairbank, H., & Mathie, E. (2007). Pre-failure behaviour of slope materials and their significance in the progressive failure of landslides. *Landslides and Climate Change: Challenges and Solutions*. Taylor & Francis Group: London, UK, 207–215.
- Carey, J., & Petley, D. (2014). Progressive shear-surface development in cohesive materials; implications for landslide behaviour. *Engineering Geology*, 177, 54–65.
- Cepeda, J., Smebye, H., Vangelsten, B., Nadim, F., & Muslim, D. (2010). Landslide risk in Indonesia. *Glob. Assess. Rep. Disaster Risk Reduct*, 20.
- Crozier, M. J., & Glade, T. (2005). Landslide hazard and risk: Issues, concepts and approach. *Landslide Hazard and Risk*, 1–40.
- Du, S., & Rummel, P. (1994). Reconnaissance studies of moisture in the subsurface with GPR. cp-300.
- Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (2006). *Landslide hazard and risk*. John Wiley & Sons.
- Grote, K., Anger, C., Kelly, B., Hubbard, S., & Rubin, Y. (2010). Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR groundwave techniques. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 15(3), 93–110.
- Haniya, D. F. (2021). Upaya Pemerintah dalam Menangani Bencana Alam Tanah Longsor: Studi Kasus di Desa Cihanjuang Kecamatan Cimanggung Kabupaten Sumedang. *Dialogue: Jurnal Ilmu Administrasi Publik*, 3(1), 43–54.
- Hu, Z., & Shan, W. (2016). Landslide investigations in the northwest section of the lesser Khingan range in China using combined HDR and GPR methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 591–603.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Irawan, S., Aly, R., Syahputra, R., Kristyanto, T. H. W., & Tempesy, A. (2017). *GPR application to investigate soil crack persistence in Cianjur landslide*. 1861(1), 030042.
- Lissak, C., Maquaire, O., Malet, J.-P., Lavigne, F., Virmoux, C., Gomez, C., & Davidson, R. (2015). Ground-penetrating radar observations for estimating the vertical displacement of rotational landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1399–1406.
- McColl, S. T. (2022). Landslide causes and triggers. In *Landslide*

- Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 13–41). Elsevier.
- Novellino, A., Cesarano, M., Cappelletti, P., Di Martire, D., Di Napoli, M., Ramondini, M., Sowter, A., & Calcaterra, D. (2021). Slow-moving landslide risk assessment combining Machine Learning and InSAR techniques. *Catena*, 203, 105317.
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 1–11.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani, F., & Casagli, N. (2018). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution. *Landslides*, 15(1), 5–19.
- Schuster, R. L., & Wieczorek, G. F. (2002). *Landslide triggers and types*. 59–78.
- Sokolov, K., & Dyagileva, R. (2021). Possible of Using GPR and Electrical Tomography for Landslide Studies in The Quarry of Open Pits Mines in The Permafrost Zone. Conference Proceedings, *Engineering and Mining Geophysics 2021*, 1–8.
- Spickermann, A., Malet, J.-P., van Asch, T. W., Van Maarseveen, M., Van Dam, D., & Markies, H. (2009). Analysis of soil failure modes and possible hydrological triggers using flume tests. *EGU General Assembly 2009*, 3784.
- Sun, Q., Zhang, L., Ding, X., Hu, J., Li, Z., & Zhu, J. (2015). Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 156, 45–57.
- Tomás, R., Li, Z., Lopez-Sánchez, J. M., Liu, P., & Singleton, A. (2016). Using wavelet tools to analyse seasonal variations from InSAR time-series data: A case study of the Huangtupo landslide. *Landslides*, 13(3), 437–450.
- Topp, G. C., Davis, J., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574–582.
- Turner, A. K., & Jayaprakash, G. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 1-introduction* (Issue 247).
- Van Bemmelen, R. (1949). *The Geology of Indonesia: General Geology of Indonesia and adjacent archipelagoes*. Nijhoff: The Hague Gov. Print. Off.
- Varnes, D. (1981). The principles and practice of landslide hazard zonation. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 23(1), 13–14.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special Report*, 176, 11–33.
- Wieczorek, G. F. (1996). Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 4: Landslide triggering mechanisms. *Transportation Research Board Special Report*, 247.
- Zhang, Y., Meng, X., Dijkstra, T., Jordan, C., Chen, G., Zeng, R., & Novellino, A. (2020). Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques. *Remote Sensing of Environment*, 241, 111738

# Identifikasi Fasies Menggunakan Metode Pembelajaran Mesin pada Formasi Pucangan, Daerah Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur

Michellain Millenia Setyowardhani\*, Rezky Aditiyo, dan M. Rizqy Septyandy

Program Studi Geologi, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,  
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia

\*Narahubung: michellain.millenia@ui.ac.id

## Abstrak

Saat ini geosaintis memasuki era *big data* dan pembelajaran mesin memberikan potensi besar untuk berkontribusi dalam masalah geosains. Automasi dalam analisis fasies perlu dilakukan untuk meningkatkan keakuratan, juga mengurangi waktu dan biaya dalam kegiatan pengembangan sumur sehingga dapat meningkatkan hasil produksi. Penelitian dilakukan menggunakan data log sumur pengeboran, laporan deskripsi batuan inti, dan deskripsi petrografi di reservoir gas Lapangan X. Akumulasi gas berada di reservoir utama hasil endapan vulkaniklastik pada Formasi Pucangan. Lokasi penelitian berada di wilayah kerja Minarak Brantas Gas Inc (MBGI) Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Lapangan X terletak pada reservoir vulkaniklastik berumur Pleistosen dan terletak di *onshore* Cekungan Jawa Timur. Interval produksi berada di bagian bawah yang terendapkan di lingkungan neritik luar atau lingkungan turbiditik. Lapangan X terdiri dari empat fasies yaitu, batulempung, batulanau, batupasir vulkanik, dan batupasir karbonatan.

Proses pengelompokan dilakukan menggunakan algoritma K-Means dan di analisis menggunakan *Cutoff Crossplot*. Kemudian dilanjutkan dengan klasifikasi yang dilakukan menggunakan pembelajaran tersupervisi dengan jenis algoritma *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest*, dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Algoritma pembelajaran mesin yang paling baik digunakan untuk identifikasi fasies pada Lapangan X adalah *Random Forest* dengan hasil akurasi *f1-score* tertinggi, dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) paling rendah dibandingkan kedua algoritma lain.

**Kata kunci:** Fasies, Klaster, Pembelajaran Mesin, *Cutoff*, *Crossplot*

## 1. Pendahuluan

Saat ini geosaintis memasuki era *big data* dan pembelajaran mesin memberikan potensi besar untuk berkontribusi dalam masalah geosains (Karpatne et al., 2017). Masalah ini juga menjadi tantangan pada industri minyak dan gas dengan berbagai jenis data yang dikumpulkan dari permukaan dan bawah permukaan. Pembelajaran mesin menjadi alat yang menarik di berbagai bidang ilmu bumi, terutama dalam estimasi sumber daya (Caté et al., 2017). Pembelajaran mesin adalah satu set metode analisis data yang dapat digunakan untuk menemukan fitur dan tren dalam data tanpa diprogram secara eksplisit, atau pada dasarnya pembelajaran dari data itu sendiri. Algoritma ini mencakup klasifikasi, pengelompokan, dan regresi (Hall, 2016). Penggunaan pembelajaran mesin dalam eksplorasi minyak dan gas sangat penting karena dapat membantu memberikan gambaran yang layak tentang sistem permisyakan yang terlibat dari lingkungan pengendapannya.

Daerah penelitian merupakan Lapangan X yang ditemukan oleh Minarak Brantas Gas, Inc. (semula Lapindo Brantas, Inc.) yang terletak di *onshore* Cekungan Jawa Timur Utara. Interval produksi merupakan turbidit pada lingkungan deltaik, yang mendukung terbentuknya hidrokarbon (Kusumastuti, 2000). Akumulasi gas berada di reservoir utama hasil endapan vulkaniklastik pada Formasi Pucangan. Formasi ini terbentuk pada Pleistosen sebagai fasies vulkanik dan lempung hitam yang berkembang di Mandala Kendeng (Pringgoprawiro, 1983). Berdasarkan Laporan SKK Migas Tahun 2019, Cekungan Jawa Timur Utara mempunyai potensi gas hingga 480,1 *billion standard cubic feet* (Bscf). Tentunya cadangan minyak dan gas

semakin lama akan semakin menurun, maka harus dilakukan usaha lebih lanjut untuk mengembangkan dan menaikkan produksi sumur. Studi mengenai lingkungan pengendapan dan fasies sangat penting untuk menentukan sistem permisyakan dari lapangan tersebut. Automasi dalam analisis fasies perlu dilakukan untuk meningkatkan keakuratan dalam kegiatan pengembangan sumur sehingga dapat meningkatkan hasil produksi. Selain itu, automasi akan lebih memudahkan proses pengembangan sumur, karena dapat menghemat biaya dan waktu.

Algoritma klasifikasi dalam pembelajaran tersupervisi merupakan pembelajaran menggunakan input data pelatihan yang telah diberi label, dan dibuat prediksinya (Mitchell, 1997 dalam Nugroho, 2020). Parameter keberhasilan dari pembelajaran mesin adalah seberapa baik mesin dapat mengelompokkan data (dalam kasus ini untuk mengidentifikasi fasies) yang disebut akurasi. *Dataset* yang digunakan untuk pelatihan pembelajaran mesin harus memiliki kualitas yang tinggi dan tidak bias. Supaya data yang dikeluarkan juga memiliki hasil yang akurat.

## 2. Geologi Regional

Daerah penelitian berada di Cekungan Jawa Timur Utara, yang berada di zona fisiografi regional Antiklinorium Rembang-Madura (Van Bemmelen, 1949) dan merupakan cekungan busur belakang (*back arc basin*). Zona ini memiliki banyak antiklinorium dengan tren timur-barat. Cekungan Jawa Timur Utara (*East Java Geosyncline*) terbentuk pada Oligosen Akhir dengan arah barat-timur, sejajar dengan terbentuknya Pulau Jawa (Van Bemmelen,

1949). Daerah ini telah mengalami sejarah geologi yang kompleks dihasilkan dari konvergensi antara lempeng Eurasia dan India-Australia yang terbentuk pada Oligosen Awal. Evolusi tektonik di Jawa Timur bisa diikuti mulai dari Jaman Kapur akhir (85–65 juta tahun yang lalu) hingga sekarang dalam dua periode waktu. Pada Masa Kenozoikum, Cekungan Jawa Timur Utara dipengaruhi oleh pergerakan relatif dari lempeng India, Eurasia, dan Australia sehingga terjadi interaksi kompleks dengan karakteristik gaya kompresional dengan sudut rendah dan pembalikan dari lapisan ekstensional yang lebih tua. Suatu hal yang khas dari Cekungan Jawa Timur bagian utara berarah timur–barat dan terlihat merupakan gejala tektonik Tersier muda (Sribudiyani et al., 2003).

## 2.1. Stratigrafi

Daerah penelitian terletak di Zona Kendeng yang memiliki endapan sedimen laut dalam dan terdeformasi secara intensif membentuk pegunungan antiklinorium. Secara regional, stratigrafi daerah utara Zona Kendeng memiliki urutan dari tua ke muda dimulai dengan Formasi Ngimbang yang merupakan satuan batuan Tersier tertua di daerah ini terdiri dari napal, batupasir, dan batugamping (Devi et al., 2018). Kemudian, pada Oligosen Atas diendapkan Formasi Kujung yang terdiri dari terumbu, perselingan lempung dan karbonat, dan endapan turbidit (Satyana et al., 2003). Di atasnya diendapkan batupasir kuarsa dan batupasir gampingan yang termasuk Formasi Ngrayong pada Miosen Tengah. Formasi Ngrayong kontak dengan batugamping Formasi Tawun pada bagian bawah dan di bagian atas ditutupi oleh batugamping Formasi Bulu (Poedjoprajitno & Djuhaeni, 2006). Kemudian pada Miosen Tengah–Miosen Akhir terbentuk Formasi Kerek dengan komponen utama terdiri dari batupasir karbonatan berganti dengan napal (Susilohadi, 1995). Selanjutnya Formasi Kalibeng terbentuk pada Miosen Akhir–Pliosen Awal dicirikan oleh napal tidak berlapis berwarna kehijauan atau putih keabuan dan kaya akan foraminifera. Bagian bawah disebut sebagai Anggota Atasangin (Pringgoprawiro, 1983 dalam Sugiarto et al., 2018) merupakan hasil dari endapan vulkanik laut yang dipengaruhi oleh arus turbidit. Sedangkan bagian atas disebut sebagai Formasi Sonde oleh Pringgoprawiro (1983) yang terdiri atas napal pasiran dan semakin atas menjadi napal lempungan. Kemudian Formasi Pucangan bagian atas terdiri dari fasies vulkanik sebagai endapan lahar yang menumpang di atas Formasi Kalibeng terbentuk pada Pliosen awal. Fasies bagian bawah yang dikenal sebagai Formasi Lidah terdiri dari batulempung abu kebiruan. Kemudian pada Pleistosen terbentuk Formasi Kabuh terdiri dari dua litofasies yaitu batulempung laut pada bagian bawah dan fasies vulkanik pada bagian atas (Susilohadi, 1995).

## 2.2. Interpretasi Fasies

Menurut Selley (1985), fasies sedimen adalah suatu satuan batuan yang dapat dikenali dan dibedakan dengan satuan batuan yang lain atas dasar geometri, litologi, struktur sedimen, fosil, dan pola arus purbanya. Log membantu menentukan karakteristik fisik batuan seperti litologi, porositas, geometri pori, dan permeabilitas (Asquith, 2004).

Untuk melakukan litofasies melalui data log sumur, diperlukan beberapa data log di antaranya adalah log sinar gamma, log resistivitas, log sonik, log densitas, dan log neutron. Log sinar gamma (GR) mengukur radioaktivitas alami dalam formasi dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi litologi dan untuk zona korelasi. Log resistivitas mengukur respons formasi terhadap arus, digunakan untuk menentukan zona *hydrocarbon-bearing* versus zona *water-bearing*, menunjukkan zona permeabel, dan menentukan porositas (Asquith, 2004). Log sonik adalah log porositas yang mengukur waktu transit interval ( $\Delta t$ , delta t, atau DT) dari gelombang suara kompresi yang menjalar melalui formasi. Waktu transit interval ( $\Delta t$ ) bergantung pada litologi dan porositas, akan meningkat karena adanya efek hidrokarbon. Log densitas mengidentifikasi nilai bulk density (pb atau RHOB) dan matrix density (rho<sub>m</sub>) (Asquith, 2004). Log densitas juga telah digunakan untuk pengukuran efek fotolistrik (Pe, PE, atau PEF) untuk menentukan litologi suatu formasi. Log neutron adalah log porositas yang mengukur konsentrasi hidrogen dalam suatu formasi untuk mendeteksi jenis fluida.

## 2.3. Analisis Cutoff

Klasifikasi litofasies dari data log sumur seringkali menemui masalah seperti keterpisahan distribusi frekuensi komponen dalam log sumur, posisi/pola spasial yang realistik di litofasies yang diprediksi, menentukan jumlah litofasies, dan keterkaitan antara litofasies yang diklasifikasikan dan entitas geologi yang mendasarinya (Ma, 2019). Metode cutoff ini menciptakan batas demarkasi antara histogram komponen litofasies dan sering menghasilkan hasil yang bertentangan dengan data core (Ma et al., 2015 dalam Ma, 2019). Tumpang tindih sering terjadi karena log yang digunakan kurang sensitif, *noise*, dan kesalahan pengukuran. Hal ini dapat diselesaikan dengan menggunakan *crossplot* kombinasi dua atau lebih log.

## 2.4. Pembelajaran Mesin

Pembelajaran mesin adalah satu set metode analisis data yang mencakup klasifikasi, pengelompokan, dan regresi. Algoritma ini dapat digunakan untuk menemukan fitur dan tren dalam data tanpa diprogram secara eksplisit, atau pada dasarnya pembelajaran dari data itu sendiri (Hall, 2016). Terdapat dua jenis utama algoritma pembelajaran mesin, yaitu pembelajaran tersupervisi (*supervised learning*), dan pembelajaran tidak tersupervisi (*unsupervised learning*). Pembelajaran tersupervisi mencakup klasifikasi dan regresi bertujuan untuk mempelajari model dari data pelatihan berlabel yang memungkinkan kita membuat prediksi tentang data selanjutnya yang buta. Pembelajaran tidak tersupervisi mencakup klastering, melibatkan dengan data yang tidak berlabel atau data dengan struktur yang tidak diketahui (Raschka & Mirjalili, 2017).

Algoritma yang digunakan adalah *Support Vector Machine* (SVM) yang merupakan model pembelajaran tersupervisi dengan algoritma pembelajaran terkait yang menganalisis data dan mengenali pola. Prinsip dasar SVM adalah klasifikasi linier, dan selanjutnya dikembangkan

agar dapat digunakan pada klasifikasi non-linier dengan memasukkan konsep kernel pada ruang kerja berdimensi tinggi (Nugroho, Witarto, & Handoko, 2003 dalam Nugroho, 2020).

Algoritma selanjutnya adalah *Random forest*, berupa kumpulan pohon keputusan yang secara individual membawa varians tinggi, untuk membangun model yang lebih kuat yang memiliki kinerja generalisasi lebih baik dan tidak terlalu rentan terhadap *overfitting* (Raschka & Mirjalili, 2017).

Algoritma ketiga adalah *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), versi algoritma *gradient boosting* yang dapat diskalakan dan ditingkatkan. XGBoost dirancang untuk efisiensi, kecepatan komputasi, dan kinerja model.

Algoritma terakhir adalah *k-Nearest Neighbor* (kNN) yang mempelajari fungsi diskriminatif dari data pelatihan, tetapi menghafal set data pelatihan (Raschka & Mirjalili, 2017). Berdasarkan metrik jarak yang dipilih, algoritma kNN menemukan  $k$  sample dalam dataset pelatihan yang paling dekat (paling mirip) dengan titik yang ingin kita klasifikasikan. Penentuan nilai  $k$ , atau jarak antar data (*dissimilarity*) dapat dilakukan dengan teori Jarak Euclidean.

### 3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini berfokus dalam mengidentifikasi karakter fasies pada Formasi Pucangan berdasarkan deskripsi fisik batuan dan pembacaan log. Data yang digunakan adalah log sumur pengeboran, laporan deskripsi batuan inti, dan deskripsi petrografi di reservoir gas Formasi Pucangan Lapangan X, Jawa Timur. Proses pengelompokan dilakukan menggunakan algoritma *K-Means* dan di analisis menggunakan *cutoff*. Hasil klasifikasi fasies kemudian diprediksi pada sumur buta (*blind well*) tanpa data fasies menggunakan pembelajaran mesin tersupervisi.

Metode penelitian dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu tahap persiapan, tahap pengolahan data, dan tahap penyusunan hasil penelitian. Metode penelitian yang digunakan merupakan penelitian deskriptif dengan menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Pendekatan kualitatif dilakukan dengan metode analisis batuan inti, petrografi, analisis *cutoff*, dan analisis elektrofasies. Sedangkan kuantitatif dilakukan dengan metode pembelajaran mesin dengan bahasa pemrograman Phyton.

Alur penelitian dimulai dari tahap persiapan mencakup studi pendahuluan dengan mengumpulkan data sekunder dari beberapa literatur. Tahap pengumpulan data merupakan kegiatan pengambilan data untuk keperluan pengolahan data. Data yang dibutuhkan mencakup data *well log* yang berasal dari data lubang bor yang berisikan informasi laporan deskripsi batuan inti, dan deskripsi petrografi batuan inti yang diperoleh dari Minarak Brantas Gas Inc. (MBGI).

Pengolahan data dilakukan dengan klasifikasi fasies dari data batuan inti bor dan petrografi sebagai data sekunder, analisis *cutoff*, analisis elektrofasies, dan pembelajaran mesin. Analisis batuan inti bor dan petrografi merupakan analisis kualitatif dilakukan untuk mengetahui batuan apa saja yang terdapat pada sumur Lapangan X

beserta masing-masing karakteristiknya. Kemudian analisis *cutoff* dilakukan dengan *clustering* oleh pembelajaran mesin tidak terawasi menggunakan algoritma *K-Means* dan *Principal Component Analysis*. Analisis elektrofasies merupakan analisis kualitatif yang dilakukan pada log sumur dengan melihat pola interval fasies-fasies dengan melihat defleksi pola log sumur sehingga dapat disimpulkan lingkungan pengendapan pada interval tersebut.

Prediksi fasies pada sumur buta (*blind well*) dilakukan dengan pembelajaran mesin menggunakan algoritma *K-Means*, *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest*, *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), dan *k-Nearest Neighbor* (KNN). Pembelajaran mesin mencakup tahap pra-pemrosesan, pembuatan model pelatihan, validasi dan pengujian dengan target akurasi di atas 80%.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Litofasies Formasi Pucangan Lapangan X

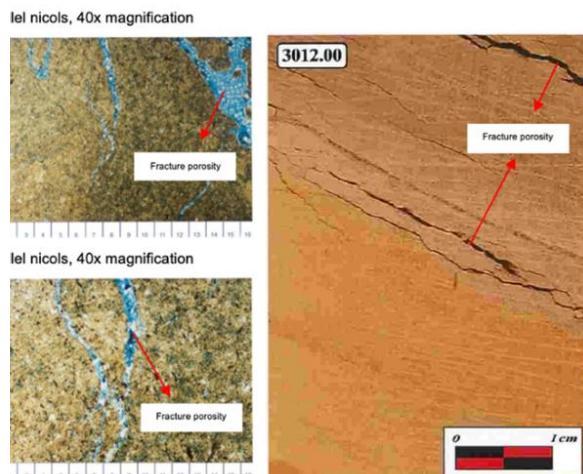
Lapangan X terletak pada reservoir vulkaniklastik berumur Pleistosen dan terletak di *onshore* Cekungan Jawa Timur (Kusumastuti, 2000). Interval sumur penelitian berada pada Formasi Pucangan pada Zona Kendeng (Susilohadi, 1995). Data yang didapatkan dari perusahaan merupakan Laporan Analisis Batuan Inti dan Analisis Petrografi dari lima sumur di Lapangan X. Sampel batuan inti yang diambil terdiri dari *conventional core* dan *sidewall core*. Data *conventional core* maupun *sidewall core* mencakup deskripsi litologi, mineral, kandungan karbonat, struktur sedimen, dan keterangan lain. Hasil analisis mendapatkan empat litofasies dengan karakteristik yang berbeda, yaitu:

#### a. Fasies Batulempung

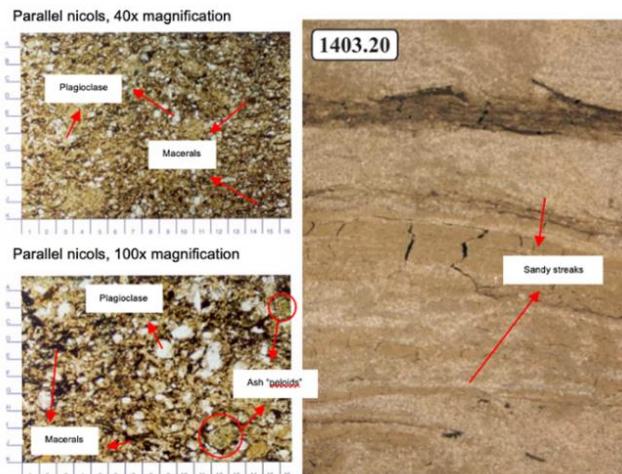
Fasies batulempung merupakan fasies yang mendominasi dari kelima sumur penelitian. Fasies ini memiliki warna abu muda-abu tua dengan kekerasan kompak, bersifat karbonatan, mengembang jika terkena air, dan memiliki tipe porositas sekunder (*fracture*). Selain memiliki ukuran butir lempung, mineral lempung seperti kaolinit dan smectite menjadi penciri dari fasies ini. Fragmen yang ditemukan berupa cangkang, material vulkanik, maupun litik vulkanik. Pada Sumur Montana\_3, hasil analisis petrografi menamakan batulempung ini sebagai *claystone* (Gambar 1a); umumnya memiliki sifat karbonatan (mengandung CaCO<sub>3</sub>) karena terdapat *skeletal grain* dan fragmen cangkang foraminifera, bivalvia, maseral, peloid, dan tanda bekas fosil. Seringkali ditemukan berselingan dengan batupasir secara berulang.

#### b. Fasies Batulanau

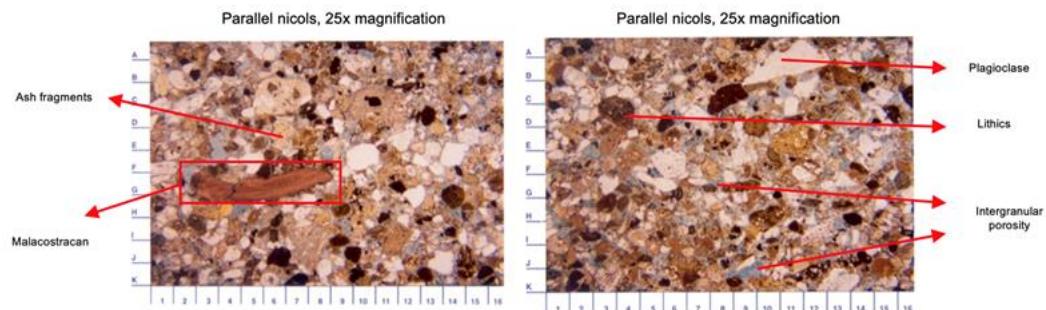
Fasies batulanau merupakan batuan yang memiliki karakteristik ukuran butir berukuran lanau (0.004–0.063 mm) berdasarkan skala Wentworth. Selain itu batuan pada fasies ini memiliki campuran butir berukuran lempung dan pasir bergaris-garis (*sandy streaks*) di dalamnya (Gambar 2b), berwarna



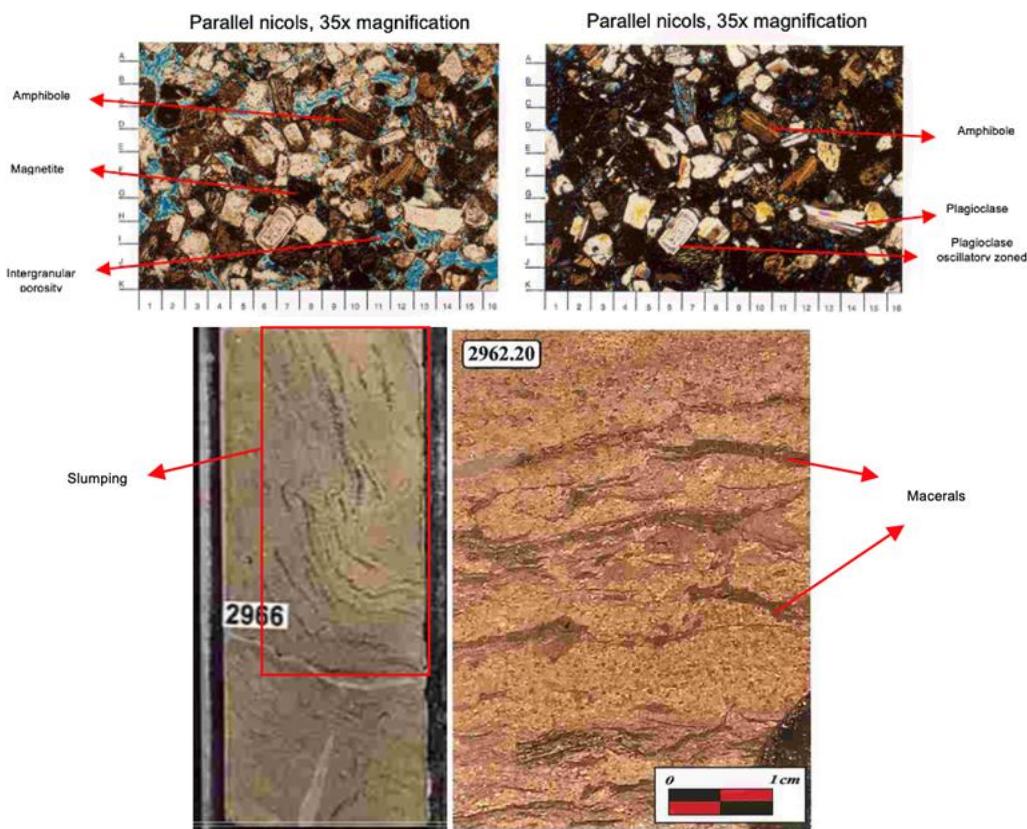
Gambar 1. (a) Sayatan tipis batulempung Sumur Montana\_3 di kedalaman 2725 kaki, (b) Foto inti bor batulempung Sumur Berkeley\_4 dengan rekahan pada 3012 kaki.



Gambar 2. (a) Sayatan tipis batulanau Sumur Montana\_3 di kedalaman 2420 kaki, (b) Foto inti bor batulanau Sumur Montana\_3 dengan laminasi pasir di kedalaman 1403,2 kaki.



Gambar 3. Sayatan tipis batupasir karbonatan Sumur Bronx\_2 di kedalaman 1510 kaki.



Gambar 4. (atas) Sayatan tipis batupasir vulkanik Sumur Memphis\_1 pada ketinggian 1160 kaki, (bawah) Foto inti batu pasir vulkanik Sumur Berkeley\_4 (a) dengan struktur longsor pada ketinggian 2966 kaki, (b) laminasi pada ketinggian 2962,20 kaki.

abu tua dengan kekerasan kompak, terdiri dari material cangkang dan fosil organisme laut, peloid, maseral fragmen vulkanik, dan beberapa litik berukuran kerakal yang tersebar (Gambar 2a). Ditemukan adanya konkresi karbonatan dan fosil yang menyebabkan beberapa bersifat karbonatan. Fasies batulanau ini umumnya memiliki struktur sedimen bergradasi normal menuju batupasir halus.

#### c. Fasies Batupasir Karbonatan

Fasies Batupasir Karbonatan merupakan anggota dari fasies batupasir. Batupasir memiliki warna abu kecoklatan, berukuran pasir halus–pasir sedang, bentuk butir agak menyudut dengan sortasi buruk. Terdiri dari fragmen cangkang, litik vulkanik dan didominasi oleh mineral plagioklas (Gambar 3). Sifat karbonatan didapatkan dari skeletal grain, fragmen batugamping, cangkang fosil foraminifera, malacostracan, bivalvia, maseral, peloid, dan tanda bekas fosil dalam batuan tersebut. Selain itu terdapat mineral kalsit dan siderit sebagai hasil dari rekristalisasi cangkang, maupun alterasi dan disolusi oleh fluida. Hal ini juga didukung oleh penemuan fasies yang berada pada kedalaman yang lebih dalam dibandingkan batupasir vulkanik.

Proses diagenesis dan kompaksi tentunya dapat memengaruhi adanya perubahan dari fragmen dan debu vulkanik menjadi mineral karbonat sebagai semen. Fasies ini memiliki porositas intergranular dan *vuggy*, yang kemungkinan merupakan porositas sekunder. Sering kali berselingan dengan *mudstone* dengan struktur sedimen berupa laminasi.

#### d. Fasies Batupasir Vulkanik

Karakteristik dari fasies ini merupakan batupasir yang memiliki kandungan material vulkanik berupa litik batuan beku andesit, debu vulkanik, dan gelas vulkanik. Pada sayatan tipis dan analisis petrografi diketahui juga bahwa mineral batuan gunungapi cukup mendominasi komposisi batuan (Gambar 4 atas), seperti plagioklas dengan tekstur *oscillatory zoned*, hornblende, amphibole merah, magnetit, dan olivin dalam jumlah kecil.

Secara makroskopis, batuan ini memiliki warna abu muda, ukuran butir pasir halus–sedang, kebundaran agak menyudut–agak membundar, tersortasi dengan baik, dan kekerasannya rapuh–kompak. Sering kali berselingan dengan fasies batulempung dengan struktur sedimen berupa laminasi dan struktur longsoran (*slumping*) (Gambar 4 bawah, a-b). Batuan ini tidak bersifat karbonatan karena lebih didominasi oleh material vulkanik dan tidak memiliki material karbonat dengan jumlah yang cukup banyak. Letaknya relatif berada pada dekat permukaan dengan kedalaman yang dangkal sehingga dapat dikatakan merupakan lapisan yang lebih muda dibandingkan fasies batupasir karbonatan. Porositas yang dimiliki adalah intergranular yang kemungkinan merupakan porositas primer dan terbentuk saat pengendapan.

### 4.2. Pembelajaran Tidak Tersupervisi

Persiapan dalam membuat klasifikasi empat kelas fasies perlu dilakukan analisis yang melibatkan proses klasterisasi. Algoritma yang digunakan untuk membuat klaster dari data log ini adalah *K-Means* dan dibantu dengan *Principal Component Analysis* (PCA).

#### a. K-Means

Klasterisasi data dilakukan dengan enam data enam log yang dipilih yaitu *gamma ray*, resistivitas, densitas, neutron, sonik, dan PEF. Persebaran data setiap klaster pada algoritma *K-Means* tidak menunjukkan separasi yang baik untuk analisis *cutoff* (Gambar 5a). Sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut dengan bantuan PCA.

#### b. Principal Component Analysis (PCA)

Metode PCA digunakan untuk mereduksi jumlah variabel untuk membantu mengidentifikasi pola dalam data berdasarkan korelasi antar fitur. Komponen pertama (PC 1) memiliki nilai variansi 93% dan komponen kedua (PC 2). PCA dapat mengetahui nilai *eigenvalues* dan *eigenvector*. Berdasarkan nilai *eigenvector* fitur yang paling penting yang menyusun dari PC 1 adalah DTC (sonik), sedangkan pada PC 2 adalah *gamma ray* (GR).

Tabel 1. Nilai *eigenvector* pada setiap PC.

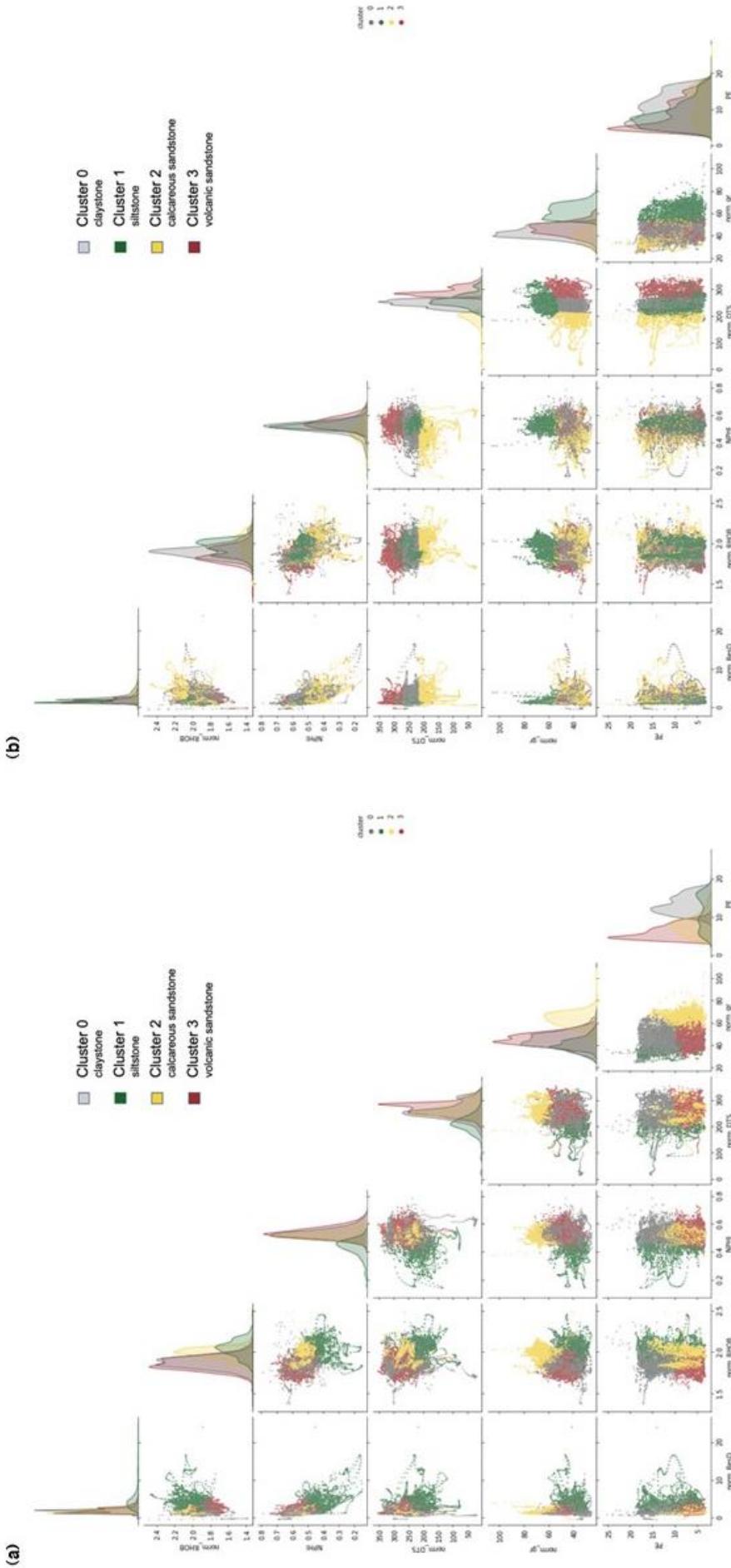
Fitur	PC 1	PC 2
ResD	$1.32 \times 10^{-2}$	$2.40 \times 10^{-2}$
RHOB	$1.09 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-3}$
NPHI	$5.53 \times 10^{-4}$	$4.60 \times 10^{-4}$
DTC	$9.97 \times 10^{-1}$	$7.85 \times 10^{-2}$
GR	$7.56 \times 10^{-2}$	$9.92 \times 10^{-1}$
PE	$3.04 \times 10^{-2}$	$9.56 \times 10^{-2}$

#### c. K-Means dan PCA

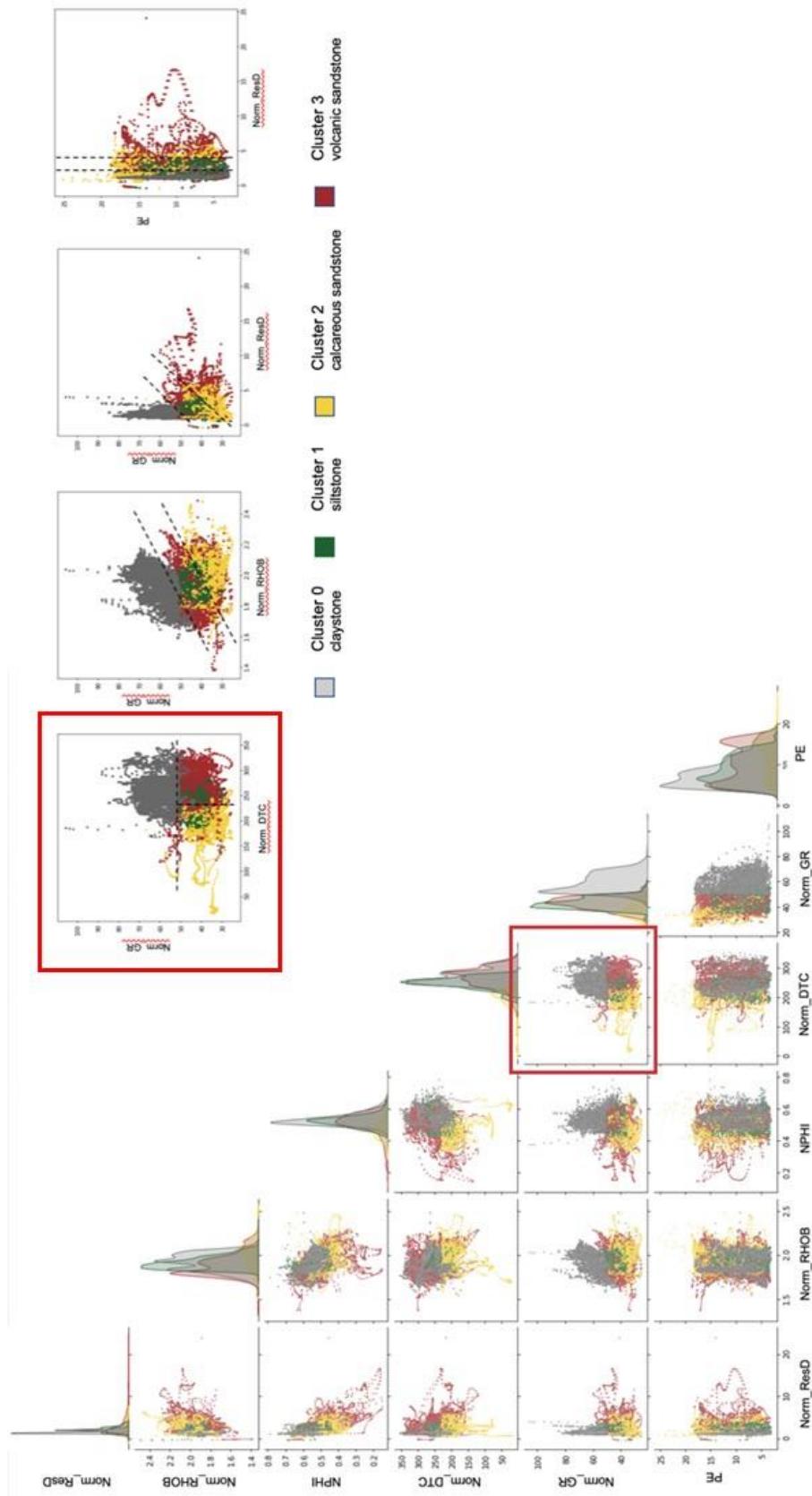
Setelah mengetahui variansi data, dilakukan klasterisasi dengan hasil klasterisasi terlihat lebih baik dibandingkan pada grafik distribusi fitur *K-means* tanpa PCA (Gambar 5b). *Crossplot* paling jelas terlihat antara log DTC (sonik) dan GR (*gamma ray*) di mana keempat fasies terlihat mengklaster dengan baik. Kombinasi *crossplot* kedua log ini merupakan hasil *crossplot* terbaik dari analisis PCA.

### 4.3. Analisis Cutoff

Tahapan analisis *cutoff* merupakan tahapan yang paling penting dalam menentukan batasan-batasan nilai fitur pada setiap fasies dengan menyinkronkan hasil analisis statistika dan geologi. Dibuat rentang nilai baru yang didapatkan dari data batuan inti dan petrografi sebagai data validasi dari hasil prediksi klaster oleh model *K-means* dan PCA. Diketahui bahwa log *gamma ray*, sonik, dan resistivitas dikatakan sensitif karena memiliki nilai separasi yang paling baik untuk memisahkan empat klaster fasies. Fasies batulempung memiliki nilai GR yang paling tinggi, kemudian fasies batulanau, fasies batupasir vulkanik, dan yang terakhir fasies batupasir karbonatan.



Gambar 5. Perbandingan crossplot distribusi data (a) sebelum dan (b) setelah PCA



Gambar 6. Hasil final crossplot (kiri) dan crossplot terbaik (kanan)

Kemudian log DTC (sonik) berhubungan erat dengan tekstur batuan memisahkan keempat fasies dengan tegas, terutama pada batupasir vulkanik dan batupasir karbonatan. Ketiga adalah log ResD (resistivitas), batulempung memiliki nilai rendah, batulanau lebih tinggi, dan kedua fasies batupasir memiliki rentang nilai yang sangat luas karena efek hidrokarbon. Sedangkan ketiga log yang lain (RHOB, NPHI, dan PEF) memiliki rentang nilai yang berhimpitan atau tumpang tindih antar fasiesnya, sehingga dikatakan bahwa log tersebut kurang sensitif terhadap perubahan pada fasies.

Sebanyak 4.055 dari 27.514 data yang nilainya tidak termasuk ke dalam rentang yang telah divalidasi terkumpul ke dalam Klaster 5. Data tersebut akan diklasifikasikan kembali menggunakan pembelajaran mesin tersupervisi dengan algoritma KNN (*k*-Nearest Neighbor) untuk menghindari adanya kesubjektifan. Hasil akurasinya adalah 0,967 atau sebesar 96% yang tertera pada *confusion matrix* dengan fasies yang paling banyak diprediksi adalah batulempung.

Dibuat *crossplot* baru yang merupakan hasil akhir dari proses klasterisasi. Terlihat bahwa *crossplot* yang paling baik adalah kombinasi antara log DTC (sonik) dengan *log gamma ray* (GR), mirip seperti *crossplot* PCA yang dihasilkan. Jumlah fasies pada Lapangan X didominasi oleh batulempung dengan persentase sebesar sebanyak 36%, kemudian batupasir vulkanik 28%, batulanau 27%, dan terakhir batupasir karbonatan 9%.

Garis nilai *cutoff* dapat terlihat dengan baik pada log DTC (sonik), *gamma ray* (GR), dan ResD (resistivitas) karena sensitif dan memiliki nilai yang mengklaster (Gambar 6). Pada log GR dapat dianalisis nilai *cutoff* antara batupasir karbonatan dengan fasies lain adalah 38 gAPI. Nilai *cutoff* gamma ray antara batulempung dengan fasies lain adalah 51 gAPI. Kemudian log ResD (resistivitas) memiliki nilai *cutoff* yang jelas antara batulempung dan batulanau dengan nilai 2 ohm meter. Terakhir adalah nilai *cutoff* antara batupasir karbonatan dengan tiga fasies lainnya pada log DTC (sonik) adalah 240 us/ft. Tumpang tindih antar fasies sering terjadi terutama pada fasies batulempung–batulanau, batulanau–batupasir karbonatan, batupasir vulkanik–batupasir karbonatan, dan batulempung–batupasir vulkanik. Solusi yang dilakukan adalah membuat *crossplot* kombinasi log dengan hanya memfilter kedua fasies tersebut.

#### 4.4. Pembelajaran Tersupervisi

Pada pembelajaran tersupervisi, dilakukan prediksi fasies dengan pembelajaran tersupervisi dengan algoritma *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* dan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Data pelatihan merupakan data log dan hasil identifikasi fasies pada Sumur Memphis\_1, Bronx\_2, Montana\_3, Berkeley\_4, dan Portobello\_5. Sedangkan data validasi adalah data log yang tidak memiliki label fasies pada Sumur Manhattan\_7 dan Brooklyn\_10.

Sebelum memasuki prediksi pada setiap algoritma, perlu dilakukan *Exploratory Data Analysis* (EDA) untuk mencari nilai korelasi. Hubungan antara data *input* dan *output* yang bernilai paling besar adalah log GR dengan

korelasi linear negatif yaitu -0,54. Kemudian log resistivitas memiliki hubungan linear positif dengan nilai terbesar yaitu 0,4. Tahapan selanjutnya adalah normalisasi data menggunakan *standard scaler* dan membagi data pelatihan dan validasi. Data pelatihan sebesar 80% dari 37.460 data dan data validasi sebesar 20%. Pada setiap algoritma pembelajaran mesin digunakan *Random Search CV* untuk menemukan nilai parameter yang paling optimal. Laporan dari hasil pelatihan terukur dalam nilai CV, *R2 Score (train)*, *R2 Score (test)*, dan *Root Mean Square Error* (RMSE), dan akurasi ditunjukkan oleh nilai *f1-score*. Nilai *cross-validation* (CV) berguna untuk mengevaluasi performa nilai estimator. Kemudian nilai *R2 Score* adalah interpretasi dari seberapa baik model regresi yang kita miliki pada data. RMSE merupakan standar untuk mengukur kesalahan suatu model, sehingga semakin rendah nilainya semakin baik. Kemudian hasil prediksi dapat ditampilkan dengan berupa *log plot* yang menampilkan prediksi fasies pada setiap kedalaman.

##### a. Support Vector Machine (SVM)

Parameter yang paling optimal untuk menggunakan model ini adalah {'gamma': 1, 'C': 1}. Hasil akurasi prediksi data pelatihan terlihat dalam *confusion matrix* adalah 99% dan data validasi adalah 97%. Nilai CV sebesar 96,7%, *R2 Score (train)* 98,9%, *R2 Score (test)* 92,5%, dan RMSE sebesar 30%. Nilai *f1-score* pada data pelatihan adalah 100%, dan pada data validasi sebesar 97%.

##### b. Random Forest

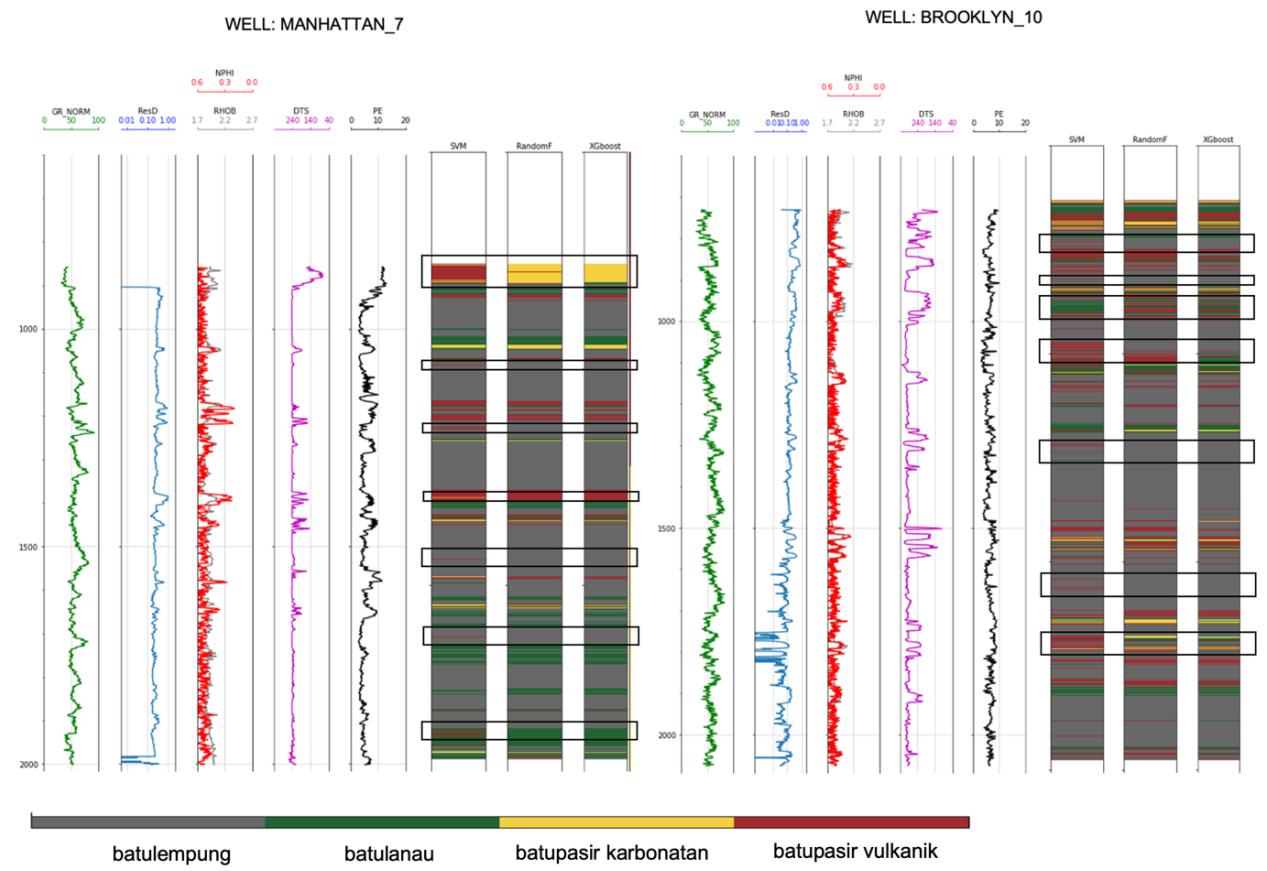
Parameter yang paling optimal untuk menggunakan model ini adalah {'n\_estimators': 100}. Hasil akurasi prediksi data pelatihan terlihat dalam *confusion matrix* adalah 100% dan data validasi adalah 98%. Nilai CV sebesar 98%, *R2 Score (train)* 100%, *R2 Score (test)* 94%, dan RMSE sebesar 26%. Nilai *f1-score* pada data pelatihan adalah 100%, dan pada data validasi sebesar 98%.

##### c. Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

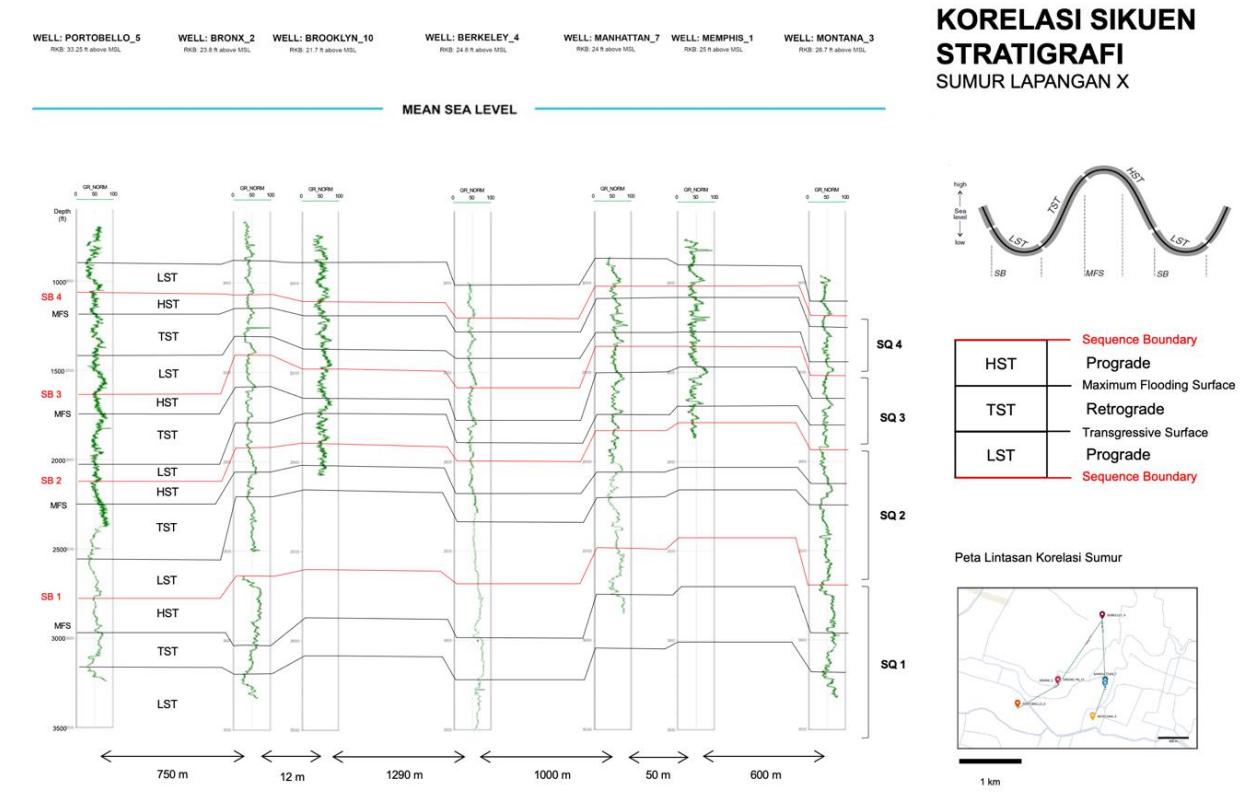
Parameter yang paling optimal untuk menggunakan model ini adalah {'gamma': 2}. Hasil akurasi prediksi data pelatihan terlihat dalam *confusion matrix* adalah 97% dan data validasi adalah 97%. Nilai CV sebesar 96,8%, *R2 Score (train)* 92,2%, *R2 Score (test)* 90,7%, dan RMSE sebesar 33,6%. Nilai *f1-score* pada data pelatihan adalah 97%, dan pada data validasi sebesar 97%.

#### 4.5. Evaluasi Algoritma

Hasil prediksi fasies dari ketiga algoritma menunjukkan hasil yang hampir mirip (Gambar 7). Namun pada SVM, beberapa fasies batupasir karbonat yang diprediksi oleh *Random Forest* dan XGBoost, diprediksi menjadi batupasir vulkanik. Selain itu fasies batulempung yang diprediksi oleh *Random Forest* dan XGBoost terkadang terprediksi menjadi batupasir vulkanik pada algoritma SVM. Hal ini diduga karena algoritma *Random Forest* dan XGBoost cenderung mengklasifikasikan fasies menggunakan log DTC, sedangkan SVM lebih cenderung kepada log GR. Fasies batupasir karbonat–batupasir vulkanik tumpang tindih pada nilai DTC, sehingga kedua



Gambar 7. Perbandingan prediksi fasies dengan tiga algoritma pada (a) sumur Manhattan\_7 dan (b) sumur Brooklyn\_10



Gambar 8. Korelasi sumur dengan analisis sikuen stratigrafi

fasis ini dapat tertukar karena memiliki karakteristik log yang mirip. Sementara itu hasil prediksi fasis dari algoritma Random Forest dan XGBoost hampir identik, hanya bervariasi pada perbedaan ketebalan lapisannya.

Penentuan performa terbaik dari ketiga algoritma dilihat dari nilai akurasi *f1-score* dan probabilitas kesalahan oleh RMSE. Ketentuan yang dicari adalah semakin tinggi nilai *f1-score*, dan nilai RMSE yang paling rendah. Kesimpulannya adalah algoritma yang paling baik digunakan pada prediksi fasis Lapangan X adalah algoritma *Random Forest* karena memiliki nilai akurasi yang paling tinggi, yaitu 100% pada data pelatihan dan 97% pada data pengujian. Probabilitas kesalahan memiliki nilai yang paling rendah, yaitu 26%, ditunjukkan oleh RMSE.

#### 4.6. Korelasi Lingkungan Pengendapan

Korelasi dilakukan dengan menggunakan metode sikuen stratigrafi pada lintasan (Gambar 8) yang melewati Sumur Portobello\_5, Bronx\_2, Brooklyn\_10, Berkeley\_4, Manhattan\_7, Memphis\_1, Montana\_3. Analisis kualitatif log GR, menunjukkan adanya empat set sekuen dari kedalaman 1100–3500 kaki. Secara umum pola defleksi log *gamma ray* menunjukkan *coarsening upward* di mana pada interval sumur yang lebih dalam memiliki nilai *gamma ray* yang lebih tinggi, dengan litologi serpih. Semakin muda ke arah atas butiran menjadi lebih kasar yaitu pasir. Hal tersebut menandakan siklus pengendapan yang menandakan proses progradasi dalam jangka waktu yang panjang. Semakin menuju Resen, lingkungan pengendapan berubah menjadi lebih dangkal.

Arah pengendapan diperkirakan datang dari arah selatan ke arah timur, karena bagian timur merupakan bagian muara sungai yaitu delta. Sumber sedimen berada di arah timur berasal dari kompleks pegunungan selatan. Sumur penelitian terletak pada daerah transisional hingga sublitoral dan merupakan hasil endapan air laut atau air payau. Analisis biostratigrafi beracuan pada Tim Penyusun Laporan Core Analysis Lapindo Brantas (2005) Sumur Berkeley\_4 dengan kehadiran foraminifera planktonik dan nanofosil yang sangat sedikit. Hal tersebut menunjukkan lingkungan yang hanya dipengaruhi secara terbatas dari arus laut terbuka. Keanekaragaman foraminifera bentik *Amonia* spp. dan *Elphidium* spp. yang terbatas dan rendah, dan tanpa ditemukannya taksa air yang lebih dalam menunjukkan lingkungan pengendapan berupa transisi, intertidal hingga mungkin sublitoral dalam. Himpunan palinologi (*palynological assemblages*) juga menunjukkan lingkungan transisi, intertidal, dan estuarin tengah ke atas.

#### 5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, metode pembelajaran mesin dapat diterapkan untuk identifikasi fasis, sehingga menghasilkan empat fasis pada Formasi Pucangan. Keempat fasis tersebut adalah batulempung, batulanau, batupasir vulkanik, dan batupasir karbonat dengan masing-masing karakteristiknya. Hubungan *input* dan *output* dari Formasi Pucangan pada fasis Lapangan X berdasarkan *heatmap* korelasi pembelajaran mesin adalah linier negatif dengan log *gamma ray* dan linier positif dengan log resistivitas. Algoritma pembelajaran mesin

terbaik yang digunakan untuk identifikasi fasis di Formasi Pucangan adalah *Random Forest* dengan akurasi *f1-score* 100% pada data pelatihan dan 98% pada data pengujian. Probabilitas kesalahan sebesar 26% ditunjukkan oleh RMSE yang memiliki nilai paling rendah dibandingkan dengan kedua algoritma lainnya.

#### Daftar Referensi

- Asquith, G. & Krygowski, D. (2004). *Basic Well Log Analysis: Second Edition*. Oklahoma: AAPG
- Caté, A., Perozzi, L., Gloaguen, E., & Blouin, M. (2017). Machine learning as a tool for geologists. *The Leading Edge* 36, 215-219. DOI: 10.1190/tle36030215.1.
- Devi, E.A., Rachman, F., Satyana, A.H., Fahrudin, & Setyawan, R. (2018). Paleofacies of Eocene Lower Ngimbang Source Rocks in Cepu Area, East Java Basin based on Biomarkers and Carbon-13 Isotopes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 118, 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012009
- Hall, B. (2016). Facies classification using machine learning. *The Leading Edge* 35(10), 906-909. DOI: 10.1190/tle35100906.1
- Karpatne, A., Ebert-Uphoff, I., Ravela, S., Babaie, H., & Kumar, V. (2017). Machine Learning for the Geosciences: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (in review)*. 31. DOI:10.1109/TKDE.2018.2861006.
- Kusumastuti, A., Darmoyo, A.B., Suwarian, W., & Sosromihardjo, S.P.C. (2000). The Wunit Field: Pleistocene Volcaniclastic Gas Sands in East Java. *Proceedings Indonesian Petroleum Association Twenty Seventh Annual Convention & Exhibition*.
- Ma, Y.Z. (2019). *Quantitative Geosciences: Data Analytics, Geostatistics, Reservoir Characterization and Modeling*. 1st ed. Switzerland: Springer. DOI:10.1007/978-3-030-17860-4
- Ma, Y.Z., Moore, W.R., Gomez, E., Luneau, B., Kaufman, P., Gurpinar, O., & Handwerger, D. (2015). Wireline log signatures of organic matters and lithofacies classifications for shale and tight carbonate reservoirs. In Y. Z. Ma & S. Holditch (Eds.), *Handbook of unconventional resources* (pp. 151–171). Waltham: Elsevier.
- Mitchell, T.M. (1997). *Machine learning*. Burr Ridge, IL: McGraw Hill, 45(37), 870-877.
- Nugroho, A.S., Witarto, A.B., & Handoko, D. (2003). Application of Support Vector Machine in Bioinformatics. *Proceeding of Indonesian Scientific Meeting in Central Japan*. Gifu-Japan
- Nugroho, I. (2020). *Perbandingan Prediksi Fasis Melalui Beberapa Machine Learning*. Skripsi. Tidak diterbitkan. Fakultas Teknologi Eksplorasi dan Produksi, Universitas Pertamina: Jakarta
- Poedjoprajitno, S., & Djunaeni. (2006). Unit Genesa Pasir Ngrayong di Desa Ngepon Jatim, Cekungan Jawa Timur Utara. *Geologi Bull.* 38.
- Pringgopraviro, H. (1983). *Stratigrafi cekungan Jawa Timur Utara dan Paleogeografinya: sebuah pendekatan baru*. Bandung: Disertasi Doktor ITB
- Raschka, S., & Mirjalili, V. (2017). *Python Machine Learning* (2nd ed.). Birmingham: Packt.
- Satyana, A.H. & Djumlati, M. (2003). Oligo-Miocene Carbonates of the East Java Basin, Indonesia: Facies Definition Leading to Recent Significant Discoveries. Barcelona: AAPG International Conference. Diakses melalui [https://www.searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2003/intl/extend/ndx\\_83403.pdf](https://www.searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2003/intl/extend/ndx_83403.pdf)

- Selley, R.C. (1985). *Ancient Sedimentary Environment*. New York: Cornell University Press
- Sribudiyani, Muchsin, N., Ryacudu, R., Kunto, T., Astono, P., Prasetya, I., Sapiie, B., Asikin, S., Harsolumakso, A.H., & Yulianto, I. (2003). The Collision of The East Java Microplate and Its Implication for Hydrocarbon Occurrences in The East Java Basin. *Proceedings of 29th Annual Indonesian Petroleum Association Convention*. Diakses melalui [https://www.researchgate.net/publication/285848798\\_The\\_collision\\_of\\_east\\_java\\_microplate\\_and\\_its\\_implication\\_for\\_hydrocarbon\\_occurrences\\_in\\_the\\_east\\_Java\\_basin](https://www.researchgate.net/publication/285848798_The_collision_of_east_java_microplate_and_its_implication_for_hydrocarbon_occurrences_in_the_east_Java_basin)
- Sugiarto, S., Agasty, I.B.O., Jene, M.O., Ramadhan, T., & Muslih, Y.B. (2018). Architectural elements of volcaniclastic mass transport deposit of Banyak Member Western Kendeng, East Java. *Proceedings of Forty-Second Annual Convention & Exhibition Indonesian Petroleum Association*.
- Susilohadi. (1995). *Late tertiary and quaternary geology of the East Java Basin, Indonesia*. Doctor of Philosophy Thesis. School of Geosciences, University of Wollongong. Strite S and Morkoc H 1992 J. Vac. Sci. Technol. B 10 1237-40 DOI number (doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02328.x)
- Tim Penyusun. (2005). *Laporan Core Analysis Lapindo Brantas Inc. PT. Geoservices*
- Van Bemmelen, R.W. (1949). *The Geology Of Indonesia, Vol. IA: Geology Of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*. Netherlands: Government Printing Office.

# Karakteristik dan Pemodelan Lapisan Batuan Non-Batu Bara untuk Identifikasi Persebaran Potensi Pembentukan Air Asam Tambang di Area Tambang Air Laya, Sumatera Selatan

Nursanita Iman Sari\*, Dyah Nindita Sahdarani dan Felix Mulia Hasudungan Sihombing

Program Studi Geologi, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,  
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia  
\*Narahubung: imaurusanita@gmail.com

## Abstrak

Kegiatan tambang batu bara akan terus dilakukan karena batu bara merupakan salah satu sumber energi yang dibutuhkan untuk pembangkit listrik. Dalam penambangan tentunya dilakukan penggalian dan pengangkutan batuan penutup. Hal tersebut menyebabkan batuan penutup tersingkap ke permukaan dan mengalami proses kimiawi. Hal ini dapat mengakibatkan terbentuknya air asam tambang yang dapat mencemari lingkungan sekitar area tambang. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pembentukan potensi air asam tambang dan hubungannya dengan lingkungan pengendapan, serta pemodelan persebaran potensi air asam tambang. Metode penelitian yang dilakukan adalah menganalisis log sumur, analisis data uji statis geokimia batuan, dan memodelkan persebaran potensi air asam tambang menggunakan perangkat lunak MineScape v5.7. Hasil dari penelitian ini adalah daerah Tambang Air Laya didominasi oleh lapisan *potential acid forming* atau PAF (73 sampel), *uncertain* (70 sampel) dan *non-acid forming* atau NAF (60 sampel). Lingkungan pengendapan daerah penelitian terbagi dua, yaitu *transitional lower delta plain* dan *upper delta plain*. Lingkungan *transitional lower delta plain* berada di lapisan *underburden* yang merupakan lingkungan yang sangat mungkin terkena pengaruh air payau-air laut sehingga menghasilkan lapisan material PAF, sedangkan pada lingkungan *upper delta plain* yang merupakan lapisan *overburden* menghasilkan lapisan PAF dan NAF yang kemungkinan kondisi lingkungannya dipengaruhi air laut maupun air tawar. Dalam *section* pemodelan persebaran potensi asam tambang, dapat dilihat bahwa pada bagian timur dan selatan lapisan material PAF mendominasi, sedangkan pada bagian utara dan barat didominasi oleh lapisan material NAF. Total volume PAF dan NAF sebesar 326.174.39 BCM (material PAF) dan 17.622.93 BCM (material NAF).

**Kata kunci:** Air asam tambang, Batu bara, Lingkungan pengendapan, NAF, PAF

## 1. Pendahuluan

Batu bara merupakan bahan bakar fosil yang terbentuk dari tumbuhan yang telah terdekomposisi serta diubah oleh tekanan dan suhu dalam jutaan tahun (World Coal Institute, 2005). Penggalian dan pengangkutan *overburden* pada kegiatan penambangan batu bara dapat mengakibatkan *overburden* tersebut tersingkap sehingga terjadinya kontak dengan udara dan air, lalu akan mengalami proses kimiawi. Proses kimiawi tersebut akan menimbulkan masalah lingkungan, salah satunya adalah terbentuknya air asam tambang.

Air asam tambang merupakan air limbah yang terjadi pada kegiatan pertambangan batu bara maupun bijih mineral yang terbentuk akibat adanya mineral sulfida yang teroksidasi oleh oksigen yang kemudian berinteraksi dengan air (Ridge, 1998). Hal tersebut menyebabkan adanya peningkatan keasaman ditandai dengan nilai pH yang rendah, yaitu kurang dari 4,5.

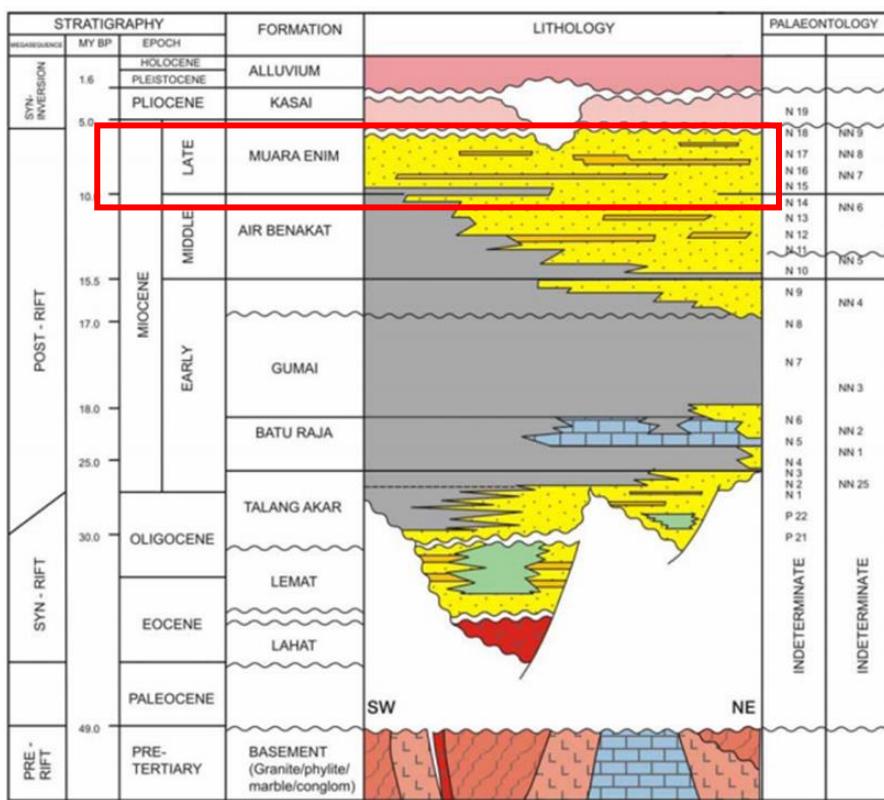
Kandungan mineral dari batuan dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pengendapan. Batu bara yang diendapkan pada lingkungan estuari memiliki pengaruh laut selama deposisi yang akan mengandung sulfur lebih tinggi dibandingkan dengan batu bara yang diendapkan pada lingkungan lakustrin (Olds et al., 2016). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa semakin melimpahnya material yang berpotensi menghasilkan air asam tambang, maka semakin tinggi pengaruh air laut saat deposisi batu bara.

Penelitian ini bertujuan untuk mengelompokan batuan sebagai *potential acid forming* (PAF) dan *non-acid forming* (NAF), menentukan lingkungan pengendapan dan pengaruhnya terhadap lapisan yang berpotensi membentuk air asam tambang dan memodelkan lapisan non-batu bara tersebut untuk mengetahui persebaran lapisan PAF dan NAF. Sehingga perusahaan dapat merencanakan pencegahan terbentuknya air asam tambang yang efektif.

Daerah penelitian yang berada di Tambang Air Laya, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatera Selatan termasuk ke dalam Cekungan Sumatera Selatan (Gambar 1). Cekungan ini terbentuk sebagai akibat dari tumbukan antara Paparan Sunda sebagai bagian dari Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia (Amier, 1991). Fitur tektonik pada Cekungan Sumatera Selatan merupakan hasil dari aktivitas orogenik pada Mesozoik Tengah hingga Plio-Pleistosen. Aktivitas tersebut berhubungan dengan kolisi dan subduksi. Daerah penelitian berada di Formasi Muara Enim yang berumur Miosen akhir hingga Pliosen.

## 2. Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diberikan oleh PT. Bukit Asam, Tbk. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu tahap pendahuluan yang dilakukan studi literatur, mempelajari bagaimana air asam tambang dapat terbentuk dan membuat peta persebaran titik bor menggunakan ArcGIS



Gambar 1. Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan. Formasi yang menjadi bahasan penelitian ditandai dengan kotak merah (Ginger & Fielding, 2005).



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

v10.6. Tahap pengumpulan data yang berupa data sekunder yang meliputi data bor (koordinat x dan y, elevasi, dan kedalaman), data topografi, data laboratorium uji statis geokimia berupa *acid neutralizing capacity* (ANC), *maximum potential acidity* (MPA), *net acid production potential* (NAPP) dan *net acid generating* (NAGpH), serta data log sumur bor dan data batuan inti. Dan tahap pengolahan dan analisis data yang dilakukan berupa analisis karakteristik batuan dan lingkungan pengendapan dengan log sumur bor dan data batuan inti, analisis geokimia batuan dengan dua metode, yaitu perbandingan ANC/MPA dan NAPP/NAGpH, serta pemodelan persebaran lapisan PAF dan NAF menggunakan MineScape v5.7 (Gambar 2).

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Karakteristik dan Korelasi Litologi Hasil Pengeboran

Secara keseluruhan litologi penyusun antarsumur memiliki karakteristik yang sama, yaitu batulempung, batu bara, batulanau, dan batupasir (Gambar 3). Secara vertikal, terdapat perubahan litologi yang mengasar ke atas atau suplai batupasir banyak terdapat pada overburden, sedangkan pada underburden banyak disusun oleh batulempung. Secara lateral, terjadi penebalan batulempung serta penipisan batupasir dan batu bara semakin ke arah utara. Hal ini mengindikasikan bahwa pengendapan mengarah ke utara.

#### 3.2. Analisis Geokimia Batuan

Hasil analisis dari metode perbandingan ANC dan MPA, dinyatakan bahwa jika nilai ANC/MPA <1, maka sampel batuan dapat diklasifikasikan sebagai PAF atau berpotensi membentuk air asam tambang yang besar. Jika nilai ANC/MPA >1, maka sampel batuan dapat diklasifikasikan sebagai NAF atau potensi membentuk air asam tambang semakin kecil atau bahkan tidak ada sama

sekali. Tabel 1 dan Gambar 4 merupakan hasil perbandingan ANC dan MPA.

Tabel 1. Hasil analisis perbandingan ANC/MPA.

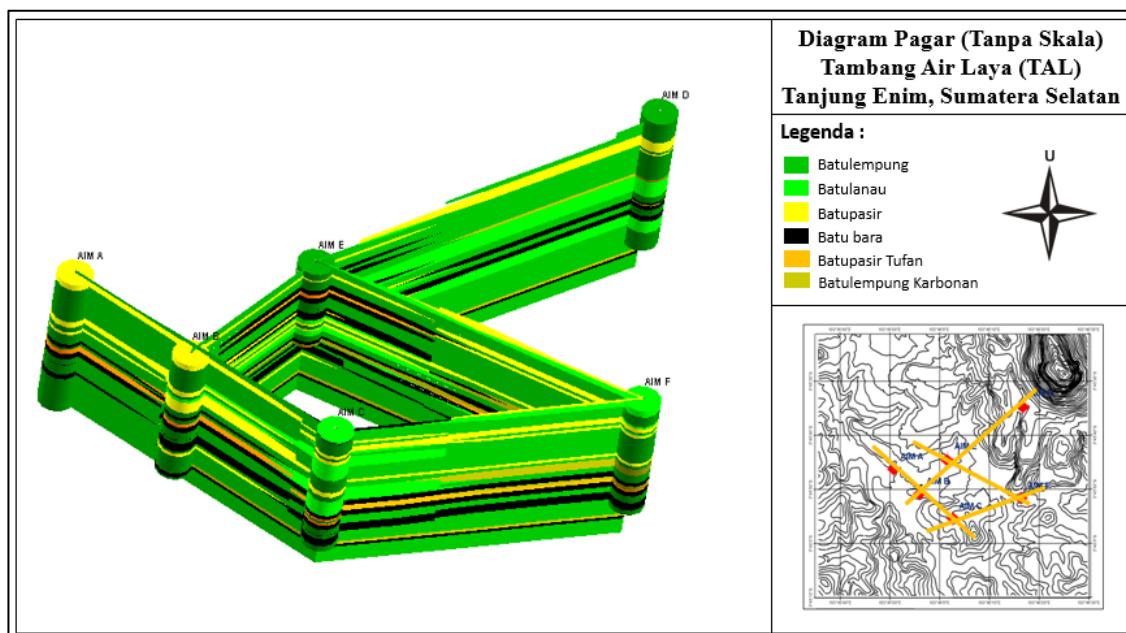
Titik Bor	Jumlah PAF (sampel)	Jumlah NAF (sampel)
AIM A	12	24
AIM B	21	15
AIM C	12	28
AIM D	12	24
AIM E	17	4
AIM F	15	19

Hasil analisis dari metode perbandingan NAPP dan NAGpH, dinyatakan bahwa nilai NAPP  $\leq 0$  dan NAGpH  $>4.5$  diklasifikasikan sebagai NAF dan nilai NAPP  $>0$ , NAGpH  $\leq 4.5$  diklasifikasikan sebagai PAF, serta nilai selain itu diklasifikasikan sebagai uncertain. Tabel 2 dan Gambar 5 merupakan hasil perbandingan NAPP dan NAGpH.

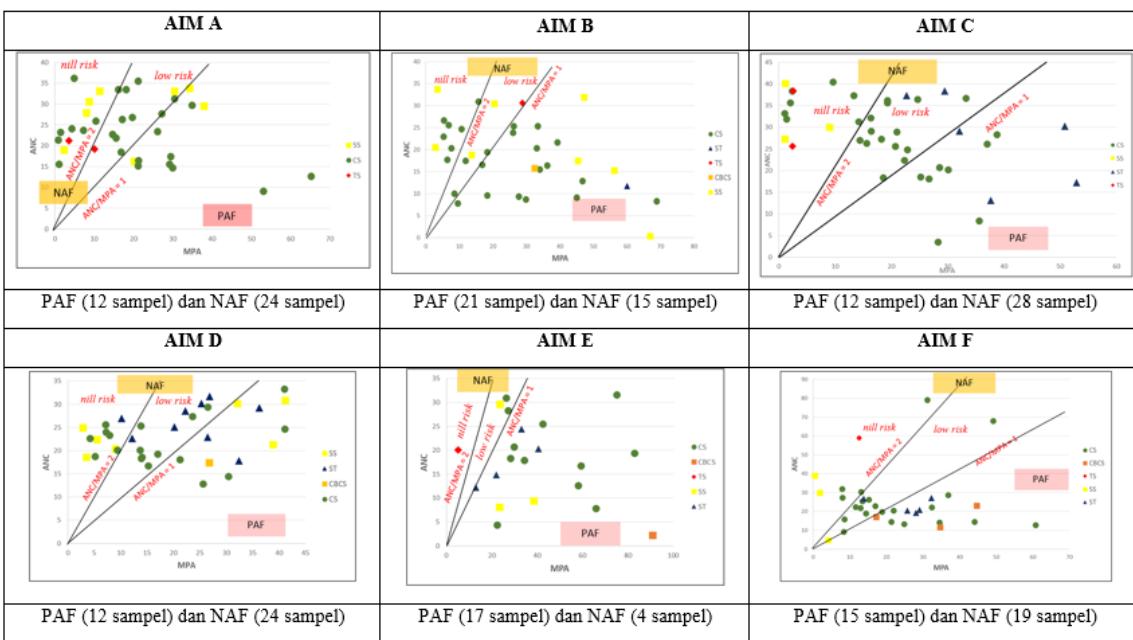
Tabel 2. Hasil analisis perbandingan NAPP dan NAGpH.

Titik Bor	Jumlah PAF (sampel)	Jumlah NAF (sampel)	Jumlah uncertain (sampel)
AIM A	12	17	7
AIM B	19	9	8
AIM C	12	4	24
AIM D	5	21	10
AIM E	11	4	6
AIM F	14	5	15

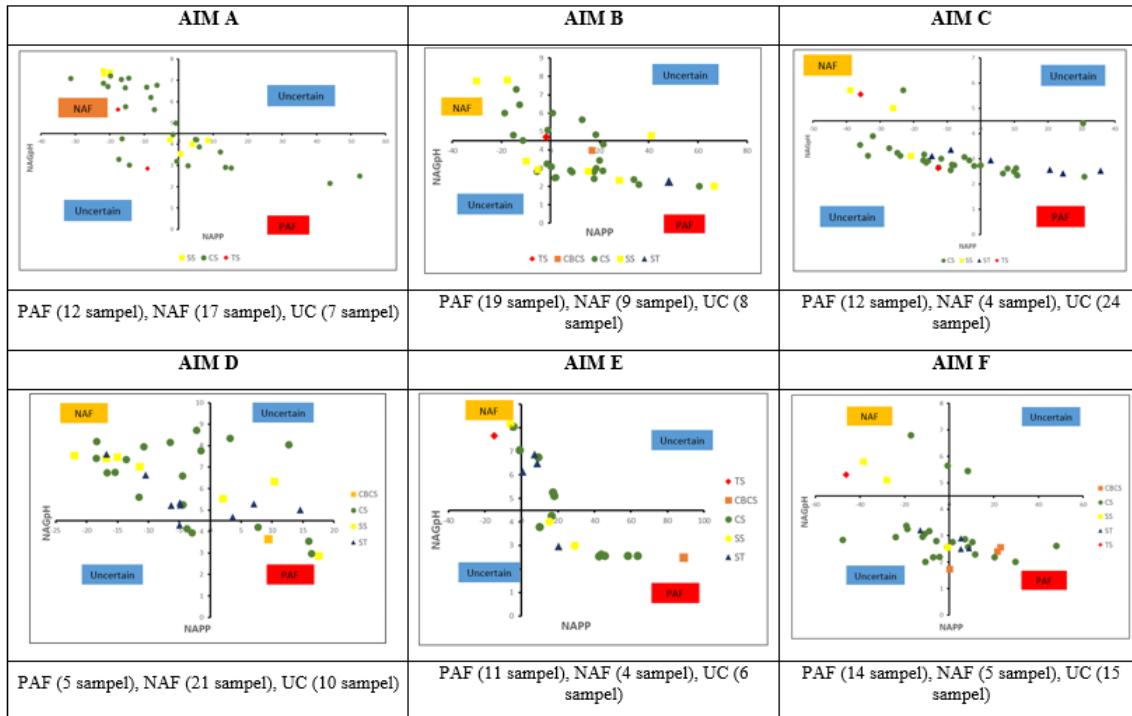
Dari analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa material PAF yang paling dominan pada daerah penelitian. Jenis litologi yang paling dominan mengandung material PAF secara urut yaitu batulempung karbonan (100%), batulanau (37,5%), batulempung (36,3%) dan batupasir (29%). Untuk jenis litologi yang paling dominan mengandung material NAF secara urut yaitu batupasir tufan (85,7%), batupasir (45.2%), batulempung (25.9%) dan batulanau (16.7%). Sisa dari persentase tersebut masuk dalam sampel yang mengandung material uncertain yang harus ada uji lebih detail (uji kinetik).



Gambar 3. Korelasi litologi tiap sumur bor.



Gambar 4. Diagram plot perbandingan ANC/MPA,



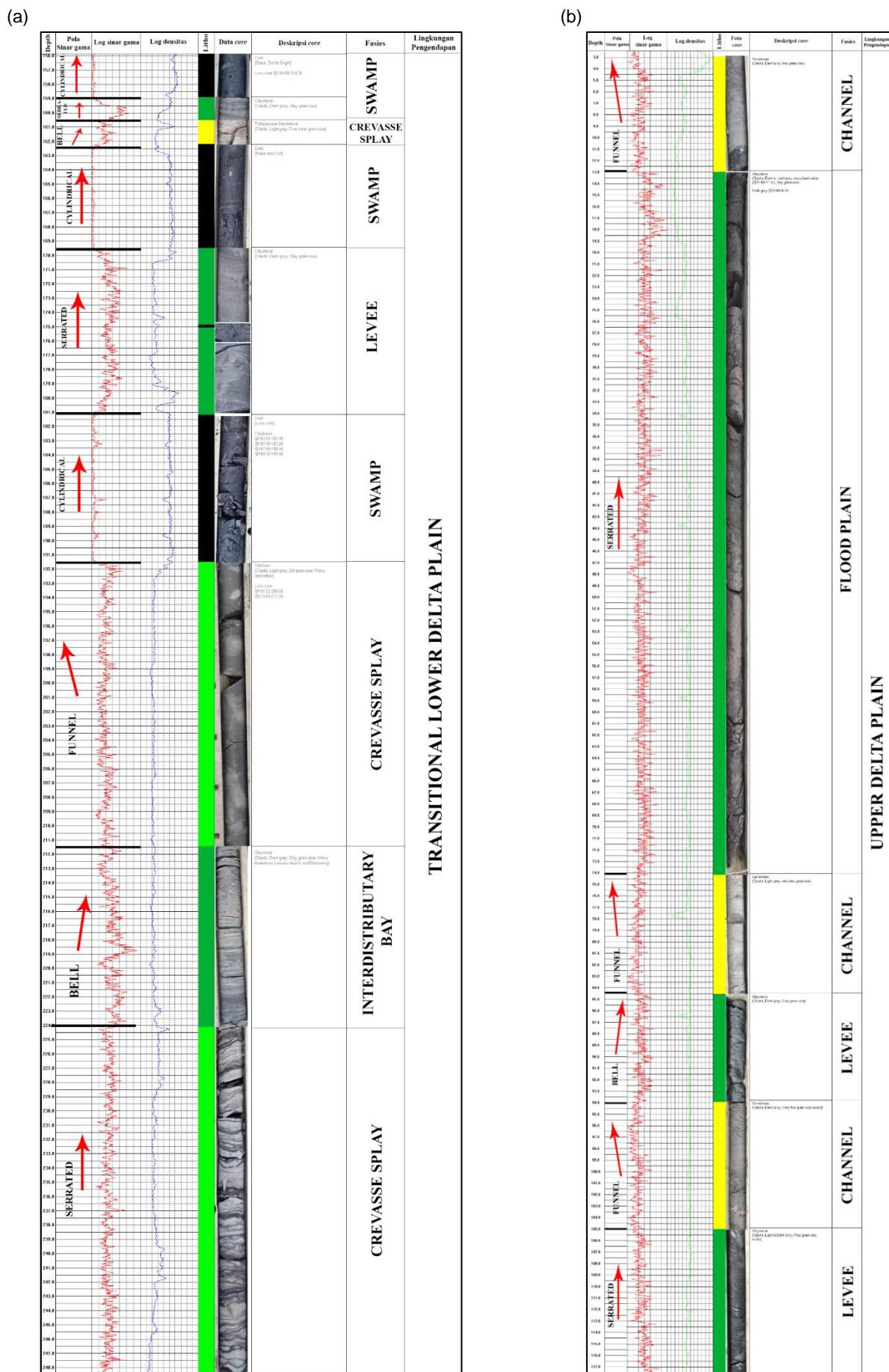
Gambar 5. Diagram plot perbandingan NAPP dan NAGPh.

### 3.3. Analisis Lingkungan Pengendapan

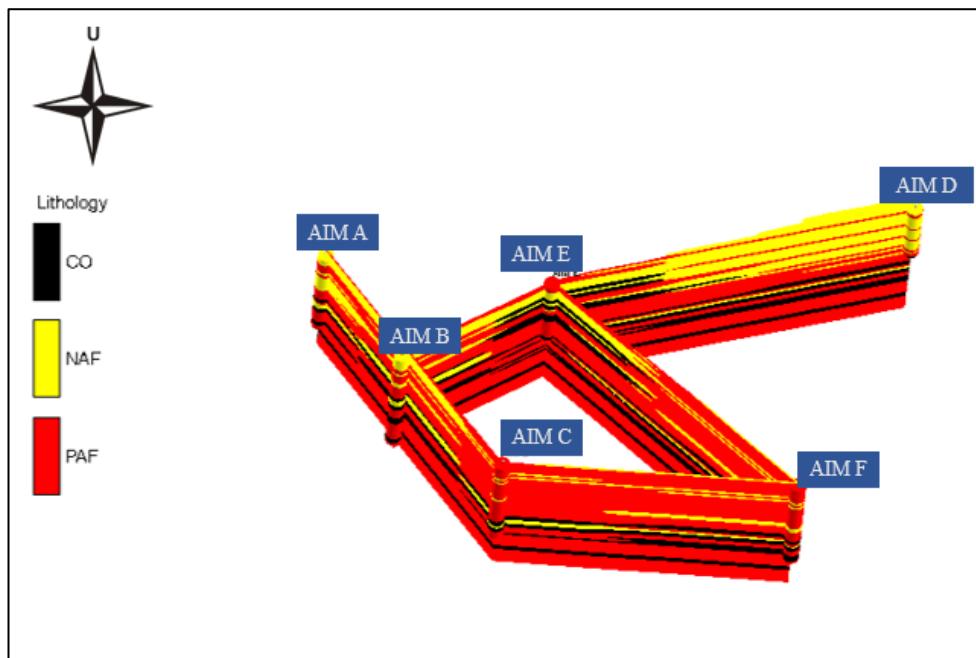
Pada daerah penelitian ditemukan bahwa batuan sedimen *underburden* dominan dengan ciri kurva sinar gama berupa *cylindrical* dan *serrated* (Gambar 6a). Batuan *underburden* ini berbutir halus yang kemungkinan memiliki proses pengendapan dengan energi rendah atau dapat juga diyakini material sedimen tertranspor semakin menjauh dari sumbernya sehingga mengendapkan material sedimen yang halus. Terdapat pula sisipan batu bara yang diyakini terendapkan saat air tergenang dengan tenang dan juga terdapat tumbuhan yang mendukung

untuk pembentukan batu bara. Pada saat pembentukannya, terjadi fluktuasi permukaan air laut yang signifikan. Oleh karena itu dapat diinterpretasikan bahwa lapisan *underburden* ini terbentuk di lingkungan *transitional lower delta plain*.

Pada lapisan yang lebih muda atau *overburden* dominan ciri kurva sinar gamma *funnel*, *bell* dan *serrated* (Gambar 6b). Lapisan batupasir pada *overburden* lebih banyak dibandingkan pada *underburden*. Pada batuan *overburden* ini terjadi pasang-surut yang signifikan. Ketika pasang akan menghasilkan batuan berbutir halus dan



Gambar 6. (a) Analisis log sumur dan interpretasi lingkungan pengendapan *underburden* AIM D;  
 (b) Analisis log sumur bor dan interpretasi lingkungan pengendapan *overburden* AIM A.



Gambar 7. Diagram pagar persebaran material PAF dan NAF.

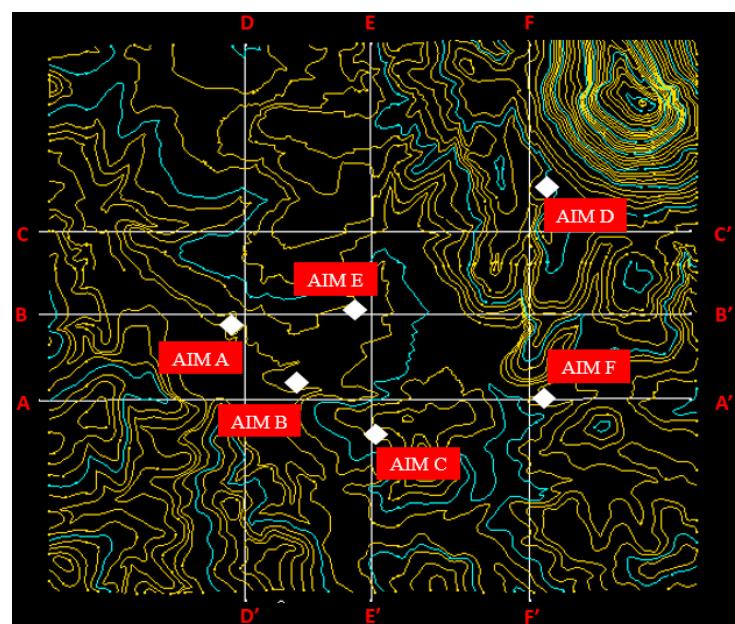
ketika surut ketika air berenergi tinggi dapat diendapkan batupasir atau dapat juga mengindikasikan sumber sedimen yang masih dekat dengan pengendapan. Berdasarkan pola litologi tersebut *overburden* berada di lingkungan *upper delta plain*.

#### 3.4. Korelasi Lingkungan Pengendapan Terhadap Potensi Air Asam Tambang

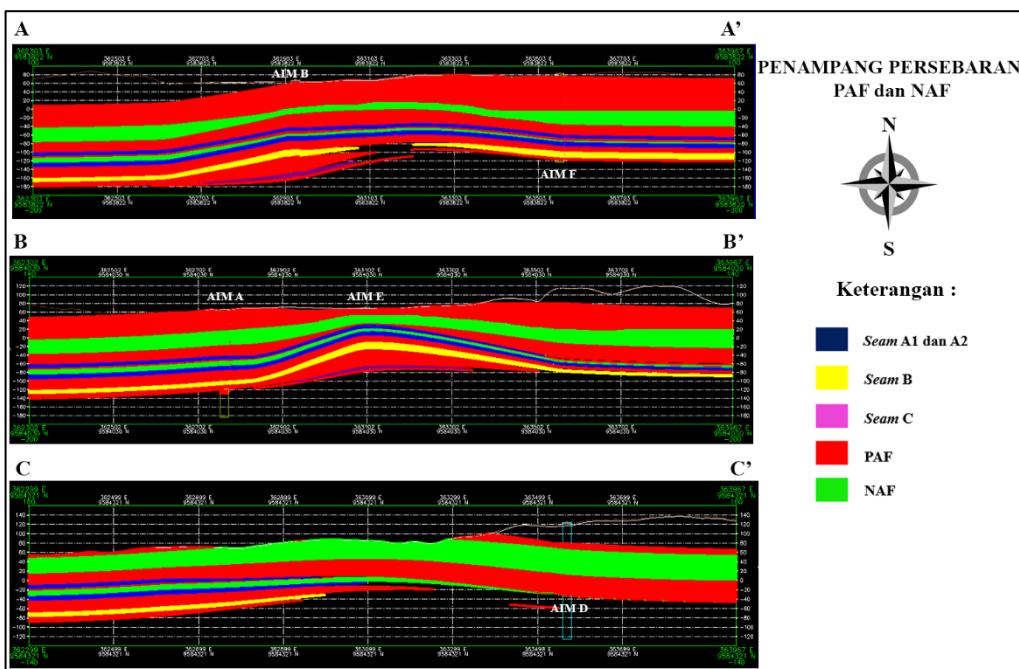
Karakteristik batuan *underburden* yaitu dicirikan dengan batulempung dan batulanau dominan berwarna abu-abu gelap yang dapat diindikasikan dengan adanya kandungan organik atau mineral sulfida (Nichols, 2009). Jika dikorelasikan dengan analisis geokimia potensi air asam tambang, semua lapisannya mengandung material PAF (Gambar 7). Hal tersebut terjadi dikarenakan

pengaruh air laut yang lebih besar atau bahan organik sehingga dapat mendukung pembentukan mineral sulfida yang menjadi faktor dalam potensi membentuk air asam tambang. Dibuktikan dengan teori yang menyatakan bahwa *transitional lower delta plain* dapat dipengaruhi oleh air payau-air laut yang dapat membentuk mineral sulfida.

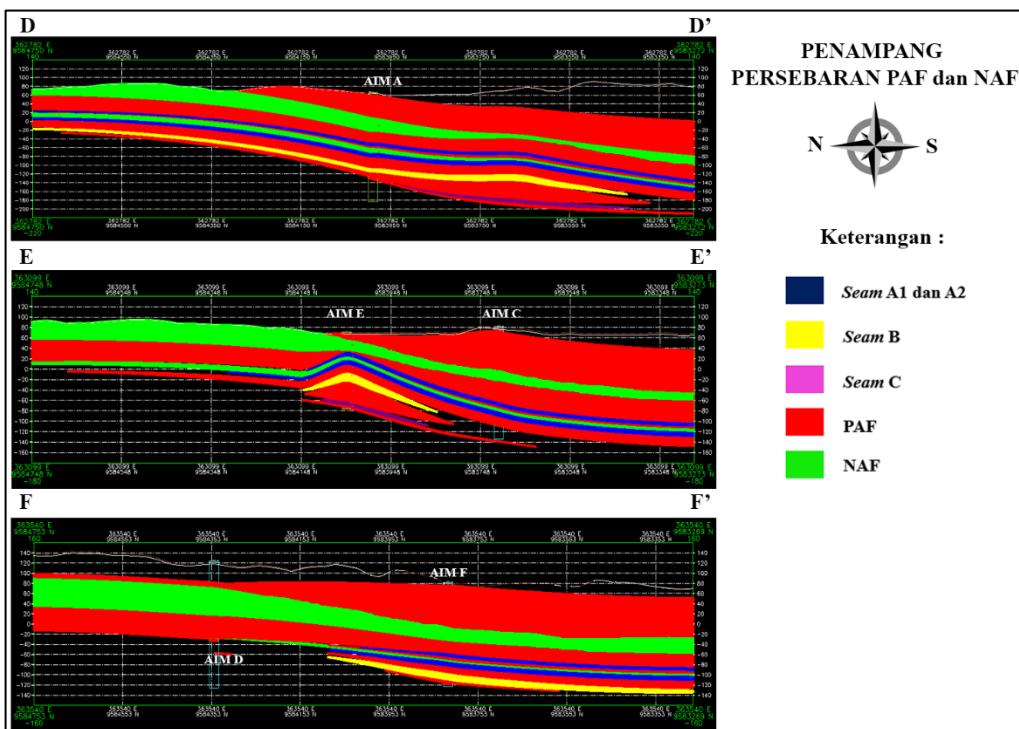
Karakteristik batuan pada *overburden* dicirikan dengan batuan berwarna abu-abu terang hingga gelap. Seperti yang telah dijelaskan bahwa batuan yang berwarna gelap dapat diindikasikan adanya kandungan organik atau mineral sulfida. Jika dikorelasikan dengan geokimia batuan potensi air asam tambang (Gambar 7), pada *overburden* masih didominasi oleh PAF dan NAF tetapi material PAF masih tetap paling dominan. Hal ini



Gambar 8. Garis penampang dan topografi daerah penelitian.



Gambar 9. Penampang persebaran lapisan PAF dan NAF (barat-timur).



Gambar 10. Penampang persebaran lapisan PAF dan NAF (utara-selatan).

menunjukkan bahwa kondisi lingkungan *upper delta plain* masih dapat dipengaruhi oleh air laut dan air tawar sehingga dapat membentuk endapan yang menghasilkan material PAF dan NAF.

### 3.5. Pemodelan dan Perhitungan Volume Potensi Air Asam Tambang

Berdasarkan analisis geokimia batuan yang telah dilakukan untuk mengelompokkan klasifikasi yang masuk dalam PAF dan NAF, maka selanjutnya adalah memodelkan setiap titik bor untuk mengetahui pola persebaran serta dapat mengetahui volume material PAF

dan NAF di daerah penelitian. Berdasarkan hasil pemodelan dengan 6 penampang tersebut (Gambar 8) dapat disimpulkan bahwa secara lateral pada area Tambang Air Laya semakin ke arah utara lapisan material NAF semakin tebal dan semakin ke arah timur terjadi penebalan material PAF (Gambar 9 dan 10). Secara vertikal, lapisan pada interburden (lapisan antara batu bara) A2-B hingga underburden C didominasi oleh lapisan material PAF, interburden A1-A2 memiliki perbandingan material PAF dan NAF yang sama tipisnya serta pada overburden A1 keseluruhan memiliki ketebalan lapisan PAF dan NAF yang berbeda antar penampang (Gambar 9

dan 10). Berdasarkan hasil perhitungannya, volume PAF dan NAF sebesar 326.174.39 BCM (material PAF) dan 17.622.93 BCM (material NAF).

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan data dan interpretasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Dalam analisis geokimia batuan secara keseluruhan terdapat 203 sampel batuan, daerah penelitian didominasi dengan PAF.
2. Litologi pada sebagai PAF yang paling dominan adalah batuempung karbonan sedangkan litologi yang paling dominan pada sebagai NAF secara urut yaitu batupasir tufan.
3. Pada lapisan underburden merupakan lingkungan transitional lower delta yang menghasilkan material PAF sedangkan pada overburden merupakan lingkungan upper delta plain yang menghasilkan lapisan PAF dan NAF.
4. Dalam section pemodelan persebaran potensi air asam tambang, dapat dilihat bahwa pada bagian timur dan selatan lapisan material PAF mendominasi sedangkan pada bagian utara dan barat didominasi oleh lapisan material NAF. Total volume PAF dan NAF sebesar 326.174.39 BCM (material PAF) dan 17.622.93 BCM (material NAF).

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih penulis untuk Bapak Arya Gustifram, selaku pembimbing penulis dari PT. Bukit Asam, Tbk, dan Mas Irza selaku teman dan pekerja tambang yang selalu memberikan ilmu mengenai topik jurnal ini.

#### Daftar Pustaka

- Amier, R.I. (1991). *Coals, source rocks and hydrocarbons in the South Palembang sub-basin, South Sumatra, Indonesia*. Australia: University of Wollongong.
- Ginger, D. & Fielding, K. (2005). The Petroleum Systems and Future Potential of The South Sumatra Basin, Indonesia. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 30th Annual Convention and Exhibition*.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy 2nd Edition*. UK: Willey-Blackwell
- Olds, W.E., Weber, P.A., Pizey, M.H., & Pope, J. (2016). Acid mine drainage analysis for the Reddale Coal Mine, Reefton, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 59(2), 341–351. <https://doi.org/10.1080/00288306.2016.1148056>
- Ridge, T. (1998). *Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania*. Environmental Protection.
- World Coal Institute. (2005). Sumber Daya Batu Bara. 1–50. [https://www.worldcoal.org/file\\_validate.php?file=coal\\_resouce\\_indonesian.pdf](https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_resouce_indonesian.pdf)