

## Korelasi Sebaran Gempabumi dan Densitas Kelurusan pada Keamanan Calon Tapak PLTN Bojonegara, Banten

Rizqi Muhammad Mahbub\*<sup>1</sup>, Hill Gendoet Hartono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Geologi, Departemen Teknik, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

\* [rizqimahbub@itny.ac.id](mailto:rizqimahbub@itny.ac.id)

### Abstrak

Pembangkit listrik tenaga nuklir sangat potensial didukung dari sumberdaya bahan nuklir melimpah di Indonesia. Lokasi calon tapak PLTN Bojonegara di Banten masih dalam perencanaan didukung dari aspek tektonik. Daerah transisi pulau Sumatera dan Jawa tahun 2009-2019 terjadi gempa tektonik mengakibatkan zona hancuran berdampak bukan hanya daerah pesisir melainkan zona sesar aktif gempa. Tujuan penelitian adalah menentukan zona bahaya tapak dari sebaran gempa melalui metode densitas kelurusan dari data peta landsat 8, geologi regional serta data focal mechanism. Pola kelurusan yang sama dengan arah pergerakan sesar merupakan akurasi kelurusan diakibatkan tektonik. Jumlah gempa Magnitudo 2 – 9 yang terdeteksi di perairan Selat Sunda hingga daratan Banten diakibatkan oleh karakteristik gempa mekanisme sesar geser di kedalaman dangkal ( $\leq 20$  km), adapun mekanisme sesar geser ini reaktivasi sesar di tenggara dan timurlaut Serang, Banten. Daerah densitas kelurusan tinggi dan distribusi gempa dengan mekanisme sesar geser dapat mempengaruhi kerawanan tinggi calon tapak PLTN Bojonegara.

**Kata Kunci:** PLTN, Banten, Gempa, Tektonik, Densitas

### Abstract

Nuclear power plants have the potential to be supported by abundant nuclear material resources in Indonesia. The location of the Bojonegara nuclear power plant prospective site in Banten is still in planning supported from the tectonic aspect. The transition regions of the islands of Sumatra and Java in 2009-2019 occurred tectonic earthquakes resulting in the destruction zone impacting not only the coastal area but the active fault zone of the earthquake. The purpose of this study was to determine the site hazard zone of the earthquake distribution through the straightness density method from map of Landsat 8, regional geology and focal mechanism data. The same straightness pattern with the direction of the fault movement is the accuracy of the alignment caused by tectonics. The magnitude of earthquake magnitude 2 - 9 detected in Sunda Strait waters to the mainland of Banten is caused by the characteristics of the earthquake shear fault mechanism at shallow depth ( $\leq 20$  km), while the shear fault mechanism reactivates faults in the southeast and northeast of Serang, Banten. Areas of high lineament density and earthquake distribution with shear fault mechanism can affect the high vulnerability of prospective Bojonegara nuclear power plant sites.

**Keywords:** PLTN, Banten, Earthquake, Tektonik, Densitas

### 1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga nuklir sangat dibutuhkan di Indonesia mengingat listrik dari batubara sangat merusak lingkungan. Sumberdaya bahan tenaga nuklir sangat berlimpah di Indonesia, sedangkan pembangkitnya belum terlaksana dibangun mengingat hal yang mengancam bahwa wilayah Indonesia sangat aktif tektonik dan gempa yang terjadi signifikan di tiap tahunnya. Gempabumi merupakan fenomena alam yang sering terjadi di darat atau di laut akan menjadi ancaman dalam kehidupan manusia. Secara tiba-tiba dan tidak dapat diprediksi gempabumi dapat menelan banyak korban juga pemicu tsunami. Tingkat kerawanan terhadap bahaya gempabumi dapat diukur dengan mengenali dampak dan sebaran sumber gempa.

Daerah survei tapak PLTN di Bojonegara masih terus dikaji dalam aspek geologi, khususnya tektonik. Parameter dalam memahami korelasi kelurusan tektonik dengan karakteristik gempa diantaranya parameter pusat gempa, kedalaman gempa, magnitudo, focal mechanism, waktu kejadian. Kelurusan terbagi menjadi tiga yaitu kelurusan lembahan, punggung, dan gawir. Focal mechanism menampilkan geometris dari pergerakan sesar saat terjadi gempa bumi [1]. Kumpulan sumber gempa yang saling

berdekatan umumnya memiliki visualisasi *focal mechanism* yang sama. Pemetaan kelurusan dengan sumber gempa dangkal mengidentifikasi reaktivasi sesar (*surface faulting*).

Pensesaran permukaan merupakan pergeseran di permukaan tanah akibat adanya pergerakan diferensial sepanjang sesar pada saat terjadi gempa. Sesar yang reaktivasi adalah Sesar Cimadiri berarah timurlur - baratdaya, dengan kajian sebaran gempa dengan kelurusan tektonik kapabel didefinisikan sebagai sesar yang mempunyai potensi terjadinya pergeseran di atau dekat dengan permukaan tanah.

Lokasi penelitian berada di Bojonegara, Serang (Gambar 1). Data catatan gempa di Serang hingga terjadi di selat sunda sejak tahun 2009-2019 lebih dari 100 gempa berkekuatan  $> 3$  Mw diambil dari BMKG seismisitas. Tektonik aktif bekerja sehingga lempeng terus bergerak. Model pergerakan tektonik perkembangan sesar sumatera di Selat Sunda terhenti di palung [2]. Mekanisme zona sesar berdasarkan kedalaman [3]. Kelurusan topografi lembah diduga zona deformasi sebagai kontak litologi, sesar vertikal [4]. Diantara topografi tinggi dan rendah memiliki bentuk pipih paralel serta memiliki orientasi menunjukkan daerah potensi struktur [5]. Pola aliran dengan elevasi dan kemiringan yang menonjol mengindikasikan dekat pertemuan antara kelurusan tektonik dan sesar [6].

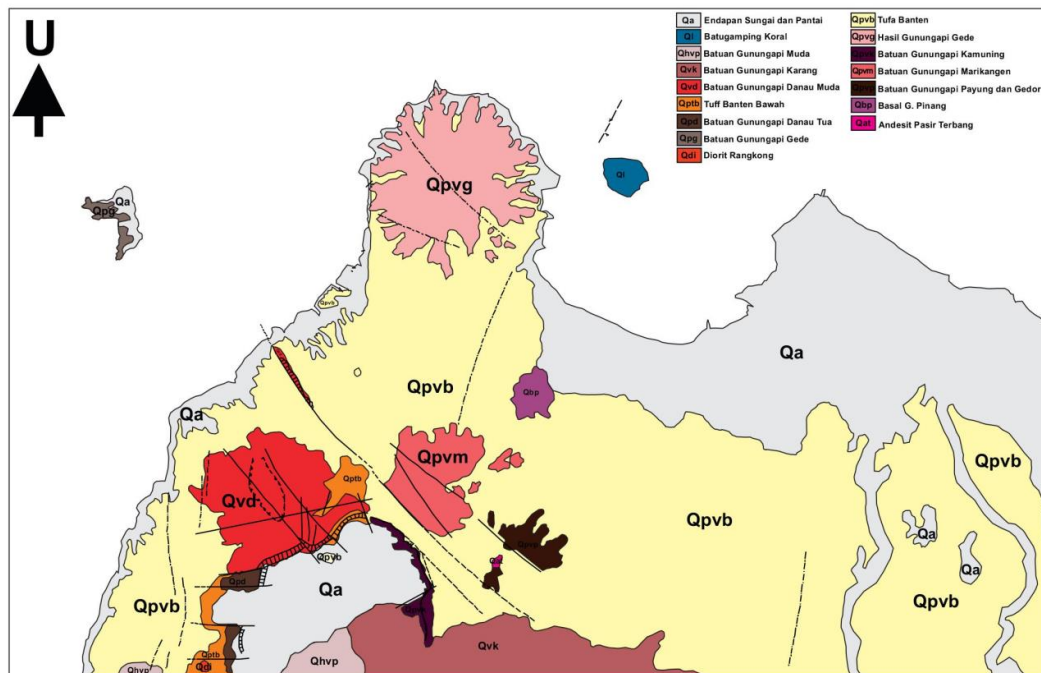
Permasalahan yang timbul di daerah penelitian dengan gempa tektonik yang meningkat sehingga sesar berumur Tersier dapat teraktivasi dan dijumpai di lembah. Kependudukan di permukiman wilayah Serang dan Cilegon masih termasuk zona tidak aman disebabkan lokasi pusat gempa berada dekat dengan radius 20 – 30 km. Tektonik aktif dapat menyebabkan bahaya gempabumi setempat jika penyusun batuan di lokasi penelitian tidak kompak. Tujuan khusus yang dilakukan adalah menentukan zonasi sebaran gempa yang berhubungan dengan kelurusan tektonik Kenozoikum. Berdasarkan tujuan ini maka urgensinya penerapan metode densitas kelurusan tektonik pada daerah zona lemah dibantu dengan peta landsat dan seismisitas gempa.



**Gambar 1.** Lokasi calon tapak PLTN Bojonegara Wilayah Banten

## 2. Kondisi Tektonik Dan Struktur Geologi Di Banten

Banten merupakan wilayah yang juga terdeformasi akibat tektonik kompresi di subduksi Selat Sunda. Gunungapi Krakatau menandakan bahwa wilayah Banten termasuk zona aktif yang sering mengalami gempa periode 2009 – 2019. Fenomena gempa tektonik terjadi dan tersebar di perairan Selat Sunda dan daratan Pulau Jawa dan Sumatera. Kelurusan terdiri dari arah struktur Meratus, Sunda dan Jawa. Berikut seperti di dalam geologi regional pola-pola struktur di daratan Pulau Jawa memiliki dominasi tiga arah struktur utara – selatan, timurlaut – baratdaya, dan baratlaut – tenggara (Gambar 2).



**Gambar 2.** Peta Geologi Regional Lembar Anyer [7] dan Serang [8] menerangkan bahwa wilayah Banten didominasi oleh Endapan Kuartar

Kajian geologi regional terdiri atas 4 (empat) periode tektonik yang berpengaruh terhadap struktur geologi di bagian barat daya Pulau Jawa menurut oleh [9], dalam [10], lihat dalam Gambar 3. Periode – periode ini berhubungan dengan adanya reaktivasi sesar di dekat lokasi penelitian.

#### A. Periode Oligosen Akhir- Miosen Awal

Periode tektonik pertama yaitu pengangkatan Pegunungan Selatan wilayah Banten juga batupasir di Kala Eosen-Oligosen daerah Ciletuh terlipat membentuk antiklin berarah timur laut-barat daya. Pada periode ini terbentuk juga struktur berarah barat-timur, seperti di dataran tinggi Sukabumi, dataran rendah Cibadak sampai Pelabuhan Ratu serta Lajur Cimandiri pada akhir periode ini.

#### B. Periode Miosen Tengah - Miosen Akhir

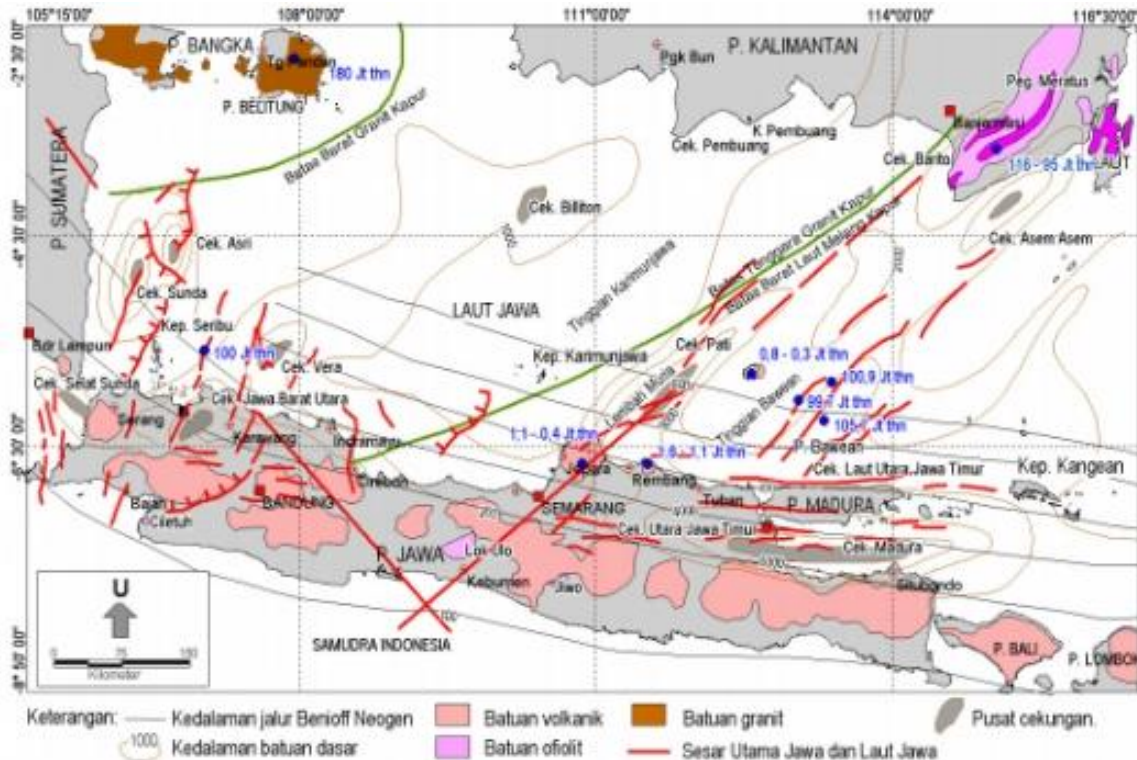
Pada periode ini bagian barat daya Pulau Jawa mengalami pengangkatan, perlipatan dan selanjutnya diikuti dengan pembentukan sesar. Struktur geologi yang terjadi hampir mempengaruhi seluruh lipatan dan sesar tua yang memanjang berarah barat-timur. Diduga pula bahwa telah terjadi suatu pembengkokan (flexure) pegunungan selatan Jawa Barat serta terjadi kegiatan vulkanik secara berlanjut.

#### C. Periode Pliosen-Plistosen

Pada periode ini terjadi aktivitas tektonik yang mengangkat kembali Lajur Pegunungan Selatan Jawa Barat yang disertai perlipatan lemah dataran tinggi Honje dan dataran rendah Malingping sebelah barat pada Lajur Cimandiri tersesarkan. Adapun sesar geser arah barat daya-timur laut telah dipotong sesar yang telah ada.

#### D. Periode Kuartar

Aktivitas tektonik Kuartar di wilayah ini yang mencakup pensesaran, perlipatan, penurunan dan lainlain dimulai sejak Plistosen sampai Holosen. Aktivitas tektonik tersebut dipicu oleh pertemuan antara Lempeng Samudera Hindia Australia dengan Lempeng tepian benua Eurasia.

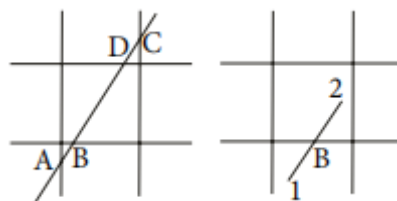


Gambar 3. Perkembangan Tektonik Pulau Jawa [11], dalam [10]

3. Metode Penelitian

3.1 Densitas Kelurusan dan Hitung Panjang

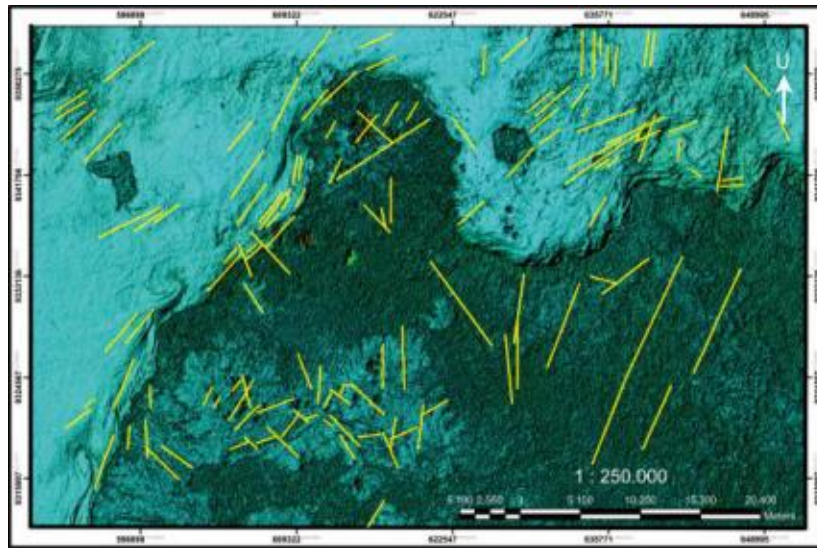
Metode yang mudah dilakukan dalam menentukan densitas kelurusan yaitu dengan membuat grid dengan sisi - sisi yang sama. Di penelitian ini menggunakan grid 500m x 500m di dalam peta landsat 8. Cara yang dilakukan dalam pengukuran panjang kelurusan seperti dalam Gambar 4, yaitu dengan membagi panjang di tiap grid. Panjang (B) ke (D) di dalam grid dikalikan dengan skala 1:250.000, maka didapatkan panjang kelurusan sebenarnya. Dalam pengukuran densitas maka total panjang kelurusan di dalam satu grid dibagi dengan luas grid (250.000m<sup>2</sup>).



Gambar 4. Variasi Segmen Garis Panjang Kelurusan [12]

Metode densitas kelurusan digunakan untuk tingkat kerapatan kelurusan yang diidentifikasi sebagai sesar permukaan. Metode ini sering dipakai untuk analisis zona lemah, zona permeabilitas batuan tersesarkan, penentuan zona akuifer terkekarkan, analisis sebaran mineralisasi. Data yang digunakan berupa peta geologi regional, peta google earth, peta landsat 8 RGB. Pada prinsipnya zona yang memiliki kerapan lebih tinggi merupakan zona lemah. Dalam penentuan kelurusan memiliki arah yang dapat digunakan sebagai parameter jenis struktur terhadap arah gaya tektonik (Gambar 5).



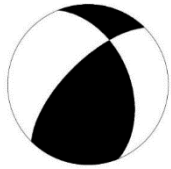
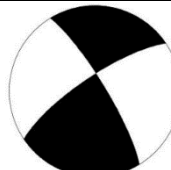


Gambar 5. Peta kelurusan di daratan Banten dan sebagian di perairan.

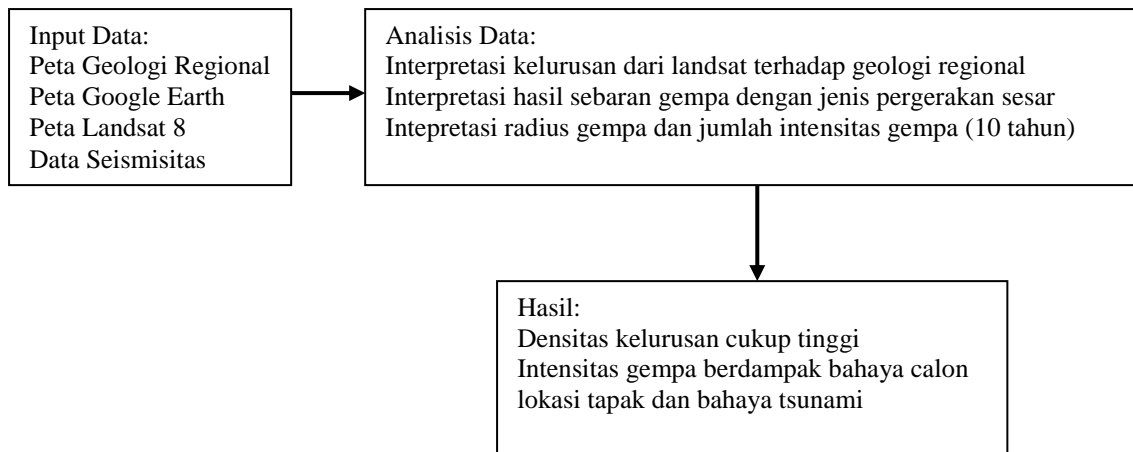
**3.2 Focal mechanism sebagai Gemoetris Pergerakan Sesar**

Pergerakan kerak di daerah Selat Sunda teridentifikasi menggunakan *focal mechanism* yang terekam dari alat geofisika (Tabel 1). Tatanan tektonik berhubungan dengan persebaran gempa yang terjadi di darat maupun di perairan Selat Sunda dan Laut Jawa. Data yang diperoleh berupa bidang sesar, rake, dan kedalaman. Pusat gempa berada di zona transisi antara brittle dan ductile berdasarkan mekanisme sesar yang dikemukakan oleh [3]. Pergerakan yang disebabkan kompresi yaitu pergeseran geser dan sesar naik [13]. Perkembangan sesar geser menimbulkan gaya ekstensi sehingga kemunculan gunung api Krakatau terpicu mengeluarkan magma saat aktivitas gempa intensif terjadi di sekitarnya. Gempa berkekuatan 2,9 – 6,0 Mw meningkat di akhir 2018 hingga saat ini. Lokasi Tapak menjadi perhatian khusus dampak adanya gempa yang menimbulkan kerusakan fisik atau oleh tsunami di perairan di utara Jawa.

Tabel 1. Focal mechanism di sekitar Selat Sunda

<i>Epicenter</i>	<i>Lokasi</i>	<i>Mw</i>	<i>Kedalaman</i>	<i>Focal Mechanism</i>
104,78; -6,07	Selat Sunda	<b>5,1</b>	88 Km	 <p><b>Rake: 132,4</b> <b>Strike/</b> <b>Dip:</b> <b>N225°E/67°</b></p>
105,41; -6,10	Selat Sunda	<b>3,1</b>	10 Km	 <p><b>Rake:</b> <b>Strike/</b> <b>Dip:</b> <b>N328°E/80°</b></p>

Adapun langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian (Gambar 6) adalah yang pertama mengumpulkan literatur dan data sekunder, kemudian kedua dilakukan persiapan peta sebaran gempa dengan mengambil data gempabumi dan peta landsat serta google earth. Langkah ketiga menganalisis densitas kelurusan dengan cara membuat grid 500m x 500m dengan titik lebih dari 11.000, sehingga kerapatan kontur terlihat dibantu dengan software Surfer. Langkah keempat dari data sumber gempa dilakukan analisis perhitungan jumlah gempa, jarak gempa dengan lokasi calon Tapak Bojonegara, hubungan kelurusan tektonik dengan sebaran pusat gempa. Jarak dan kedalaman dapat menentukan zona reaktivasi sesar walaupun banyak bagian telah tertutupi endapan Kuartar.



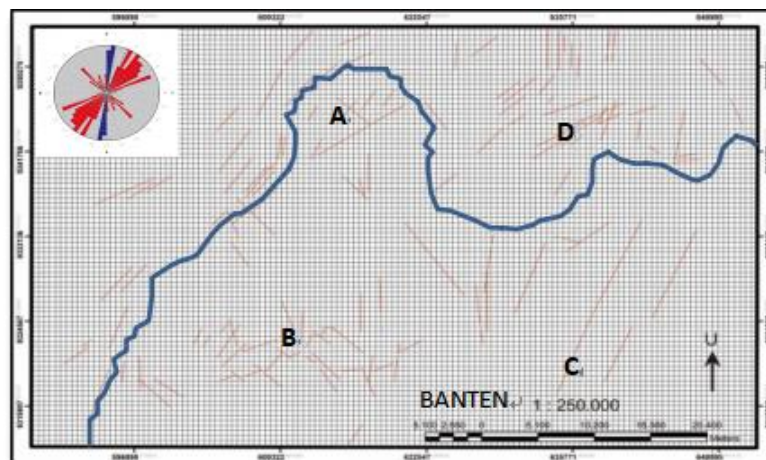
**Gambar 6.** Diagram Alir Penelitian

#### 4. Hasil dan Analisis

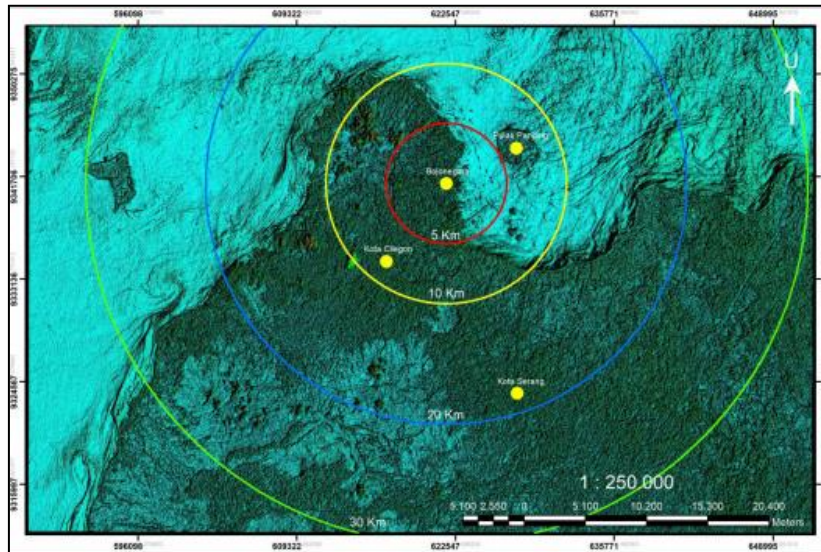
Sumber gempa di selatan Kota Serang dan berjarak 20 km dari Bojonegara. Gempa berada di kedalaman 10 km dengan magnitudo 3,9 pada 23 Oktober 2009 menjadi hal menarik ditinjau dari kelurusan di peta citra landsat 8. Kelurusan tektonik ini terpetakan di daratan Jawa dekat Kota Serang dengan pola N10°E atau utara-selatan. Arah kelurusan dengan pola dominan N40°E atau timurlaut - barat daya berdasar tektonik kompresi Jawa dengan mekanisme sesar geser. Arah N10°E yang searah dengan tektonik kompresi di wilayah ini membentuk mekanisme sesar normal (Gambar 7). Kedua pola kelurusan ini menyebabkan deformasi kuat di daerah dengan densitas kelurusan tektonik cukup tinggi. Kedalaman pusat gempa dangkal < 15 km termasuk *fault zone transition mechanism*.

Di tahun 2018 kembali mengalami gempa beradius 12,5 km dari Bojonegara atau berada timurlaut Kota Serang dengan data gempa bertindih sama kelurusan tektonik, menginformasikan bahwa zona kelurusan dapat dicurigai adanya aktivitas gempa berulang di tahun kemudian (Gambar 8). Kota Serang dan Cilegon tertutupi endapan Kuartar sehingga rekaman struktur geologi Tersier tidak jelas, namun yang ada di umur Kuartar diduga merupakan reaktivasi sesar melihat data sebaran gempa bumi mengikuti arah kelurusan.

Intensitas gempa di tahun 2009 - 2015 signifikan sama lihat dalam Gambar, namun di tahun berikutnya hingga Tahun 2018 mengalami puncak gempa tektonik sebanyak 135 kali yang didominasi di zona sesar Cimandiri berada di tenggara dari Kota Serang (Gambar 9). Dari pengamatan focal mechanism, adanya dua jenis mekanisme pergerakan penyebab gempa yang mendekati zona subduksi sesar naik, sebagian besar mekanisme pergerakan sesar berupa sesar geser sinistral.



**Gambar 7.** Peta pola kelurusan dengan grid densitas 500 m x 500 m



**Gambar 8.** Peta radius lokasi rencana Tapak Bojonegara



**Gambar 9.** Diagram Jumlah Gempa Per Tahun

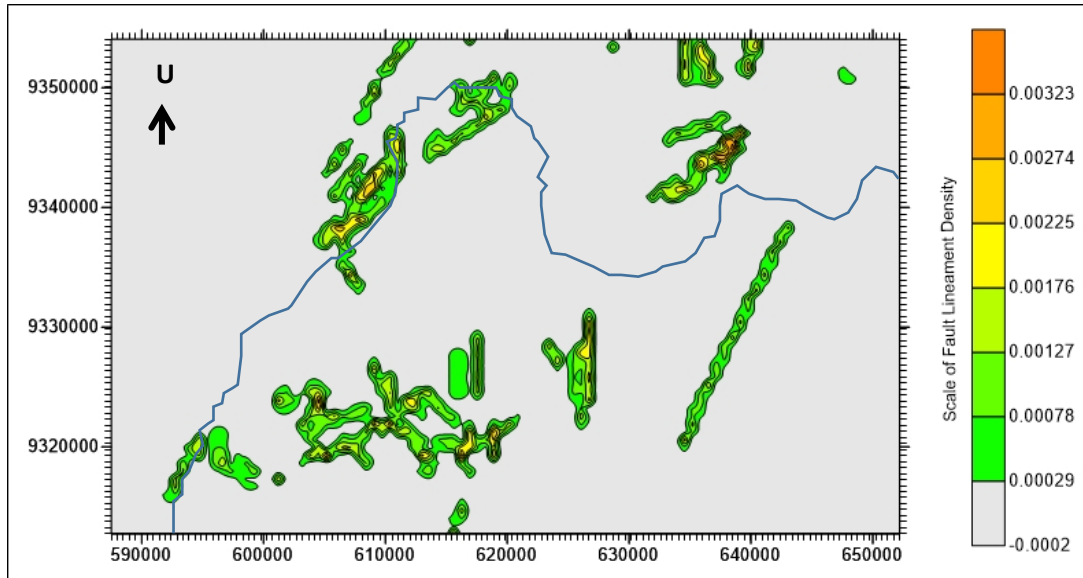
Nilai densitas kelurusan struktur 0,0028 - 0,0031 sebagai nilai tertinggi dari daerah yang kerapatan kelurusannya tinggi atau zona dengan tingkat rawan akibat gempa cukup tinggi berhubungan dengan kedalaman pusat gempa (epicenter) dilihat pada Gambar 10. Dari hasil analisis densitas didapatkan di bagian barat dan timur lokasi tapak terdapat zona lemah yang berbanding lurus dengan zona epicenter. Di bagian timur pernah mengalami gempa di kedalaman 10 km di perairan batas laut Jawa dengan daratan Banten bagian utara, yang menerangkan bahwa potensi gelombang laut ke lokasi Tapak Bojonegara dengan radius 12,5 km dapat diakibatkan tsunami oleh pergeseran geser.

Sepuluh tahun yang lalu, rekaman gempa yang terjadi di wilayah daratan Serang, Banten terdapat 4 (empat) gempa dengan kekuatan 3 – 4 magnitudo berjarak dari calon lokasi tapak PLTN 5 – 20 km. Daerah ini selalu aktif yang mana terdapat kelurusan sesar sumatera sepanjang Pulau Sumatera hingga berbelok di sekitar Gunung Api Anak Krakatau Gambar 11.

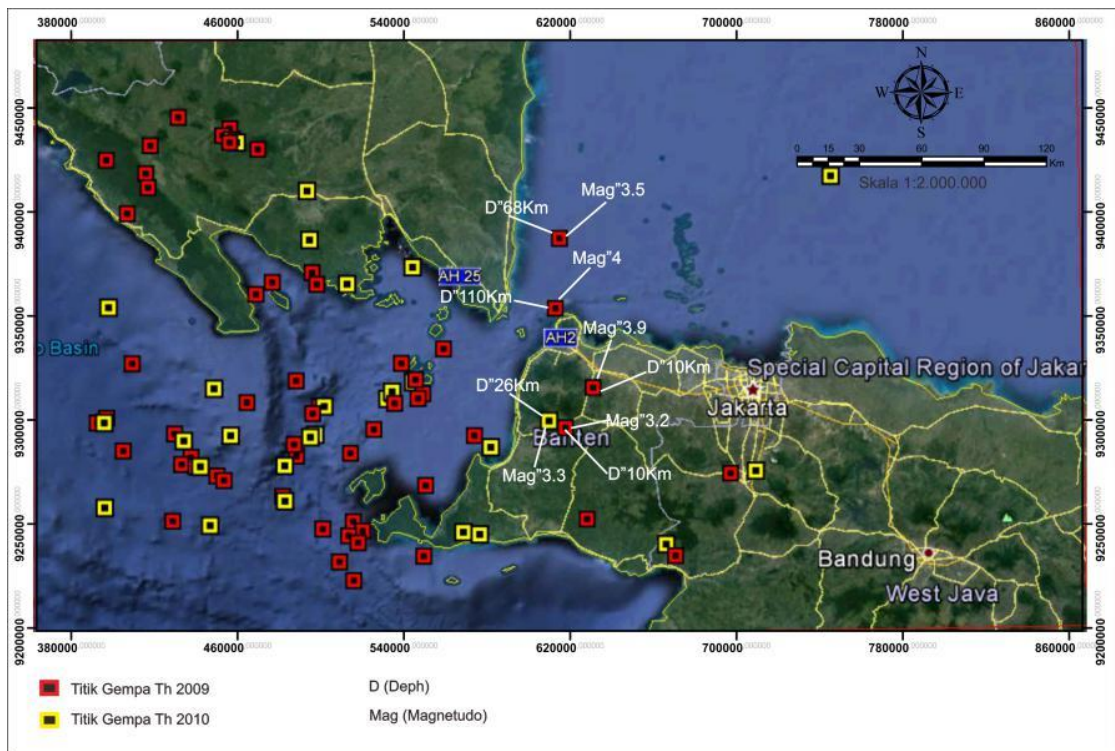
Adapun aktivitas gempa intensif didahului arah gaya tektonik yang menyebabkan sesar naik terekam di tahun 2017 – 2018 melalui pengamatan *focal mechanism* dengan kemiringan bidang sangat landai 20°. Dari pemahaman ini pergerakan di wilayah perairan mengawali sebaran gempa yang implikasinya di bagian darat dekat zona Tapak Bojonegara dengan radius 12,5km, pada peta tahun 2017-2018, dapat dilihat di Gambar 12.

Awal di tahun 2019 sesar geser menjadi dominan intensif di sekitar Gunungapi Anak Krakatau menyebabkan gempa dan berdampak bahaya di wilayah pesisir Sumatera selatan dan Banten. Gempa yang meruntuhkan dinding Gunung Api Krakatau masuk ke dalam laut menyebabkan gelombang tsunami. Secara data, maka wilayah guncangannya hingga Jawa Tengah. Hasil pengamatan bahwa kejadian 2009 – 2019 merupakan periodik 10 tahun dengan durasi intensif meningkat hingga pertengahan Tahun 2019 sehingga bahaya tsunami tentu ada.



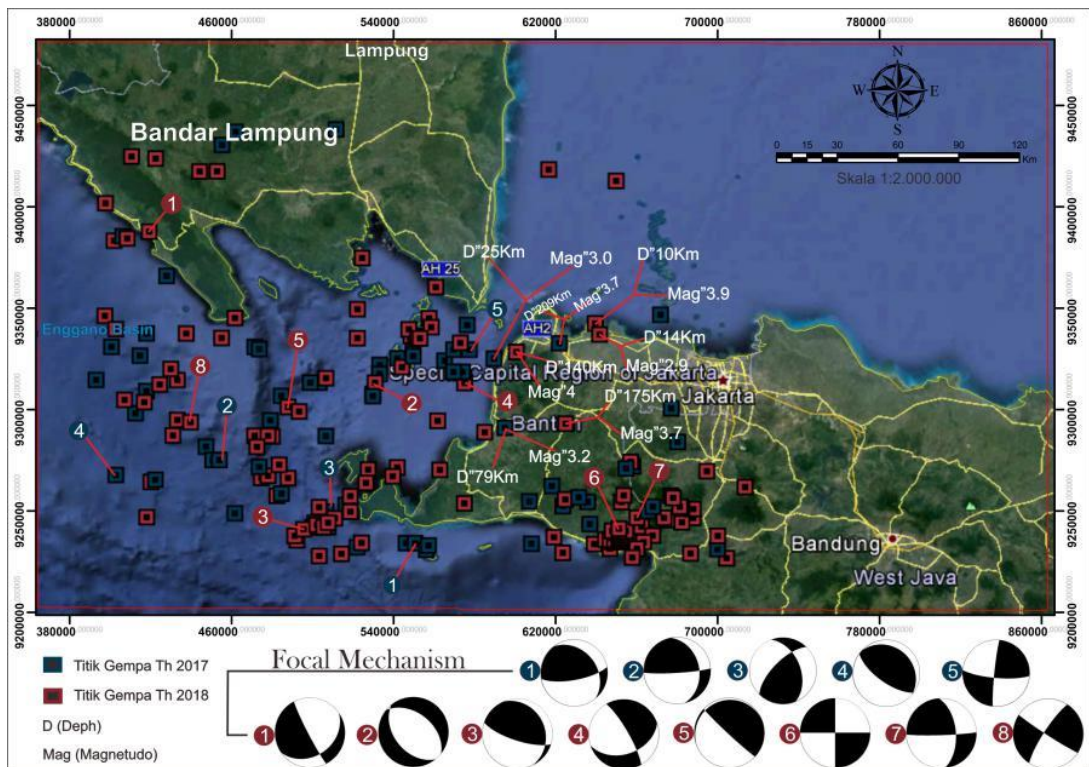


Gambar 10. Peta Densitas Kelurusan Tektonik

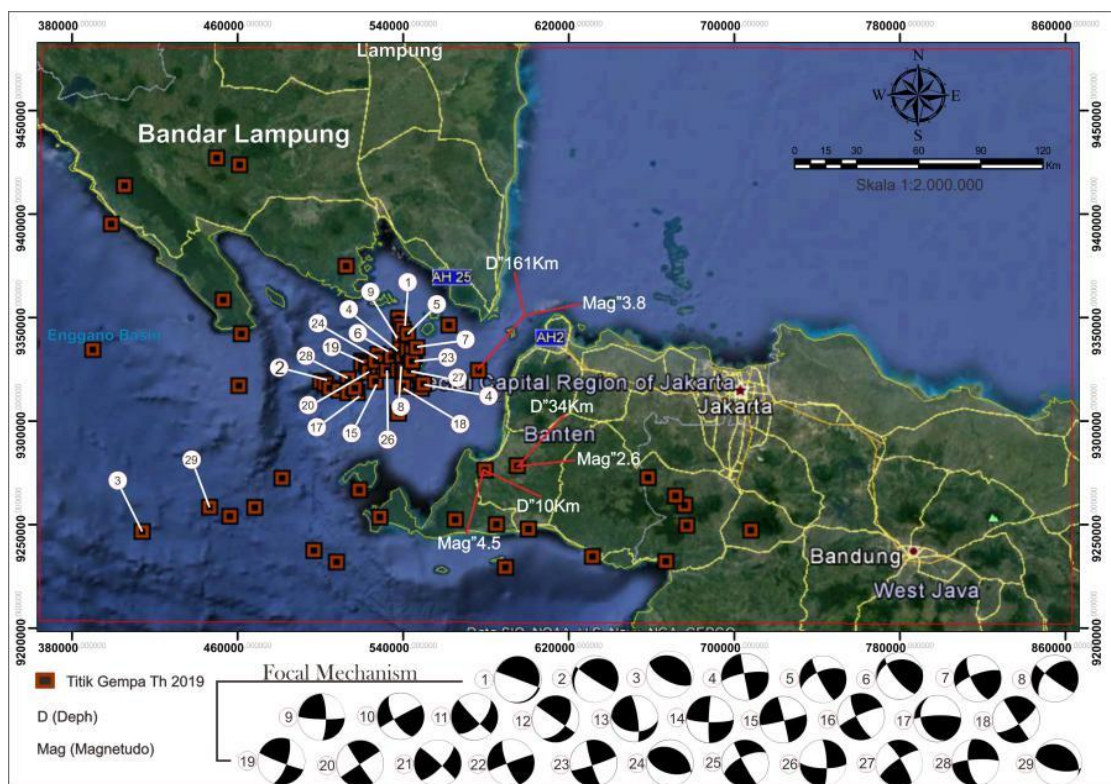


Gambar 11. Peta Seismisitas Gempa di Selat Sunda dan sekitarnya tahun 2009-2010





Gambar 12. Peta Seismisitas Gempa di Selat Sunda dan sekitarnya tahun 2017-2018



Gambar 13. Peta Seismisitas Gempa di Selat Sunda dan sekitarnya tahun 2019

## 5. Kesimpulan

Korelasi sebaran gempa bumi dan densitas terhadap calon Tapak Bojonegara, yaitu:

1. Densitas kelurusan tektonik 0,0028 - 0,0031 sebagai nilai tertinggi menentukan tingkat kerawanan akibat gempa cukup tinggi, calon Tapak tidak aman.
2. Sebaran gempa dari hasil *focal mechanism* di tahun 2017-2019 didominasi reaktivasi sesar geser yang intensif.
3. Calon tapak tidak aman radius dengan sumber gempa <15 km di timur Tapak Bojonegara.
4. Penentuan lokasi tapak di Bojonegara adalah tidak tepat dan tidak direkomendasikan durasi waktu gempa kurang dari 10 tahun dan diduga dapat terjadi tsunami di daerah Banten utara.

## Daftar Pustaka

- [1] D. Walsh, Directional Statistics, Bayesian Methods of Earthquake *Focal mechanism* Estimation, and their Application to New Zealand Seismicity Data. School of Mathematics, Statistics and Computing Sciences Victoria University of Wellington. New Zealand. (laporan tidak dipublikasi), 2008.
- [2] L. Handayani, H. Harjono, Perkembangan Tektonik Daerah Busur Muka Selat Sunda dan Hubungannya dengan Zona Sesar Sumatera. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan* 18 (2) 31-40, 2008.
- [3] R. H. Sibson, Fault rocks and Fault Mechanisms, *Journal of Geological Society* Vol 133 p 191-213, 1977.
- [4] M. Middleton, T. Schnur, P. Sorjonen-Ward, E. Hyvonen, Geological Lineament Interpretation Using The Object-Based Image Analysis Approach: Results Of Semi-Automated Analyses Versus Visual Interpretation. Geological Survey of Finland, Special Paper 57, 2015.
- [5] J. Escamilla-Casas, J. E. Schulz, Tectonic Interpretation of Topographic Lineaments in the Seacoast Region of New Hampshire, U. S. A. *Geofísica internacional* 55-1: 17-37, 2016.
- [6] N. A. Radaideh, B. Grasmann, R. Melichar, J. Mosar, Detection and analysis of Morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS: An example in SW Jordan *Geomorphology* 275 : 58-79, 2016.
- [7] Santosa, Peta Geologi Regional Lembar Anyer 1109-5 dan 1110-2, Jawa Barat. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1991.
- [8] E. Rusmana, K. Suwitodirdjo, Suharsono, Peta Geologi Regional Lembar Serang 1109-6 dan 1110-3, Jawa Barat. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1991
- [9] P. Baumann, P. de Genevraye, L. Samuel, Mudjito, S. Sajekti, "Contribution To The Geological Knowledge Of Southwest Java", In *Proceeding of. 2nd Ann. Conv. Indonesian Petrol. Assoc.*, 1973, 105-108.
- [10] Katili, "Geotectonics of Indonesia", Printed by the Directorate General of Mines, Science-271 pages, 1970.
- [11] P. Raharjo, J. Mellawati, S. B. S. Yarianto, Analisis Supposed Capable Fault Sebagai Data Dukung Rencana Tapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vol.18, No.1 : 39-48, 2016.
- [12] C. Ni, S. Zhang, C. Liu, Y. Yan, Y. Li, Lineament Length and Density Analyses Based on the Segment Tracing Algorithm: A Case Study of the Gaosong Field in Gejiu Tin Mine, China. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2016, Article ID 5392453, 7 pages, 2016.
- [13] W. S. Robert, Quantifying Anderson's fault types. *Journal of Geophysical Research* Vol. 102, No. B8, 1997.