

# Penilaian Risiko terhadap Pipa Bawah Laut *East Java Gas Pipeline* (EJGP) Pertamina Akibat *Soil Liquefaction* karena Gempa Bumi

Astri M Firucha, Wahyudi, dan Kriyo Sambodho

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: wahyudictr@oe.its.ac.id

**Abstrak**—Kegagalan sistem perpipaan bawah laut sering terjadi karena adanya fenomena alam pengaruh lingkungan dari gelombang, arus dan gempa bumi. Fenomena alam yang terjadi pada pipa bawah laut meliputi, *scouring*, *soil liquefaction*, dan *landslide* yang kemudian berakibat pada *settlement*. Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai penilaian risiko terhadap pipa bawah laut *East Java Gas Pipeline* (EJGP) milik PT. Pertamina yang kemungkinan terjadi *soil liquefaction* karena gempa bumi. Sistem perpipaan yang ditinjau menghubungkan antara Pulau Pangerungan dan Porong. *Soil liquefaction* merupakan fenomena alam yang menggambarkan pencairan tanah jenuh kehilangan kekuatan dan kekakuan dalam menanggapi sebuah tegangan, biasanya getaran gempa bumi atau perubahan mendadak lainnya dalam kondisi stress, menyebabkan tanah berperilaku seperti cairan. Fenomena ini dapat menyebabkan terjadinya *settlement* pada area pipa yang terpasang, sehingga menyebabkan perubahan kedalaman tanah yang dikhawatirkan pipa yang meletak pada permukaan dasar laut mengalami *buckling* akibat terjadinya bentangan bebas (*freSPAN*) serta terjadinya perubahan longitudinal stress pada pipa yang terpasang. Penilaian risiko yang dilakukan dengan menggunakan metode Monte Carlo. Metode ini bertujuan untuk mencari frekuensi peluang kegagalan konsekuensi dari sistem yang ditinjau, sehingga dapat mengetahui matriks risiko untuk tingkat bahaya yang terjadi. Dari analisa yang telah dilakukan, sistem perpipaan akan terjadi *soil liquefaction* untuk semua *Kilometer Points* (KP) dan variasi *magnitude* gempa (*Mw*) dan menunjukkan bahwa risiko pada sistem perpipaan ini berada dalam kondisi ALARP.

**Kata Kunci** : Metode Monte Carlo, Penilaian Risiko, *Settlement*, *Soil liquefaction*.

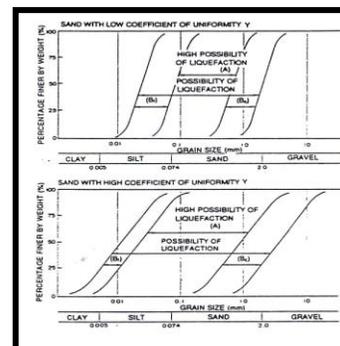
## I. PENDAHULUAN

**S**ubsea pipeline dipergunakan untuk transportasi fluida minyak, gas atau air dalam jumlah besar dan jarak yang jauh melalui laut atau daerah di lepas pantai. Berdasarkan *pipeline engineering*, pipa di analisa memiliki tiga kondisi yaitu kondisi instalasi, *hydrottest* dan kondisi operasi. Pada saat kondisi tersebut pipa bawah laut sering kali mengalami beberapa potensi dan bahaya yang mengancam kerusakan pipa dan berakibat pada keberlangsungan proses instalasi, operasi maupun *hydrottest*. Apabila hal ini terjadi, maka permasalahan ini dapat meluas pada aspek perawatan dan aspek ekonomis serta lingkungan yang ada disekitarnya. Selain itu, kegagalan

pipa juga dapat terjadi karena faktor alam yang berasal dari gelombang, arus dan gempa bumi yang dapat menyebabkan terjadinya *scouring*, *land slide* dan *soil liquefaction*. Sebelum terjadi kegagalan pipa maka perlu melakukan mitigasi yang paling tepat untuk mengurangi adanya kegagalan pipa.

Pada umumnya, *Soil liquefaction* merupakan pencairan tanah yang menggambarkan fenomena dimana tanah jenuh kehilangan kekuatan dan kekakuan dalam menanggapi sebuah tegangan, biasanya getaran gempa bumi atau perubahan mendadak lainnya dalam kondisi stress, menyebabkan tanah berperilaku seperti cairan [1]. Apabila suatu lapisan pasir yang jenuh air mengalami tegangan geser siklik tersebut di atas dan air tidak dapat keluar dari elemen tanah pada saat elemen tersebut menerima beban siklik, maka lapisan pasir tersebut akan memadat yang akan mengakibatkan terjadinya pengurangan volume.

Kondisi tanah bawah laut memiliki kondisi yang beragam yaitu *clay*, *silt*, *sand* dan batu berkarang. Dengan adanya pengaruh lingkungan dari gelombang dan gempa bumi yang berpengaruh pada kegagalan pipa, pengaruh gelombang dan gempa bumi yang juga membuat lapisan dalam tanah mengalami *settlement* yang disebabkan oleh hilangnya tekanan air pori yang nantinya juga berakibat pada kegagalan pipa. *Soil liquefaction* hanya terjadi pada butiran tanah berpasir. Sedangkan pada butiran kasar (*gravels*) dan butiran halus (*clay*) sulit untuk terjadi *liquefaction*. Dengan ukuran butiran tanah yang seragam berkisar antara  $0,20 \text{ mm} < D_{50} \leq 0,40 \text{ mm}$  adalah sensitive terhadap *liquefaction*. Menurut rujukan[2], tanah dengan gradasi yang terdapat pada zone A, B<sub>f</sub> dan B<sub>c</sub> mempunyai potensi untuk mengalami pengaruh *liquefaction*. *Liquefaction* umumnya dapat terjadi pada lapisan pasir dan lapisan lanau yang mempunyai plastisitas rendah ( $PI < 15\%$ ).



Gambar 1. Kurva Gradasi Dari Tanah Yang Mengalami Potensi *Liquefaction* [2].

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Pengumpulan Data Pipa dan Data Lingkungan

Pengumpulan data yang digunakan pada analisis ini adalah menggunakan data pipa dan data lingkungan. Data pipa meliputi data desain pipa dan data *properties* pipa yang sesuai dengan tipe material yang digunakan. Sedangkan data lingkungan meliputi data tanah dan data gempa.

### B. Pengolahan Data

Dalam mengolah data yang pertama kali dilakukan adalah menyiapkan data. Kemudian melakukan pemetaan terhadap ruas pipa yang berpotensi dalam mengalami *soil liquefaction* karena gempa bumi dengan menggunakan persamaan yang telah disediakan. Tahap selanjutnya adalah menghitung *soil liquefaction* pada ruas pipa yang ditentukan dengan mengetahui *factor of safety* (FS). Apabila  $FS \leq 1$  maka dapat dinyatakan akan terjadi *soil liquefaction*, dan sebaliknya jika  $FS > 1$  dapat dinyatakan tidak akan terjadi *soil liquefaction*. Setelah mengevaluasi *soil liquefaction*, maka tahap berikutnya dapat dilakukan perhitungan *settlement* untuk mengetahui perubahan kedalaman tanah.

### C. Identifikasi Bahaya Akibat Soil Liquefaction

Mengetahui identifikasi bahaya yang akan terjadi yang nantinya akan di masukkan ke dalam penilaian risiko untuk menghitung peluang kegagalan pipa akibat likuifaksi berdasarkan sumber gempa dan properti tanah. Sumber gempa meliputi *magnitude* gempa dan *peak ground acceleration*. Dan apabila properti tanah memenuhi untuk berpotensi terjadi likuifaksi maka akan dilanjutkan dengan melakukan penilaian resiko dan apabila tidak memiliki potensi likuifaksi dilanjutkan pada ruas berikutnya atau selesai. Setelah mengetahui peluang kegagalan kemudian dapat menganalisa konsekuensi kegagalan akibat likuifaksi pada sedimen tanahnya yang jenis tanahnya berupa butiran halus yang lepas.

### D. Perhitungan Frekuensi dan Konsekuensi

#### 1. Perhitungan Frekuensi Kejadian (Peluang Kejadian)

Perhitungan frekuensi kejadian (peluang kejadian) dapat mengetahuinya berdasarkan model probabilitas kegagalan dengan menggunakan metode Monte Carlo. Dari perhitungan tersebut akan dianalisa berapa banyak frekuensi yang akan terjadi pada setiap kejadian kemudian dilakukan perancangan [3].

#### 2. Perhitungan Konsekuensi

Perhitungan konsekuensi dilakukan untuk mengetahui konsekuensi-konsekuensi yang terjadi pada sistem perpipaan bawah laut yang terletak di atas permukaan tanah akibat likuifaksi karena gempa bumi, maka konsekuensi yang mungkin terjadi bila *settlement* terjadi adalah perubahan *properties* pipa yang disebabkan oleh perubahan tegangan yang bekerja di sekitar pipa. Tegangan-tegangan tersebut antara lain adalah tegangan *hoop*, tegangan *axial*, tegangan *longitudinal* serta tegangan kombinasi dari ketiga

tegangan yang telah disebutkan sebelumnya, kemudian dilakukan perancangan [3].

### E. Menentukan Tingkat Risiko

Menganalisa tingkat risiko kegagalan yang terjadi pada *settlement* akibat *soil liquefaction* dengan memasukkan frekuensi kejadian dan konsekuensi ke dalam matriks risiko. Kemudian dilakukan perkalian antara frekuensi dan konsekuensi untuk mengetahui matriks risiko yang mengacu pada *standard code* [3]. Risiko tersebut akan ditentukan dalam *risk matrix* untuk dapat diterima atau tidak dapat diterima.

### F. Mitigasi Risiko

Pada tahap ini dilakukan evaluasi apakah risiko tersebut dapat diterima atau tidak. Apabila risiko tersebut tidak bisa diterima maka dilakukan proses mitigasi untuk menurunkan level risiko dengan mengurangi frekuensi atau konsekuensi yang terjadi. Mitigasi risiko dilakukan apabila terjadi risiko *soil liquefaction* karena gempa bumi. Suatu Tindakan untuk mengurangi risiko terjadinya *soil liquefaction* dengan menggunakan mitigasi yang paling tepat digunakan agar nantinya dapat mengantisipasi lebih lanjut ketika akan terjadi *soil liquefaction* karena gempa bumi.

### G. Kesimpulan dan Saran

Menarik kesimpulan dari hasil analisa yang telah dibuat dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya yang terkait pada topik penelitian dalam tugas akhir ini.

## III. HASIL DAN DISKUSI

### A. Deskripsi Sistem

Secara garis besar penyelesaian ini akan membahas tentang risiko yang diperkirakan terjadi pada pipa gas bawah laut PT. Pertamina yang diakibatkan *soil liquefaction* karena gempa bumi. Dari data yang diperoleh dapat diketahui bahwa pipa gas bawah laut yang terpasang 357 Km, namun nantinya akan terjadi kegagalan pipa yang memiliki potensi untuk dapat terjadi *soil liquefaction* jika lapisan tanahnya pasir atau lanau yang jenuh air laut. Sehingga setelah dilakukan analisa *Kilometer Points* (KP) sepanjang pipa, lapisan yang memiliki risiko untuk terkena *soil liquefaction* adalah terdapat pada KP 74.117; 76.216; 82.447; 86.119; 88.773; 92.343; 100.253; 103.871; 113.910; 118.569; 120.710; 127.721; 132.439; 137.405; 169.221; 171.906; 172.906; 182.259; 188.870; 189.456. Dengan berdasarkan data yang diperoleh *soil liquefaction* ini menggunakan metode *Cone Penetration Test* (CPT) dengan kedalaman 10 m, namun lapisan tanah yang dianalisa Selain adalah pasir atau lanau dan pada kedalaman hingga 10m tidak dilakukan analisa karena lapisan tanahnya berupa *clay* yang tidak *liquifiable*. Identifikasi terhadap bahaya ini, terlebih dahulu dilakukan dengan mengestimasi *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) berdasarkan data tanah yang telah diperoleh. Setelah diketahui harga CRR dan CSR untuk masing-masing KP, langkah berikutnya adalah menghitung *Factors of Safety* (FS). Apabila  $FS > 1$ , maka dapat dipastikan tanah dimana *pipeline system* terpasang tidak akan mengalami fenomena *soil liquefaction* dan sebaliknya apabila

$FS \leq 1$  maka *pipeline system* akan berpotensi mengalami *buckling* akibat hilangnya tekanan air pori yang menyebabkan *settlement*.

**B. Cyclic Resistance Ratio (CRR)**

Berdasarkan data tanah yang dimiliki oleh PT. Pertagas dengan menggunakan hasil pengukuran CPT (*Cone Penetration Test*), dapat diketahui nilai dari CRR berdasarkan metode CPT (*Cone Penetration Test*) [4], seperti yang terdapat pada persamaan berikut ini:

$$CRR_{7.5} = 0,833 \left[ \frac{(qc_{1N})_{cs}}{1000} \right] + 0,05 \quad \text{if } (qc_{1N})_{cs} < 50 \quad (1)$$

$$CRR_{7.5} = 93 \left[ \frac{(qc_{1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0,08 \quad \text{if } 50 < (qc_{1N})_{cs} < 160 \quad (2)$$

dengan,

$(qc_{1N})_{cs}$  : Normalisasi ketahanan penetrasi *clean sand* (Kpa)

Dalam Penyelesaian ini perhitungan CRR menggunakan persamaan 2 dan perhitungan didapatkan 3 macam variasi magnitude gempa yang terjadi berdasarkan frekuensi acak dari magnitude gempa yang telah ditetapkan serta diambil dari rekapitulasi beberapa variasi deviasi 5%, 10% dan 15%.

**C. Cyclic Stress Ratio (CSR)**

Setelah diketahui harga CRR dari masing-masing KP yang ditinjau, langkah selanjutnya adalah mengestimasi harga CSR berdasarkan variasi *magnitude* gempa [5]. Seperti yang terdapat pada persamaan berikut ini:

$$CSR_{7.5} = \left( \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0,65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \left( \frac{rd}{MSF} \right) \quad (3)$$

dengan,

- $a_{max}$  : Percepatan horizontal maksimum akibat gempa (g)
- $g$  : Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $\sigma_{vo}$  : Tegangan vertikal total (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma'_{vo}$  : Tegangan vertikal efektif (kN/m<sup>2</sup>)

Berdasarkan rujukan [6], Besarnya MSF dapat diperoleh persamaan berikut ini:

$$MSF = 10^{2.24/M_w^{2.56}} \quad (4)$$

dengan  $M_w$  adalah *magnitude* gempa (SR).

Nilai rata-rata  $rd$  dapat dinyatakan melalui persamaan berikut berdasarkan NCEER[6]:

$$rd = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0.5} + 0,04052z + 0,001753z^{1.5})}{(1,000 - 0,4177z^{0.5} + 0,05729z - 0,006205z^{1.5} + 0,001210z^2)} \quad (5)$$

dengan,

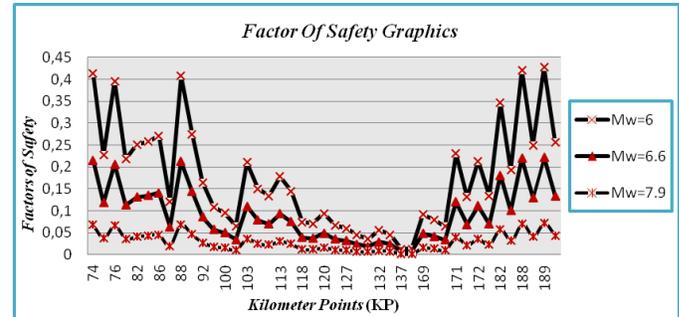
- $r_d$  : Koefisien reduksi tegangan
- $z$  : Kedalaman dari permukaan tanah (m)

**D. Factors of Safety (FS)**

Pada hasil perhitungan sebelumnya didapatkan harga parameter-parameter CRR dan CSR, NCEER mengestimasi FS dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$FS = \frac{CSR}{CSR_{eq}} = \frac{CRR}{CRR_{eq}}, FS \leq 1 \quad (6)$$

Dari perhitungan nilai *factors of safety* didapatkan bahwa titik-titik sondir pada setiap KP yang dianalisa, jenis tanah pasir atau lanau berpotensi terjadi *soil liquefaction* dengan nilai  $FS \leq 1$ . Di bawah ini terdapat grafik *factors of safety*, dengan sumbu-X adalah nilai *factors of safety* (FS) dan sumbu-Y adalah *kilometer points* (KP) pada pipa seperti pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Grafik Nilai FS Untuk Semua KP Dengan Variasi Magnitude Gempa.

Pada Gambar 2 Perubahan yang sangat berbeda terjadi pada *Kilometer Points* (KP) 137, hal ini terjadi karena jarak epicentrum sangat dekat dari sumber gempa.

**E. Settlement Akibat Soil Liquefaction Karena Gempa Bumi**

*Settlement* merupakan bagian terpenting dari sebuah *soil investigation* dengan memperkirakan akibat dari *soil liquefaction* yang terjadi pada setiap lapisan tanah jenuh. Dengan menggunakan data lingkungan yang ada serta dengan menggunakan grafik Gambar 3 untuk memperoleh hubungan tegangan volumetrik dari perbedaan nilai FS (*factors of safety*) yang diperoleh pada persamaan (6) dengan berdasarkan nilai CSR pada *magnitude* gempa yang berbeda dan normalisasi ketahanan penetrasi *clean sands*  $(qc_{1N})_{cs}$  dengan menggunakan persamaan di bawah ini [7]:

$$\epsilon_v = 102(qc_{1N})_{cs}^{-0.82} \quad (7)$$

dengan ketentuan,  $FS \leq 0,5$  dan  $33 \leq (qc_{1N})_{cs} \leq 200$ .

dimana,

- $(qc_{1N})_{cs}$  : Normalisasi ketahanan penetrasi pada *clean sands* (Kpa)
- $\epsilon_v$  : Regangan Volumetrik (*Volumetric strain*) (%)
- FS : Nilai Keamanan.

Sehingga *settlement* dapat diperkirakan kedalamannya dengan menggunakan persamaan 8 seperti di bawah ini [8]:

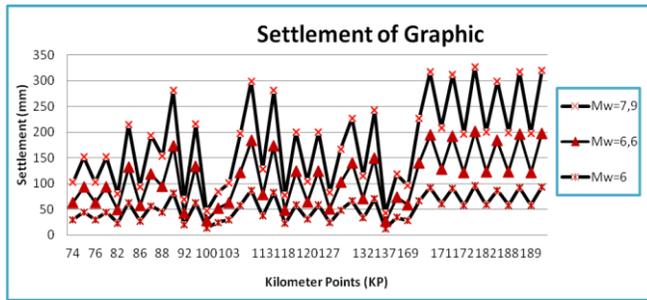
$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_{vi} \cdot dz_i \quad (8)$$

dengan ,

- $\epsilon_{vi}$  : Tegangan volumetrik pada setiap lapisan tanah jenuh ke- $i$  (%)
- $z_i$  : Kedalaman dari permukaan tanah ke- $i$  (m)

Dari hasil perhitungan *settlement* yang terinduksi oleh likuifaksi karena pengaruh gempa bumi terdapat pada Gambar 3 dengan perubahan *settlement* pada ketebalan setiap lapisan tanah

dengan *magnitude* gempa yang terdapat pada Gambar 3. Dengan sumbu-X menunjukkan sebagai *Kilometer Points (KP)* dan sumbu-Y menunjukkan sebagai *settlement* dalam milimeter.



Gambar 3. Grafik *Settlement* Untuk Semua KP Dengan Variasi *Magnitude*

F. *Perkiraan Frekuensi*

Dalam mengestimasi peluang kegagalan yang terjadi pada sistem perpipaan akibat adanya *soil liquefaction* karena gempa bumi, digunakan metode Monte Carlo. Dengan menggunakan mode kegagalan pada persamaan berikut ini [9]:

$$g_{(x)} = CRR - CSR \tag{9}$$

dengan,

CRR : *Cyclic Resistance Ratio*

CSR : *Cyclic Stress Ratio*

Metode Monte Carlo mengandung *variabel random* dari suatu sistem yang disimulasikan berdasarkan distribusi peluangnya. *Variabel random* (angka acak) yang digunakan untuk menghitung peluang kegagalan adalah *magnitude* gempa (Mw) dengan memberikan data acak 1000 data yang digunakan pada persamaan CDF (*Cumulative Distribution Function*) distribusi normal yang diperoleh dari persamaan berikut ini [10]:

$$fN(x; \mu x, \sigma x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu x)^2}{2\sigma x^2}} dt \tag{10}$$

dengan,

$\mu x$  : Mean

$\sigma x$  : Deviasi standard

Sehingga persamaan untuk menentukan frekuensi kejadian adalah sebagai berikut [11]:

$$Fk = Pg = n/Nk \tag{11}$$

dengan,

Fk : Frekuensi kejadian

P : Peluang kegagalan dari sistem

Pg : Peluang gagal dari seluruh kejadian

Nk : Jumlah seluruh kejadian

n : Jumlah kejadian kegagalan.

G. *Perkiraan Konsekuensi*

Konsekuensi yang mungkin terjadi apabila mengalami *settlement* adalah terjadinya perubahan *properties* pipa yang

disebabkan oleh perubahan tegangan-tegangan yang bekerja di sekitar pipa. Tegangan-tegangan tersebut antara lain adalah tegangan *hoop*, tegangan *axial*, tegangan *longitudinal* serta tegangan kombinasi dari ketiga tegangan yang telah disebutkan sebelumnya, tegangan-tegangan tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan berikut ini [12]:

$$\text{Hoop Stress} : \sigma_h = \frac{(P_i - P_e)OD}{2t} \tag{12}$$

$$: P_e = \rho g d \tag{13}$$

$$\text{Longitudinal Stress} : \sigma_L = \sigma_a + \frac{\Delta P A_o}{A} + P_i \tag{14}$$

$$\text{Axial Stress} : \sigma_a = \frac{T}{2At} \tag{15}$$

$$: T = P_i - P_e \tag{16}$$

$$A = A_o - A_i = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2)$$

(17)

$$A_o = \pi r^2 \tag{18}$$

$$\text{Combined Stress} : \sigma_c = \sqrt{(\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \sigma_L + 3\sigma_a^2)} \tag{19}$$

dengan,

$\sigma_h$  : *Hoop stress* (psi)

$\sigma_L$  : *Longitudinal stress* (psi)

$\sigma_a$  : *Axial stress* (psi)

$\sigma_c$  : *Combined stress* (psi)

Pi : *Net internal pressure* (psi)

Pe : *Eksternal pressure* (psi)

$\rho$  : Massa jenis air laut (Kg/m<sup>3</sup>)

g : Gaya gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

d : Kedalaman laut (m)

OD : Diameter luar (inch)

t : *Wall thickness* (inch)

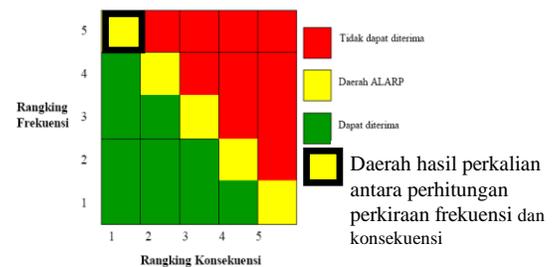
D<sub>i</sub> : Diameter dalam pipa (inch)

A : *Cross sectional area* (inch<sup>2</sup>)

r : Jari-jari (inch)

H. *Matriks Risiko*

Matriks risiko yang ditunjukkan berupa perkalian antara frekuensi atau peluang kejadian dengan konsekuensi dari seluruh hasil yang. Sehingga dapat dilakukan tabulasi terhadap hasil perhitungan seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1 dan Gambar 4 untuk mengetahui keberadaan daerah matriks risikonya.



Gambar 4. Matriks Risiko [3].

NO	KP	Mw = 6		Mw = 6.6		Mw = 7.9		Level Risiko
		F <sub>k</sub>	K <sub>k</sub>	F <sub>k</sub>	K <sub>k</sub>	F <sub>k</sub>	K <sub>k</sub>	
1	74,117	5	1	5	1	5	1	ALARP
2	76,216	5	1	5	1	5	1	ALARP
3	82,477	5	1	5	1	5	1	ALARP
4	86,199	5	1	5	1	5	1	ALARP
5	88,773	5	1	5	1	5	1	ALARP
6	92,343	5	1	5	1	5	1	ALARP
7	100,253	5	1	5	1	5	1	ALARP
8	103,871	5	1	5	1	5	1	ALARP
9	113,910	5	1	5	1	5	1	ALARP
10	118,569	5	1	5	1	5	1	ALARP
11	120,710	5	1	5	1	5	1	ALARP
12	127,721	5	1	5	1	5	1	ALARP
13	132,439	5	1	5	1	5	1	ALARP
14	137,405	5	1	5	1	5	1	ALARP
15	169,221	5	1	5	1	5	1	ALARP
16	171,906	5	1	5	1	5	1	ALARP
17	172,906	5	1	5	1	5	1	ALARP
18	182,259	5	1	5	1	5	1	ALARP
19	188,870	5	1	5	1	5	1	ALARP
20	189,456	5	1	5	1	5	1	ALARP

Tabel .1 Matriks Risiko

dengan,

F<sub>k</sub> : Ranking frekuensi kejadian

K<sub>k</sub> : Rangka konsekuensi kejadian

I. Mitigasi Risiko

Dalam tugas akhir ini telah memberikan solusi mitigasi risiko yang tepat dengan pembuatan batu berkolom yang biasa disebut dengan *stone column (gravel drain)*. *Stone column* adalah tumpukan kerikil yang didesain dibawah permukaan tanah air laut yang berfungsi untuk membantu mengurangi adanya potensi *settlement* akibat *soil liquefaction*. Dengan adanya *stone column* dapat memiliki tegangan geser yang lebih besar dan mengurangi tekanan air pori pada tanah. Apabila pipa mengalami bentangan bebas maka *stone column* ini dapat membantu untuk meminimalisirkan terjadinya bentangan bebas atau *freSPAN*.

Merujuk pada [13] menjelaskan, *Stone column* merupakan salah satu teknik perbaikan tanah dengan cara memasukkan material granular yang dipadatkan sehingga daya dukung tanah disekitarnya meningkat. Proses konstruksi *stone column* bisa menggunakan dua teknik yaitu dengan teknik *vibro-replacement* dan *vibro displacement*, secara singkat teknik *vibro replacement* dilakukan dengan cara menyemprotkan air dengan kecepatan yang tinggi (*water jetting*) untuk membuat lubang. Berikut ini merupakan spesifikasi yang harus diperhatikan dalam proses pembuatan *stone column* [13]:

1. Ukuran material biasaya ukuran material fill /material yang dimasukkan kedalam lubang *stone column* berupa material granular yang berbutir kasar dengan ukuran yang bekisar antara 2 mm sampai 40 mm.
2. Ukuran diameter *stone colum* berkisar antara 0,75 m – 1,5m
3. Spasi antar *stone column* dari pusat diameter ke pusat diameter lainnya berkisar dari 1.5 m sampai 3 m.
4. Kedalaman efektif *stone column* Kedalaman efektif *stone column* pada umumnya berkisar antar 6-10 meter, walaupun secara sejarah pernah ada yang melakukan pembuatan *stone column* hingga kedalaman 31 meter, konstruksi *stone column* yang terlalu dalam kurang ekonomis selain itu dikhawatirkan proses pemadatan yang dilakukan *vibroflot* kurang maksimal sehingga material granular yang berada dalam lubang terlalu dalam menjadi kurang padat.
5. Waktu pemasangan *stone column* waktu untuk proses pemasangan *single stone colum* berkisar antar 10-30 menit, merupakan waktu yang cukup cepat bila dibandingkan dengan perbaikan tanah yang lain.

Adapun fungsi dari pada pemasangan *stone column* sebagai mitigasi *soil liquefaction* karena gempa bumi yang menyebabkan kegagalan pipa adalah sebagai berikut [14]:

1. Memperkecil potensi likuifaksi dengan meningkatkan kepadatan tanah sekitarnya, sehingga memungkinkan untuk dapat mengeringkan kerikil yang dapat mengontrol tekanan pori.
2. *Stone column* (kolom batu) dapat berpotensi untuk meningkatkan tekanan di dalamnya dan menyebabkan tekanan pada tanah yang berada di luarnya menjadi turun.
3. Dapat menambah daya dukung untuk menopang struktur yang berada di atasnya.
4. Dapat meningkatkan tegangan geser pada tanah sehingga tidak mudah mengalami penurunan tanah yang dapat menimbulkan kegagalan pipa.
5. Pencegahan likuifaksi, potensi likuifaksi muncul pada kondisi pasir yang lepas sehingga likuifaksi dapat berkurang pada daerah yang diberi perkuatan *stone column*.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Melalui proses analisa dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Di lokasi sepanjang pipa gas bawah laut *East Java Gas Pipeline (EJGP)* Pulau Pagerungan-Porong akan terjadi *soil liquefaction* apabila *magnitude* gempa (Mw) mencapai 6 SR, 6.6 SR, dan 7.9 SR.
2. *Soil liquefaction* tersebut akan menyebabkan *settlement* dengan perubahan ketebalan lapisan tanah. Semakin besar *magnitude* gempa yang diterima, maka semakin dalam pula *settlement* yang terjadi pada setiap lapisan tanah dan begitu pula sebaliknya.
3. Tingkat risiko yang terjadi untuk semua variasi perhitungan terletak pada zona ALARP.
4. Mitigasi risiko yang digunakan lebih banyak mengarah untuk mengurangi konsekuensi yang ditimbulkan akibat *soil*

*liquefaction* dan mitigasi tersebut adalah perlindungan tambahan pada pipa dengan *stone column*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. A. Sladen, R. D. D'Hollander, dan D. E. Mitchell, "Back Analysis of The Nerlerk Berm Liquefaction Slides," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, No. 4 (1985) 579-588.
- [2] *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, Japan Port and Harbour Research Institute (1971).
- [3] *Risk Assessment of Pipeline Protection DNV OS-F101*, Det Norske Veritas, Norway (2000).
- [4] C. Hsein Juang, Haiming Yuan, Der-Her Lee, dan Chih-Sheng Ku, "Assessing CPT-Based Methods For Liquefaction Evaluation With Emphasis On The Cases From The Chi-Chi Taiwan Earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3 (2002, Apr.) 241-258.
- [5] H. Bolton Seed dan I. M. Idriss, *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*, Oakland, USA: Earthquake Engineering Research Institute (1982).
- [6] *Liquefaction Potential And Post-Liquefaction Settlement of Saturated Clean Sands and Effect of Geofiber Reinforcement*, National Center for Earthquake Engineering Research, University of Alaska Fairbanks, (1996).
- [7] Ishahara Kenji dan Yoshimine Mitsutoshi, "Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquake," *Soils and Foundation*, Vol. 32, No. 1 (1992, Mar.) 173-188.
- [8] G. Zhang, P. K. Robertson, dan R.W.I. Brachman, "Estimating Liquefaction-Induced Ground Settlement From CPT for Level Ground," *Can. Geotech*, Vol.39 (2002) 1168-1180.
- [9] Sanjay K. Jha dan Kiichi Suzuki, "Reability Analysis of Soil Liquefaction Based on Standard Penetration Test," *Computer and Geotechnics*, Vol. 36, No. 1 (2009, Mei) 589-596.
- [10] Harinaldi, *Prinsip-prinsip Statistik Untuk Teknik dan Sains*, Jakarta: Jakarta (2005).
- [11] D. M. Rosyid, *Pengantar Rekayasa Keandalan*, Surabaya: Airlangga University Press (2007).
- [12] *Submarine Pipeline Systems DNV OS-F101*, Det Norske Veritas, Norway (2000).
- [13] D. Arlen, R. Akbar, dan Hendra Simanjorang, "Laporan Presentasi Tugas Rekayasa Pondasi Lanjut," Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB, Bandung (2011).
- [14] Korhan Adalier dan Ahmed Elgamel, "Stone Mitigation of Liquefaction and Associated Ground Deformations by Stone Columns," *Engineering Geology*, Vol. 72, No. 3-4 (2004, Apr.) 275-291.