



Penilaian Potensi Bencana Gempabumi dan Tsunami untuk Pelindungan Infrastruktur Migas dan PLTU di Cilacap, Jawa Tengah

Assessment of Potential Earthquake and Tsunami Disaster for Protection Oil and Gas Infrastructure and PLTU in Cilacap, Central Java

A. Soehaimi¹, S.R. Sinung Baskoro¹, Eko Soebowo², Ma'mur¹, dan Yayan Sopyan¹

¹Pusat Survei Geologi, Badan Geologi Jalan Diponegoro No.57 Bandung.

² Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Jln. Sangkuriang Bandung.

e-mail: s.asdani@yahoo.com

Naskah diterima: 02 November 2021, Revisi terakhir: 30 November 2021, Disetujui: 01 Desember 2021, Online: 01 Desember 2021

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22.4.209-221>

Abstrak-Kilang minyak Pertamina dan PLTU Indonesia Power milik pemerintah di Kota Cilacap berada di wilayah dengan percepatan tanah puncak (PGA) = 0,4-0,5 g, percepatan pseudo spectral (PSA Ss) = 0,9-1 g dan (PSA S1) = 0,4-0,5g pada situs batuan SB, 2% probabilitas dalam 50 tahun (SNI 1726:2019). Penilaian potensi bencana gempabumi di kota ini pada kelas situs SC memiliki nilai SDS= 0,67g dan SD1= 0,43 g, sedangkan SDS = 0,73g dan SD1= 0,50 g pada kelas situs SD. Sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, struktur gedung dan non gedung katagori risiko I, II, III dan IV pada kelas situs SC dan SD tersebut di atas berkatagori desain seismik D. Gaya geser desain seismik pada dasar silos tangki minyak adalah $Q_d = (0,24 \sim 0,34) * 10496,4 \times 103 = (2.309,21 \sim 2.519,14) \times 103$ (N). Potensi landaan tsunami dengan *runup high* berkisar antara 2,5-6 m.

Bangunan gedung dan non gedung yang tidak sesuai dengan katagori desain seismik, dapat dilakukan penguatan atau *retrofitting* sesuai ketentuan. Untuk memperkecil gaya geser desain seismik pada dasar silos, dapat dilakukan dengan rekayasa keteknikan pada fondasi. Untuk meminimalisir bahaya tsunami dapat dibuat tembok penahan atau ditanam pemecah gelombang tsunami (*sea wave tsunami breaker*) di sekitar kilang minyak dan PLTU yang berhadapan langsung dengan laut. Jalur evakuasi tsunami berupa jalan lebar dengan arah selatan-utara dan bangunan bertingkat penyelamatan tsunami di sepanjang jalan di kota ini sebaiknya dibuat, khususnya di wilayah sekitar kilang minyak dan PLTU.

Katakunci: Katagori risiko, katagori desain seismik, *runup high*, tsunami.

Abstract-The Pertamina oil refinery and the PLTU Indonesia Power in Cilacap City are located in areas with peak ground acceleration (PGA) = 0.4-0.5 g, pseudo spectral acceleration (PSA Ss) = 0.9-1 g and (PSA S1) = 0.4-0.5 g at SB site class, 2% probability in 50 years (SNI 1726:2019). The the potential seismic hazard assessment in this city at the SC site class had SDS = 0.67 g and SD1 = 0.43 g and SDS = 0.73 g and SD1 = 0.50 g at the SD site class. In accordance with the provisions of SNI 1726:2019, building and non-building structures risk categories I, II, III and IV at the site class SC and SD are belong to seismic design category D. Seismic design shear force at the base of the oil tank silos $Q_d = (0.24 \sim 0.34) * 10496.4 \times 103 = (2,309.21 \sim 2,519.14) \times 103$ (N). Potential tsunami inundation with a *runup high* of 2.5-6 m.

Buildings and non-buildings that are not in accordance with the seismic design category, can be strengthened or retrofitted according to the provisions. To minimize seismic design shear at the base of the silos, the engineering on the foundation can be done. To minimize the tsunami hazard, retaining walls can be constructed or a tsunami breakwater (*sea wave tsunami breaker*) can be planted around the Pertamina oil refinery and PLTU which is directly opposite the sea. A tsunami evacuation route in the form of a wide road with a south-north direction and high-rise tsunami rescue buildings along the road in this city should be made. Especially in Pertamina oil refineries and PLTU, evacuation routes and tsunami rescue structures should be established.

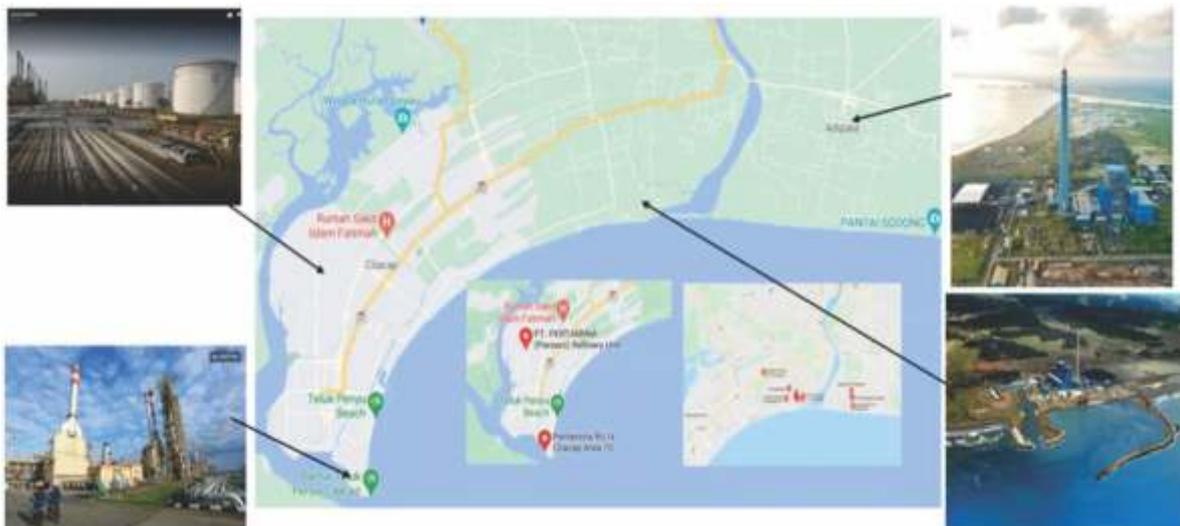
Keywords: Risk category, seismic design category, *runup high*, tsunami.

PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia telah membangun dua PLTU Indonesia Power di daerah Adipala (660 Mw) dan Karangandri (6000 Mw) serta kilang minyak Pertamina (berkapasitas 348.000 barrel/hari) di kawasan tepi pantai Kota Cilacap dan sekitarnya. PLTU Adipala terletak di sebelah barat dan PLTU Karangandri dan kilang minyak Pertamina di sebelah timur Sungai Serayu. Lokasi dan fisik kedua PLTU tersebut dapat dilihat dalam Gambar 1. Upaya perlindungan terhadap kedua infrastruktur energi tersebut perlu dilakukan, mengingat kedua sarana tersebut berada di daerah rawan bahaya gempabumi dan tsunami. Potensi bencana gempabumi dan tsunami tersebut, bersumber dari Zona Tunjangan Selatan Jawa, antara Lempeng Tektonik Samudera Hindia dengan Lempeng Tektonik Benua Asia serta gempabumi-gempabumi yang bersumber dari patahan-patahan aktif di daratan P. Jawa. Berdasarkan katalog gempa bumi signifikan dan merusak tahun 1821-2018 (BMKG,2019), beberapa kali gempabumi kuat dan merusak berpusat di daratan pernah terjadi di dan sekitar daerah ini, yakni gempabumi Banyumas tahun 1863 (VI MMI di Banyumas), gempabumi Maos (Cilacap) tahun 1919 (IX MMI di Maos), gempabumi tsunamigenik Pangandaran tahun 2006 (IV MMI di Cilacap), gempabumi Cilacap tahun 2011 (IV MMI di Cilacap), gempabumi Banjarnegara tahun 2013 (IV MMI di Cilacap), gempabumi

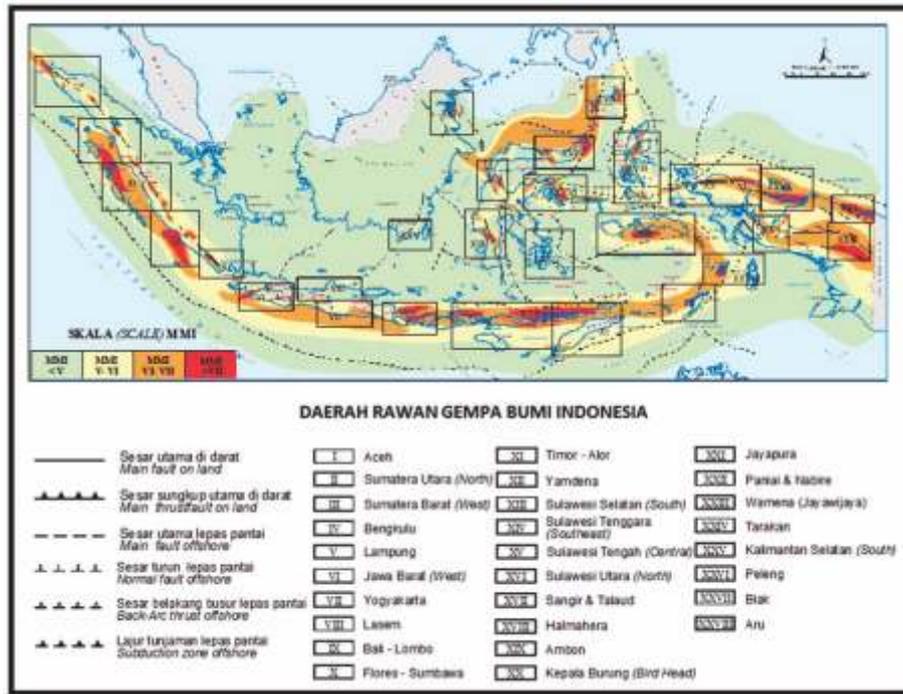
Kebumen 2014 (IV MMI di Cilacap) dan gempabumi Banjarnegara tahun 2018 (VII MMI di Kalibening). Puslitbang Geologi (2003) menyatakan bahwa daerah ini termasuk dalam daerah rawan gempabumi Indonesia No.VI (Jawa bagian barat), seperti terlihat dalam Gambar 2.

Peta geologi menunjukkan daerah yang ditempati oleh kedua PLTU ini, berada di kawasan pantai yang disusun oleh batuan dan tanah lunak yang sangat rentan terhadap guncangan gempabumi. Daerah ini bermorfologi dataran pantai dengan teluk dan muara sungai yang rawan akan landaan tsunami. Untuk mengetahui seberapa besar potensi bencana gempabumi dan tsunami yang dapat mengganggu keamanan dan keselamatan kedua infrastruktur tersebut di atas, dilakukan penilaian terhadap potensi kedua bencana tersebut. Metodologi yang diterapkan dalam upaya penilaian ini adalah kajian, evaluasi dan analisis data sekunder dan primer geologi, geologi teknik, geofisika kegempaan dan tsunami. Penerapan penilaian potensi bencana gempabumi dalam tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non-gedung sesuai dengan SNI 1726:2019. Diharapkan hasil penilaian bersifat kuantitatif, dapat dipakai sebagai rujukan dalam menjaga dan melindungi kedua infrastruktur energi tersebut dari bahaya gempabumi dan tsunami.



sumber: Google Maps

Gambar 1. Peta lokasi PLTU Adipala dan Karangandri, serta kilang minyak Pertamina di wilayah Cilacap, Jawa Tengah.



sumber: Puslitbang Geologi, (2003).

Gambar 2. Peta daerah rawan gempabumi Indonesia.

GEOLOGI DAN GEOLOGI TEKNIK DAERAH CILACAP

Peta geologi lembar Banyumas (Asikin dkk., 1992) berskala 1:100.000 menunjukkan Kota Cilacap dan sekitarnya terletak di daerah bermorfologi dataran pantai berundak yang termasuk dalam alur, muara dan beting Sungai Serayu. Dataran pantai berundak secara genetik merupakan akibat aktifitas neotektonik turun dan naik *base level* yang dicerminkan oleh turun naiknya muka laut di kawasan teluk terbuka Cilacap. Dinamika perubahan alur sungai, muara dan beting sungai secara genetik disebabkan dinamika neotektonik tersebut di atas dan juga dikontrol oleh struktur geologi lipatan dan patahan di daerah Kota Cilacap dan sekitarnya. Batuan penyusunnya di bagian atas (muda) terdiri atas Endapan Pantai (Qac) dan Aluvium (Qa). Di bagian bawah (tua), diduga batuan dari Formasi Halang (Tmph) yang terdiri atas perselingan batupasir, batulempung dan tuf bersisipan breksi, seperti terlihat dalam Gambar 3. Soebowo dkk. (2009) menyatakan Endapan Pantai dan Aluvium di daerah ini terdiri atas endapan pantai, endapan laguna, endapan rawa dan endapan alur sungai, seperti terlihat dalam Gambar 4.

Struktur geologi di daerah ini berupa lipatan antiklin

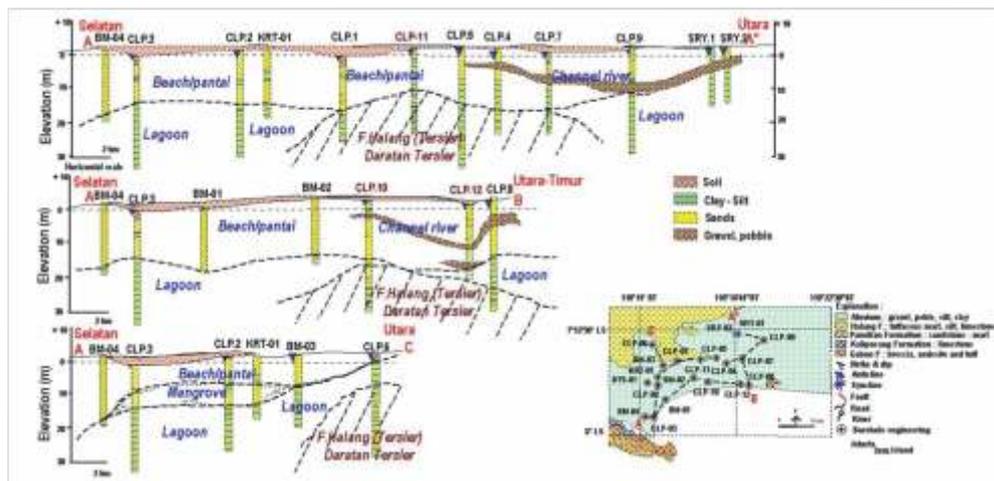
dan sinklin pada batuan Formasi Halang dengan sumbu berarah relatif barat-timur. Struktur lipatan tersebut dipatahkan oleh struktur geologi patahan mendatar dengan arah baratdaya-timurlaut. Di daerah Cilacap, dimana kedua infrastruktur tersebut berada, struktur geologinya ini tidak dapat diamati dengan jelas, karena tertutup oleh Endapan Pantai dan Aluvium. Namun, pola jejak kedua struktur geologi tersebut masih dapat ditelusuri dari kelokan dan kelurusan Sungai Serayu dan Sungai Bengawan.

Satuan geologi teknik di Kota Cilacap dan sekitarnya menurut Soebowo dkk. (2009) terdiri atas satuan kerakal dan kerikil, satuan pasir, satuan lempung-lanau dan satuan tanah. Secara umum berdasarkan NSPT (*number of standard penetration test*) terbagi atas empat kelompok, yakni NSPT bernilai 0-10, 10-20, 20-30 dan 30->50. Merujuk pada ketentuan SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung, seperti terlihat dalam Tabel 1, kelas situs batuan/tanah di lokasi kilang minyak Pertamina dan PLTU (daerah Adipala dan Karangkandri) terdiri atas dua kelas situs, yakni kelas Situs SC pada kedalaman >30 m dan SD pada kedalaman <30 m. Satuan geologi teknik dan zonasi NSPT dapat dilihat dalam Gambar 5.



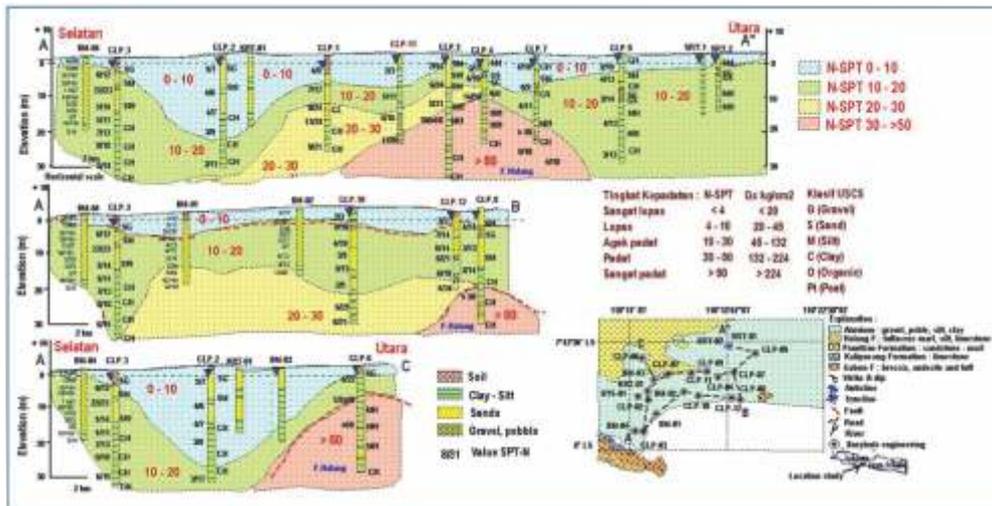
sumber: Asikin dkk., 1992

Gambar 3. Peta geologi Kota Cilacap dan sekitarnya skala 1:100.000.



sumber: Soebowo dkk., 2009

Gambar 4. Penampang fasies penyusun endapan pantai dan aluvium Kota Cilacap dan sekitarnya .



sumber:Soebowo dkk., 2009

Gambar 5. Penampang satuan geologi teknik dengan zonasi NSPT bawah permukaan Kota Cilacap.

Tabel 1. Kelas Situs Batuan/Tanah (SNI 1726 – 2019)

Kelas situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{60}	$\bar{\sigma}_v$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15sampai 50	50 sampai100

KEGEMPAAN

Peta kegempaan wilayah Jawa periode tahun 2009 – 2018 (BMKG, 2019) menunjukkan 80% sebaran pusat gempabumi berada di lepas pantai selatan Jawa, selebihnya 20% berada di daratan Jawa dan lepas pantai utara Jawa yang dapat dilihat pada Gambar 6. Gempabumi yang berpusat di lepas pantai selatan Jawa tersebut, umumnya terjadi akibat aktifitas tunjaman asimetri antara Lempeng Tektonik Samudera Hindia-Australia dengan Lempeng Tektonik Benua Eropa-Asia. Gempabumi-gempabumi aktifitas tunjaman ini berdasarkan posisi pusat gempabumi dan kedalamannya dapat diketahui sebagai gempabumi-gempabumi antar lempeng tektonik (*interplate tectonic earthquakes*) atau gempabumi-gempabumi dalam lempeng tektonik samudera (*innerplate tectonic earthquakes*). Gempabumi-gempabumi ini memiliki ciri mekanisme fokal gerak patahan naik, dengan kedalaman <50 km. Gempabumi yang terjadi pada

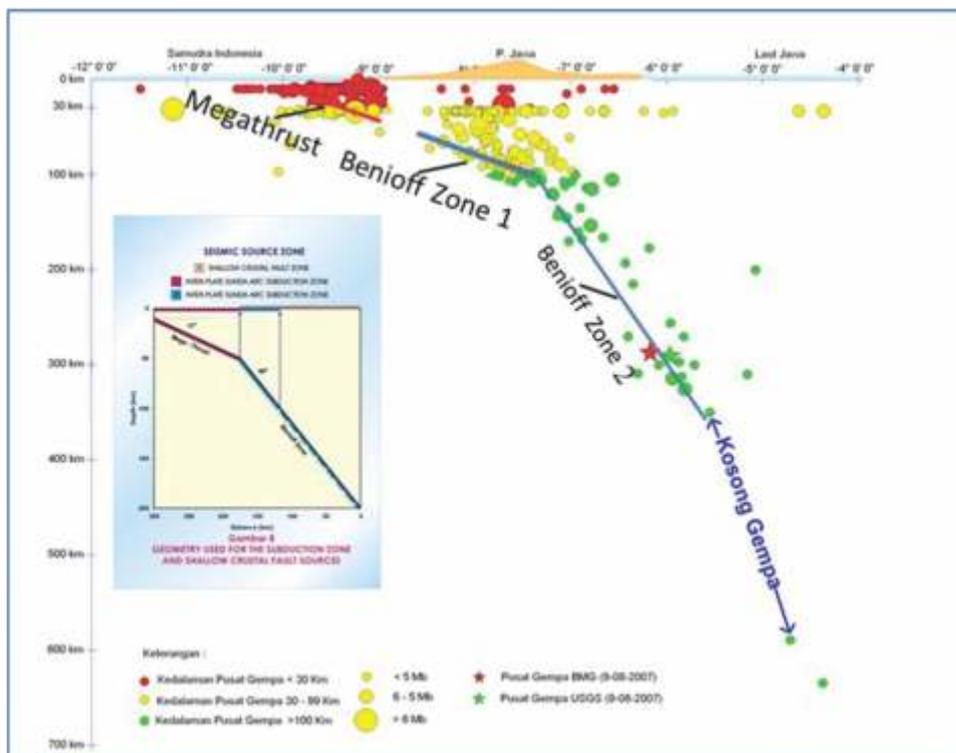
zona ini sering disebut sebagai gempabumi patahan naik besar (*megathrust earthquakes*). Kegempaan yang berpusat di daratan Pulau Jawa terjadi dan berasosiasi dengan patahan-patahan aktif pada Kerak Benua Eropa-Asia bagian atas dengan kedalaman <30 km, atau berasosiasi dengan aktifitas tunjaman tersebut di atas, dengan ciri kedalaman >60 km. Demikian pula halnya dengan kegempaan yang berpusat di lepas pantai Utara P. Jawa juga berasosiasi dengan aktifitas tunjaman bagian bawah dan disebut sebagai gempabumi-gempabumi Benioff Zone 1 dan 2 dengan kedalaman > 60 km hingga 350 km, seperti terlihat dalam Gambar 7.

Berdasarkan peta sumber dan bahaya gempa Indonesia (SNI 1726:2019), Kota Cilacap dan sekitarnya memiliki percepatan tanah puncak (PGA) = 0,4–0,5 g, percepatan respon spektrum (PSA Ss) = 0,9–1 g dan (PSA S1) = 0,4–0,5 g, semua pada situs batuan SB, 2% probabilitas dalam 50 tahun (SNI 1726-2019), seperti terlihat dalam Gambar 8, 9 dan 10.

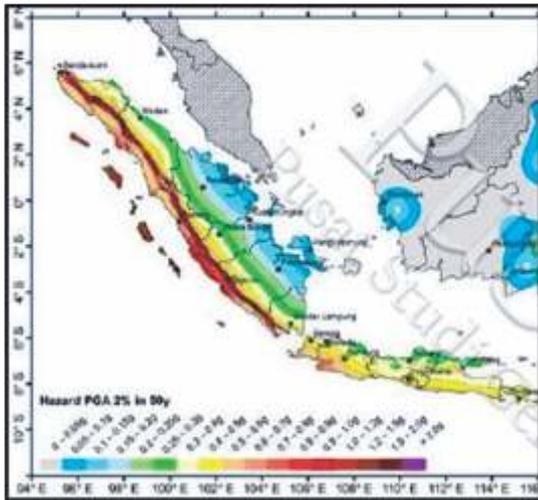


sumber:BMKG, 2019.

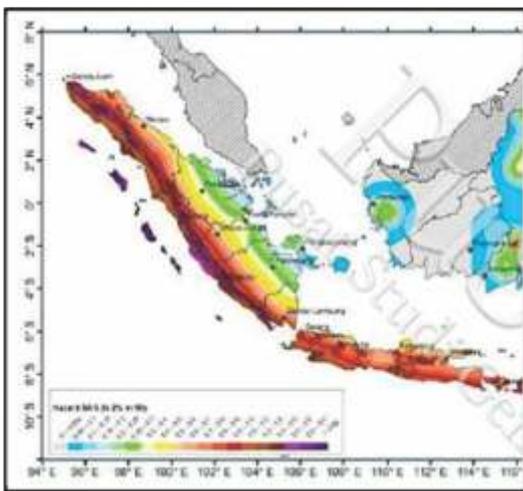
Gambar 6. Peta seismitas Sunda Timur, P. Jawa dan sekitarnya periode 2009 - 2018.



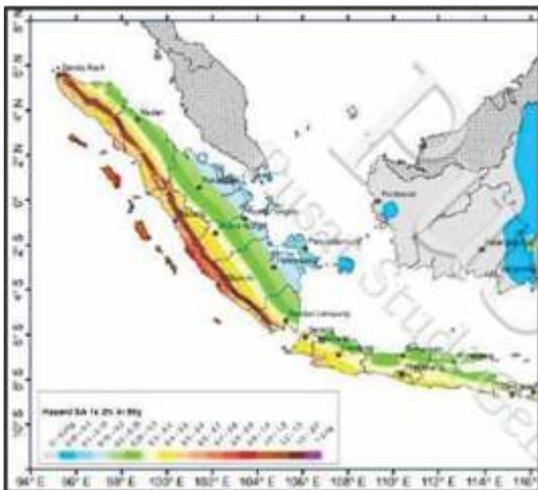
Gambar 7. Penampang tegak kegempaan P. Jawa bagian barat.



Gambar 8. Peta percepatan puncak (PGA) Indonesia pada kelas situs SB, 2% probabilitas dalam 50 tahun (SNI 1726-2019).



Gambar 9. Peta percepatan respon spektrum PSA (Ss= 0,2 detik) Indonesia pada kelas situs SB, 2% probabilitas dalam 50 tahun (SNI 1726-2019).



Gambar 10. Peta percepatan respon spektrum PSA (S1= 1 detik) Indonesia pada kelas situs SB, 2% probabilitas dalam 50 tahun (SNI 1726-2019).

PENILAIAN POTENSI GEMPABUMI DAN TSUNAMI

Dua hal pokok dan mendasar dalam upaya mitigasi bencana gempabumi adalah penilaian potensi bencana gempabumi dan penilaian potensi bencana tsunami. Nilai bersifat kuantitatif dari hasil penilaian ini diharapkan dapat dipakai sebagai dasar penentuan kebijakan dalam upaya mitigasi dan perlindungan terhadap kelangsungan hidup dan keberlanjutan pembangunan.

Penilaian Potensi Bencana Gempabumi

Mengacu pada potensi geologi dan geologi teknik, kelas situs dan parameter respon spektral percepatan gempabumi pada kelas situs batuan/tanah setempat sesuai SNI 1726:2019, maka dapat dilakukan penilaian potensi bencana gempabumi Kota Cilacap dan sekitarnya. Berdasarkan kajian geologi dan geoteknik menunjukkan bahwa kedua lokasi kilang minyak dan PLTU terletak pada lokasi dengan kelas situs batuan/tanah SC dan SD dengan parameter respon spektral percepatan gempabumi sesuai SNI 1726:2019 dapat dilihat dalam Tabel 2 hingga 7 dan Gambar 11 dan 12.

Penilaian potensi kegempaan tersebut di atas, menunjukkan Kota Cilacap dan sekitarnya pada kelas situs SC memiliki SDS = 0,67 g dan SD1= 0,43 g dan S1 = 0,5 g, pada kelas situs SD memiliki SDS = 0,73 g dan SD1= 0,50 g dan S1 = 0,5 g. Sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, struktur gedung dan non-gedung katagori risiko I, II, III dan IV pada kedua kelas situs tersebut ditetapkan dengan struktur berkatagori desain seismik D, seperti terlihat dalam Tabel 8 dan 9.

Tinjauan beban gempabumi dilakukan terhadap tangki minyak di atas permukaan tanah di kota ini, yang dihitung dengan modifikasi intensitas gempabumi (*modified seismic intensity*). Metode ini digunakan untuk menentukan gaya geser disain seismik tangki minyak di atas permukaan mengacu pada Architectural Institute of Japan (2010) berikut.

Metode Modifikasi Intensitas Seismik

Gaya geser details pada dasar silo: Q₁ (N)

$$Q_1 = C \cdot W$$

$$C = Z_1 \cdot I \cdot D_1 \cdot \frac{S_d}{S_1}$$

Dimana: $C = 0,5 \cdot Z_1 \cdot I$

Simbol	C	Koefisien gaya geser desain pada dasar silo
	W	Desain berat berlaku pada dasar silo = 10.096.4 · 10 ³ (N)
	Z ₁	Faktor zona seismik = 1,0 (Kaste area)
	I	Faktor penting = 0,8
	D ₁	= D ₁ D ₂ = (0,5 - 0,7) · 1,0 = 0,5 - 0,7
	D ₁	Ketetapan didefinisikan oleh deformasi plastis pada silo = 0,5 - 0,7 (Struktur Baja)
	D ₂	Ketetapan didefinisikan oleh kapasitas selang pada silo = 1,0 (Darah dari dasar silo <math>x < 2.000 \text{ m}^2</math>)
	S _d	Respon spektral percepatan pada periode natural = 0,30 (m/s ²) g = 9,80 (m/s ²)
	S ₁	= 0,5 - 0,7

$$C = 1,0 \cdot 0,8 \cdot (0,5 - 0,7) \cdot 9,80 \cdot 9,80 \cdot (0,4 - 0,56) \cdot 0,5 \cdot 2,1 = 0,3 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,24$$

$$Q_1 = (0,4 - 0,56) \cdot 10.096.4 \cdot 10^3 = (4198,56 - 5677,98) \cdot 10^3 \text{ (N)}$$

Tabel 2. Parameter respons spektral percepatan gempa Ss

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE _s) terpetakan pada periode pendek, T=0,2 detik, S _s				
	S _s ≤ 0,25	S _s = 0,5	S _s = 0,75	S _s = 1,0	S _s ≥ 1,25
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,8
SF			SS ^a		

Tabel 3. Parameter respons spektral percepatan S1

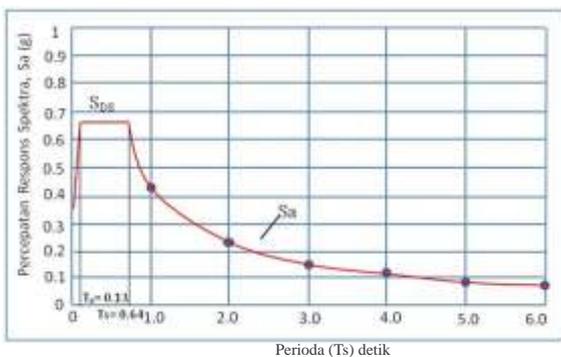
Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE _s terpetakan pada periode 1 detik, S ₁				
	S ₁ ≤ 0,1	S ₁ = 0,2	S ₁ = 0,3	S ₁ = 0,4	S ₁ ≥ 0,5
SA	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF			SS ^a		

Tabel 4. Parameter guncangan tanah pada kelas situs batuan SC untuk Ss=1 g dan S1=0,5 g di Kota Cilacap

Parameter	Nilai
S _s	1
S ₁	0,5
PGA	0,5
S _{MS} =Fa S _s =1 x 1	1
S _{M1} = Fv. S ₁ = 1,3 x 0,5	0,65
S _{DS} = 2/3 S _{MS}	0,67
S _{D1} = 2/3 S _{M1}	0,43
T ₀ = 0,2 (S _{D1} : S _{DS})	0,13 dt
T _s = (S _{D1} : S _{DS})	0,64 dt

Tabel 5. Parameter guncangan tanah pada kelas situs batuan SC untuk Ss=1 g dan S1=0,5 g di Kota Cilacap

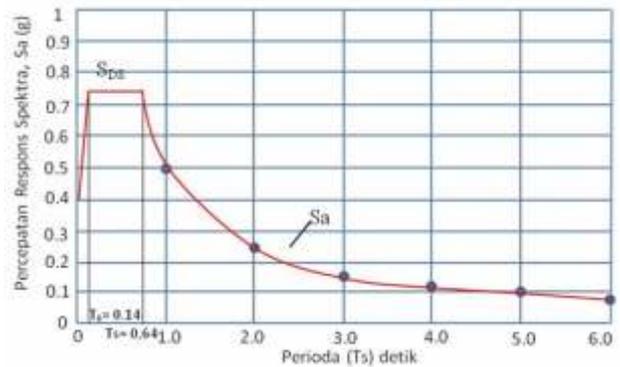
Periode, T(s)	Percepatan Spektral, Sa (g)
0	0,27
0,13 (= T ₀)	0,67
0,64 (=T _s)	0,67
1	0,43
2	0,22
3	0,14
4	0,12
5	0,09
6	0,07



Gambar 11. Respons spektra disain elastik untuk gedung dan non-gedung pada kelas situs SC dengan Ss= 1 g dan S1 = 0,5 g di Kota Cilacap.

Tabel 6. Parameter guncangan tanah pada kelas situs SD untuk Ss=1 g dan S1=0,5 g di Kota Cilacap

Parameter	Nilai
S _s	1
S ₁	0,5
PGA	0,5
S _{MS} =Fa S _s =1,1 x 1	1,1
S _{M1} = Fv. S ₁ = 1,5 x 0,5	0,75
S _{DS} = 2/3 S _{MS}	0,73
S _{D1} = 2/3 S _{M1}	0,50
T ₀ = 0,2 (S _{D1} : S _{DS})	0,14 dt
T _s = (S _{D1} : S _{DS})	0,68 dt



Gambar 12. Respons spektra disain elastik untuk gedung dan non gedung pada kelas situs SD dengan Ss= 1 g dan S1 = 0,5 g di Kota Cilacap.

Tabel 7. Katagori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek 0,2 detik (SNI 1726:2019)

Nilai S _{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
S _{DS} < 0,167	A	A
0,167 ≤ S _{DS} < 0,33	B	C
0,33 ≤ S _{DS} < 0,50	C	D
0,50 ≤ S _{DS}	D	D

Tabel 8. Katagori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode panjang 1 detik (SNI 1726 : 2019)

Nilai S _{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
S _{D1} < 0,167	A	A
0,067 ≤ S _{D1} < 0,133	B	C
0,133 ≤ S _{D1} < 0,20	C	D
0,20 ≤ S _{D1}	D	D

Tabel 9. Parameter guncangan tanah, katagori risiko dan katagori desain seismik Kota Cilacap pada xonasi kelas situs SD dan SC

Kelas Situs	S _s	S ₁	S _{DS}	Kategori Risiko	Kategori Desain Seismik	S ₀₁	Kategori risiko	Kategori Desain Seismik
SD	1,0g	0,50g	0,73g	I, II, III, IV	D	0,50 g	I, II, III, IV	D
SC	1,0g	0,50g	0,67g	I, II, III, IV	D	0,43 g	I, II, III, IV	D

Faktor kegempaan di wilayah Cilacap dan sekitarnya memiliki Z_s = Zona Seismik Lokasi, mengacu pada peta zona gempabumi Indonesia dalam analisis stabilitas bendungan tipe urugan akibat beban gempa (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004) seperti terlihat dalam Gambar 13. Kota Cilacap terletak pada Zona E dengan $Z = 0,9 - 1,2$. I = faktor kepentingan mengacu pada Architectural Institute of Japan, 2010 dapat dilihat pada Tabel 10. Tipe-tipe tangki minyak dan tangki minyak Pertamina di Kota Cilacap dapat dilihat dalam Gambar 13.

Berdasarkan data tersebut di atas, gaya geser desain

seismik dengan metode Modified Seismic Intensity di dasar silos tangki minyak di Kota Cilacap ini adalah sebagai berikut:

$$C = 1,2 * 0,8 * (0,5 \sim 0,7) * 4,90/9,80 = (0,24 \sim 0,34) > 0,3 * 1,2 * 0,8 = 0,29$$

$$\text{adalah } Q_d = (0,24 \sim 0,34) * 10496,4 \times 10^3 = (2.309,21 \sim 2.519,14) \times 10^3 \text{ (N)}$$

Untuk menjaga keselamatan pipa minyak yang melintasi zona deformasi patahan aktif, dilakukan upaya kajian secara komprehensif pelintasan pipa terhadap zona-zona patahan seperti terlihat dalam Gambar 14.

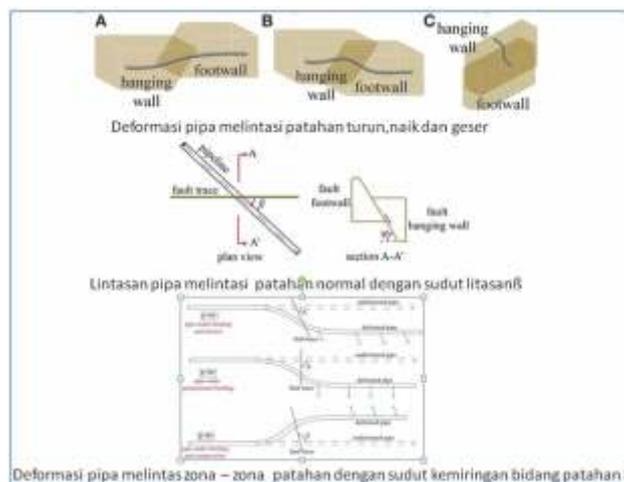
Tabel 10. Klasifikasi seismik desain dan faktor kepentingan (Architectural Institute of Japan, 2010)

Klasifikasi Seismik Desain	Deskripsi	I
I	Tangki penyimpan kecil tidak ada material dalam bertahapan	0,5 & Lebih besar
II	Tangki kapasitas menengah kecil ada material tidak bertahapan, tidak terdampak gempa bumi	0,6 & Lebih besar
III	Tangki signifikan berisikan minyak gemuk seperti bangkai umum	0,9 & Lebih besar
IV	Tangki isi material berbahaya & mudah rusak oleh gempa bumi	1,1 & Lebih besar

Klasifikasi Seismik Desain	Deskripsi	Faktor kepentingan I
I	Silos kecil tinggi < 8 m	0,5 & Lebih besar
II	Silos lain tidak masuk 1 atau 11	0,5 & Lebih besar
IV	Silos digunakan menyimpan material berbahaya atau reaktor nuklir	1,2 & Lebih besar



Gambar 13. Tipe tangki minyak dan tangki minyak Pertamina di Cilacap.



Gambar 14. Deformasi pipa melintasi zona patahan zona patahan (Gantes & Melissianos, 2016).

Pengaruh regangan pada pipa minyak di zona-zona patahan aktif dapat dilakukan dengan upaya penilaian limit regangan tarikan $\epsilon_t = 2\%$ dan limit regangan kompresi ϵ_c adalah:

$$\epsilon_c = 0.5 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0.0025, \text{ with } D' = \frac{D}{1 - 3 \frac{D - D_{\min}}{D}}$$

Dimana: D=diameter luar pipa; t=tebal dinding pipa; D_{min} = diameter pipa terkecil bila mengalami tekanan (melonjong).

Upaya penguatan pipa migas dalam menahan bahaya deformasi pada zona patahan, dapat dilakukan dengan peningkatan ketahanan baja pipa, menambah ketebalan pipa untuk mengurangi tingkat pelengkungan dengan menambah kekakuan pipa (Gantes & Bouckovalas, 2013, Karamanos dkk., 2014) atau membungkus pipa dengan pembungkus komposit, serta menghindari pipa melintas patahan pada tingkat rencana pemilihan rute lintasan pipa. Selain itu, upaya yang dapat dilakukan adalah menghindari tikungan tajam yang dapat menambah kendala pada pergeseran aksial dan tekanan pada pipa. Pada tikungan yang harus dan dekat zona patahan, panjang angkor harus dipertimbangkan terhadap lokasi tikungan. Pemasangan pipa migas di dalam paritan pada batuan Kuartar bersifat lepas yang rentan bahaya guncangan gempabumi, seperti terlihat dalam Gambar 15. Sebagai contoh yang dapat dilakukan dalam upaya mitigasi risiko bahaya guncangan gempabumi terhadap pipa-pipa migas seperti terlihat dalam Gambar 16.

Upaya mengurangi Induksi gesekan pada tanah di zona patahan aktif maupun potensial aktif dapat dilakukan dengan membungkus pipa dengan geotextile untuk mengurangi gesekan, menempatkan pipa dalam gorong-gorong dan pelebaran paritan.

Penilaian Potensi Bencana Tsunami

Bencana tsunami Busur Sunda sangat berpeluang terjadi di kawasan lepas pantai Barat P. Sumatera dan kawasan pantai Selatan Jawa. Bencana tsunami di kedua wilayah ini umumnya disebabkan oleh dinamika gerak patahan naik besar (*megathrust*) di dalam sistim tunjaman asimetri miring (*oblique*) dan tegak (*frontal*) antara Lempeng Tektonik Samudera Hindia-Australia dengan Lempeng Ttekonik Benua Europa-Asia.

Berdasarkan bentuk geometri dan dimensi zona tunjaman, kerapatan sebaran pusat gempabumi (episenter) dan kedalaman (hiposenter), mekanisme fokal dan sejarah gempabumi tsunamigenik, Zona

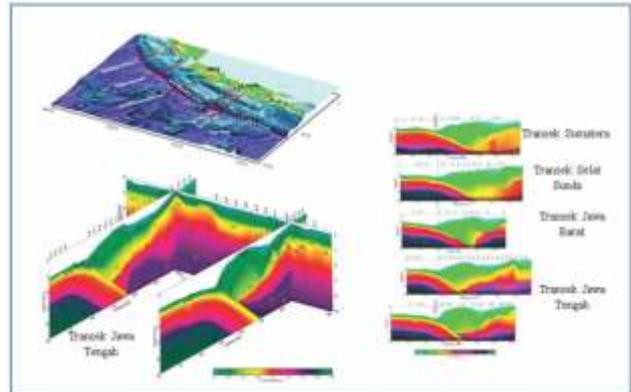
Punggungan Busur Luar dimana patahan naik besar (*megathrust*) Busur Sunda berada dapat dibagi menjadi 11 (sebelas) segmen (Soehaimi dkk., 2018). Segmentasi tersebut di atas dapat dilihat dalam Gambar 17 dan 18. Lokasi penelitian berhadapan dengan Segmen Kulonprogo Selatan, dimana dua gempabumi historis terjadi dan berasosiasi pada segmen ini, yakni tahun 1913 dan 1931. Kedua gempabumi tersebut masing-masing berkekuatan 8,1 Mw dan 7,5 Mw, berkedalaman dangkal dan memperlihatkan mekanisme gerak patahan naik namun tidak ada data dan informasi terjadi tsunami.

Secara genetik penilaian potensi bencana tsunami di Busur Sunda sebelah barat P. Sumatera dan di sebelah selatan P. Jawa berbeda. Di sebelah barat P. Sumatera, tunjaman lempeng tektoniknya samudera ke bawah lempeng benuanya miring, sedangkan di selatan Jawa tegak sehingga berdampak pada jenis patahan tsunamigenik yang akan terjadi. Di barat P. Sumatera patahan tsunamigeniknya memiliki tipe patahan mendatar naik, sedangkan di selatan P. Jawa memiliki tipe patahan naik. Penampang seismik tomografi MERAMEX, terlihat adanya perbedaan sudut tunjaman dari lempeng tektonik samudera ke bawah lempeng tektonik benua, di Sumatera agak landai, sedikit agak makin tegak ke Selat Sunda dan Jawa Barat dan lebih tegak di wilayah Jawa Tengah. Perbedaan sudut kemiringan tunjaman tersebut, menunjukkan adanya batas atau segmentasi pada lempeng tektonik samudera. Kondisi tersebut dicerminkan oleh dalam dan dangkalnya kedalaman gempabumi yang berasosiasi dengan lempeng samudera, juga terlihat pada kontur batimetri dan tinggi rendahnya morfologi dasar laut punggungan busur muka.

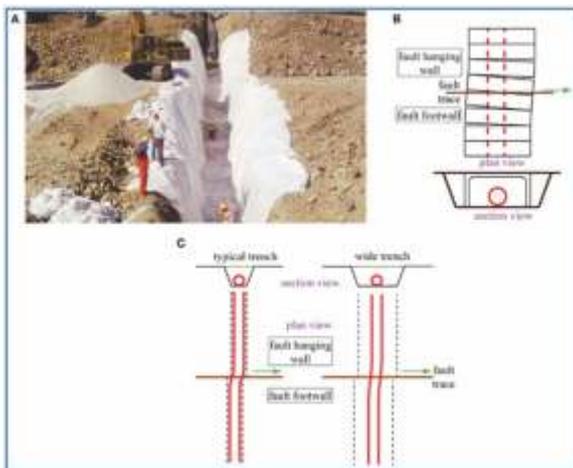
Mengacu pada peta seismotektonik yang telah dimodifikasi dari Hebert dkk. (2012) seperti terlihat dalam Gambar 19, zona punggungan busur luar dimana patahan naik besar (*megathrust*) berada, terdiri atas beberapa, yakni Segmen No.6 (Enggano-Selat Sunda), Segmen No.7 (Pelabuhan Ratu-Pangandaran), Segmen No.8 (Kulonprogo), Segmen No.9 (Banyuwangi) dan Segmen No.10 (Bali Selatan). Segmen No.7 telah melahirkan gempabumi tsunamigenik Pangandaran 17 Juli 2006 dengan kekuatan gempanya 7,8 Mw. Lebih awal Segmen No.9 telah melahirkan gempabumi tsunamigenik Banyuwangi 2 Juni 1994 dengan kekuatan 7,9 Mw. Kedua gempabumi tsunamigenik tersebut memiliki mekanisme fokal gerak patahan naik, sedangkan segmen lainnya segmen No.6, 8 dan 10 yang terletak berdampingan kedua segmen yang telah melahirkan tsunami, belum memiliki sejarah terjadi gempabumi tsunamigenik. Segmentasi 6, 8 dan 10 sangat berpeluang sebagai sumber gempabumi tsunamigenik di masa yang akan datang.



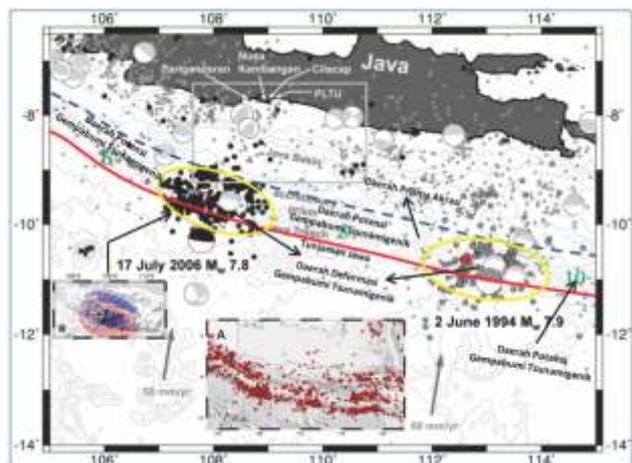
Gambar15. Contoh pengerjaan pipa migas ditanam dalam paritan pada batuan Kuarter yang bersifat lepas yang rentan terhadap guncangan gempabumi (bing.com/images, Image of Pipa Minyak dan Gas).



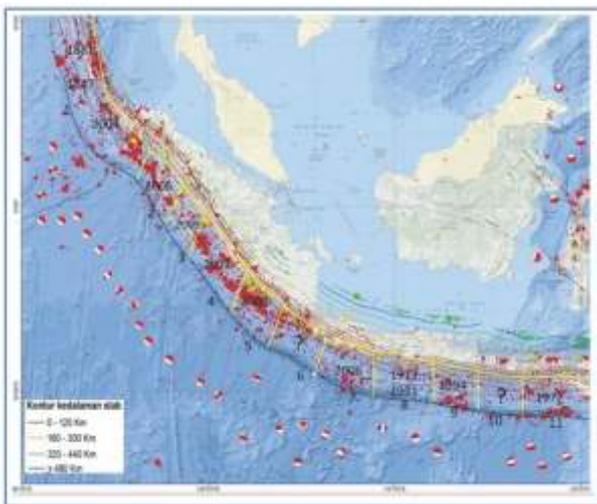
Gambar 18. Penampang seismik tomografi yang menggambarkan bentuk geometri zona tunjaman dengan megathrust di sebelah barat Sumatra dan selatan Jawa (MERAMEX, 2007).



Gambar 16. Contoh pengerjaan pemasangan pipa migas di sistim paritan (Gantes & Melissianos, 2016).



Gambar 19. Peta seismotektonik yang telah dimodifikasi dari He'bert dkk. (2012) yang memperlihatkan zona punggungan busur luar dimana patahan naik besar (megathrust) berada.



Gambar 17. Seismotektonik dan segmentasi patahan naik besar Busur Sunda/megathrust, (Soehaimi dkk., 2018, modifikasi dari peta seismotektonik Indonesia BMKG, 2015 unpub.).

Berdasarkan sebaran gempabumi susulan pada gempabumi tsunami Pangandaran 17 Juli 2006, daerah deformasi gempabumi ini memiliki panjang 222 km dan lebar 111 km dengan luas 24.642 km². Gempabumi tsunamigenik Banyuwangi memiliki panjang 228,5 km dan lebar 111 km dengan luas 228,5 km². Berdasarkan analisis terhadap geometri kedua segmen yang telah melepaskan energi kinetiknya tersebut di atas, dapat diduga segmen No.8 (Kulonprogo) yang memiliki panjang segmen 352 km yang terbagi atas dua segmen dapat menimbulkan gempabumi dengan kekuatan hampir sama yakni 7,8 Mw dan berpotensi bencana tsunami.

Mengacu pada hasil pengamatan di lapangan oleh peneliti terdahulu (Lavigne dkk., 2007; Fritz dkk., 2007; Tsuji, 2006; PARI-JSCE Group, 2006; dan Mori dkk., 2007; dalam He'bert dkk., 2012) wilayah pantai selatan Jawa Barat dan Jawa Tengah pada koordinat 107,4o - 111o memiliki *runup high* sangat bervariasi, paling rendah 2 m, menengah 2-6 m, tinggi 6-12 m dan

tertinggi >16 m. Berdasarkan hasil penelitian ini runup high tertinggi terjadi di P. Nusakambangan ±20 m. Kota Cilacap memiliki *runup high* 2-2,5 m, sedangkan di kilang minyak dan PLTU menurut penelitian terdahulu ini berbeda-beda. PARI-JSCE Group (2006 dalam He'bert dkk., 2012) menyebut ketinggian *runup high* 6 m, Mori dkk. (2007) dengan ketinggian *runup high* 4 m, sedangkan penelitian lainnya <2 m hingga 2,5 m. Runup tertinggi terjadi di Nusakambangan dikarenakan wilayah ini terletak berhadapan langsung dengan pusat pengangkatan dasar laut tertinggi pada sumber gempabumi tsunamigenik. Ketinggian *runup high* hasil penelitian terdahulu dapat dilihat dalam Gambar 20.

Ketinggian tsunami di daerah ini dapat juga dijelaskan melalui pemodelan sumber tsunamigenik menggunakan rumus Okal & Synolakis (2004 dalam He'bert dkk., 2012), hasilnya seperti terlihat dalam Gambar 21. Garis hijau adalah hasil pemodelan tsunami, menggunakan Ammon dkk. (2006) sumber statis, diambil sepanjang kontur batimetri 5 m. Dari hasil pemodelan ini, kilang minyak dan PLTU Cilacap terletak pada daerah dengan ketinggian runup tsunami 5-6 m.

KESIMPULAN DAN SARAN MITIGASI

Hasil penilaian bencana gempabumi dan tsunami Kota Cilacap dan sekitarnya memiliki indek potensi yang sangat signifikan. Berdasarkan indek potensi bencana gempabumi, sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, struktur gedung dan non-gedung katagori risiko I, II, III dan IV pada situs SC dan SD di kota ini

harus ditetapkan dengan struktur berkatagori desain seismik D. Untuk memperkecil gaya geser desain seismik pada dasar Silos tangki minyak, sebaiknya dilakukan rekayasa keteknikan pada fondasi. Pemasangan pipa migas dalam perencanaannya sebaiknya memperhatikan sifat fisik batuan dan tanah setempat yang rentan akan guncangan gempabumi dan zona patahan aktif dan potensial aktif. Penanaman pipa minyak di bawah permukaan tanah dapat membungkus pipa dengan geotekstil untuk mengurangi gesekan, menempatkan pipa dalam gorong-gorong dan pelebaran paritan pipa. Ancaman landaan tsunami (*runup*) dapat diupayakan diminimalisir dengan membuat atau menanam pemecah gelombang tsunami (*sea wave tsunami reaker*) di sekitar kilang minyak dan PLTU yang berhadapan langsung dengan laut. Bangunan gedung dan non-gedung di kota ini yang tidak sesuai dengan katagori desain seismik yang telah ditentukan, dapat dilakukan penguatan atau *retrofitting* sesuai ketentuannya. Jalur evakuasi tsunami berupa jalan lebar arah selatan-utara dan bangunan bertingkat penyelamatan tsunami di sepanjang jalan di kota ini sebaiknya dibuat. Khususnya di PLTU jalur evakuasi dan bangunan penyelamatan tsunami hendaknya diadakan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Bapak Dr. Ir. Hendra Gunawan selaku Kepala Pusat Survei Geologi atas izin penerbitan karya tulis ini, serta kawan-kawan di Sub-Koordinator Pemetaan Tematik, Pusat Survei Geologi yang telah membantu hingga dapat terselesainya tulisan ini.

ACUAN

- Ammon, C.J., Kanamori, H., Lay, T., and Velasco, A.A., 2006. *The 17 July 2006 Java Tsunami Earthquake*. Geophys. Res. Lett., 33, L24308, doi:10.1029/2006GL028005.
- Architectural Institute of Japan, 2010. *Design Recommendation For Storage Tanks and Their Supports With Emphasis on Sismic Design*. 2010 Edition, 173 p.
- Asikin, S., Handoyo, A., Pratistho, B., dan Gafoer, S., 1992. *Peta Geologi Lembar Banyumas, Jawa Skala 1:100.000*. Puslitbang Geologi, Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN), 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. SNI 1726:2019.
- BMKG, 2019. Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak 1821-2018, Peta Seismisitas Sunda Timur Periode 2009-2017.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004. *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Pd T-14-2004-A, p.23
- Gantes, C.J. and Melissianos, V.E., 2016. *Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture Front*. Built Environ., 26 December 2016, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00034>

Hébert, H., Burg, P.E., Binet, R., Lavigne, S., Allgeyerand, F., and Schindel'e, 2012. The 2006 July 17 Java (Indonesia) Tsunami from Satellite Imagery and Numerical Modelling: A Single or Complex Source?. *Geophysical Journal*, 191(3): 1255-1271.

<https://bing.com/images>, Image of Pipa Minyak dan Gas.

MERAMEX, 2007. *Meramex Project Help to Understand the Bantul Earthquake 2006*. SO 176-SO 179 IfM-GEOMAR.GFZ.CAU.BGR, Meramex 2004.

Soebowo, E., Tohari, A., Kumoro, Y., dan Daryono, M.R., 2009. Sifat Keteknikan Bawah Permukaan di Daerah Pesisir Cilacap, Jawa Tengah. *Proceeding PIT IAGI Semarang 2009, the 38th IAGI Annual Convention and Exhibition*, Semarang, 13-14 October 2009.

Soehaimi, A., 2018. *Potensi Gempabumi Patahan Naik Besar (Megathrust) Busur Sunda dan Patahan Mendatar Mentawai di Selat Sunda dan Sekitarnya*. Badan Geologi, KESDM, www.bgl.esdm.go.id e-mail: geologi@bgl.esdm.go.id ISBN: 978-602-9105-79-7, pp. 121-133.