

KAJIAN KERENTANAN FASILITAS DARAT INA-CBT TERHADAP GUNCANGAN GEMPABUMI

VULNERABILITY ASSESSMENT OF INA-CBT ON-SHORE FACILITIES AGAINST EARTHQUAKE SHAKING

Mulyo Harris Pradono¹

¹Perekayasa Utama pada Pusat Teknologi Reduksi Risiko Bencana – Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Jl. M. H. Thamrin No. 8, Jakarta 10340, telepon: (021) 7579 1378
e-mail: mulyo.harris@bppt.go.id

ABSTRACT

Ina-CBT is an Indonesian Cable-Based Tsunamimeter (or Tsunameter). Ina-CBT is part of the Ina-TEWS (Indonesia Tsunami Early Warning System) which is a tsunami early warning system in Indonesia that aims to provide tsunami early warnings when events occur. This Cable-Based Tsunamimeter consists of an underwater sensor that measures earthquake vibrations and water pressure. Vibration and pressure data are then transmitted through the submarine cable to the mainland. Facilities on land are very important because they send real time data via radio to the monitoring center. Land facilities consist of Beach Manhole, Towers, and Power Houses. All of these facilities must continue to work despite large earthquake shocks which is a sign of tsunami starts. This facility must also be made safe from tsunami attacks. In this paper, the vulnerability of the facility is assessed for earthquake shocks in accordance with applicable standards.

Keywords: *Ina-CBT, on-shore facilities, triangle tower, monopole tower, earthquake*

ABSTRAK

Ina-CBT adalah Indonesia *Cable-Based Tsunamimeter* (atau *Tsunameter*). Ina-CBT adalah bagian dari Ina-TEWS (*Indonesia Tsunami Early Warning System*) yang merupakan sistem peringatan dini tsunami di Indonesia yang bertujuan memberikan peringatan dini tsunami saat kejadian berlangsung. *Cable-Based Tsunamimeter* ini terdiri dari sensor bawah laut yang mengukur getaran gempa dan tekanan air. Data getaran dan tekanan kemudian diteruskan melalui kabel bawah laut sampai ke daratan. Fasilitas di daratan menjadi sangat penting karena secara *real time* mengirim data melalui radio ke pusat pemantauan. Fasilitas daratan terdiri dari *Beach Manhole* (BMH), Menara, dan Rumah Listrik. Semua fasilitas ini harus tetap bekerja walaupun guncangan gempa besar terjadi yang mengawali terjadinya tsunami. Fasilitas ini juga harus dibuat aman terhadap terjangan tsunami. Di dalam makalah ini, kerentanan fasilitas tersebut dikaji terhadap guncangan gempa sesuai dengan standar yang berlaku.

Kata kunci: Ina-CBT, fasilitas *on-shore*, menara segitiga, menara tunggal, gempa

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

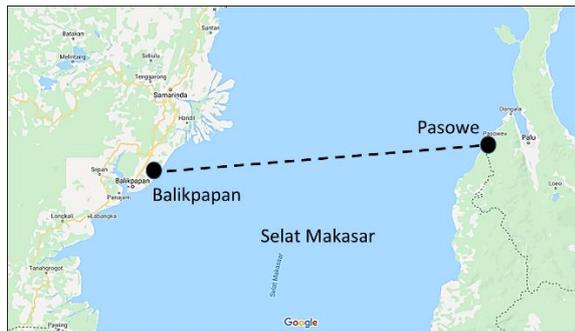
Pada tahun 2020 ini, pemerintah Indonesia akan membangun fasilitas Ina-CBT di Indonesia. Ina-CBT merupakan singkatan dari Indonesia *Cable-Based Tsunamimeter* (atau *Tsunameter*). Ina-CBT merupakan bagian dari Ina-TEWS (*Indonesia Tsunami Early Warning System*). Ina-TEWS adalah sistem peringatan dini tsunami di Indonesia yang bertujuan memberikan peringatan dini tsunami saat kejadian berlangsung. Selain

Ina-CBT, Ina-TEWS juga menggunakan teknologi Ina-Buoy yang menggunakan pelampung dan sensor bawah laut untuk mendeteksi dini kejadian tsunami. Ina-Buoy tidak dibahas dalam makalah ini.

Ina-CBT mempunyai sensor untuk mengukur perubahan tekanan air bawah laut dan beberapa sensor lainnya. Perubahan tekanan air bawah laut berhubungan dengan kenaikan atau penurunan muka air laut akibat tsunami. Data tekanan ini kemudian dikirimkan ke pusat pemantauan, melalui kabel bawah laut dan melalui fasilitas darat. Fasilitas darat mengirimkan data ke pusat pemantauan

melalui radio atau melalui satelit. Fasilitas darat terdiri dari *Beach Manhole* (BMH), menara, dan rumah listrik (*power house*).

Sesuai dengan rencana kegiatan Ina-CBT di awal tahun 2020, maka penempatan Ina-CBT akan dilakukan pada 3 lokasi di Indonesia. Ketiga lokasi itu adalah Selat Malaka, Labuan Bajo, dan Rokatenda. Gambar-gambar berikut menunjukkan rencana lokasi Ina-CBT dengan rencana lokasi fasilitas daratnya.



Gambar 1. Lokasi Rencana Jalur Kabel dan Fasilitas Darat di Selat Makassar (Sumber: Peta Google (Google, 2020))



Gambar 2. Lokasi Rencana Jalur Kabel dan Fasilitas Darat di Labuan Bajo dan Rokatenda (Sumber: Peta Google (Google, 2020))

Ina-CBT di Selat Makassar mempunyai dua fasilitas darat, yaitu direncanakan di sekitar Kota Balikpapan dan sekitar Pasowe (Kelurahan Salungkaenu, Kecamatan Banawa Sel., Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah) (Gambar 1). Ina-CBT di Labuan Bajo mempunyai satu fasilitas darat, yaitu di Labuan Bajo (Gambar 2, bagian kiri). Ina-CBT di Rokatenda mempunyai satu fasilitas darat, yaitu di sekitar PLTU Ropa (atau di Kantor Monitoring Gunungapi PVMBG di dekatnya) (Gambar 2, bagian kanan). Ina-CBT Rokatenda dimaksudkan untuk mengantisipasi tsunami akibat longsor gunungapi Rokatenda di laut yang berada di utara fasilitas PLTU Ropa.

Sebagai fasilitas penyambung informasi dari dasar laut ke darat dan dari darat ke

pusat pemantauan, maka fasilitas darat yang terdiri dari *Beach Manhole*, menara, dan rumah listrik harus kuat dalam menghadapi guncangan gempa besar yang mendahului terjadinya tsunami. Untuk menghadapi gempa besar, kajian mengenai potensi dan lokasi gempa besar sudah dilakukan dan dilaporkan dalam buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 (KemenPUPR, 2017). Untuk menghadapi tsunami, fasilitas *Beach Manhole* akan ditanam di dalam tanah, sedangkan fasilitas rumah listrik dan menara akan dipasang di luar jangkauan tsunami.

Daerah pantai umumnya mempunyai jenis tanah lunak. Sedangkan bangunan menara mempunyai kerentanan yang cukup tinggi pada daerah dengan jenis tanah lunak. Hal ini disebabkan jenis tanah lunak membuat frekuensi dominan getaran gempa menjadi berfrekuensi rendah. Getaran frekuensi rendah ini akan meresonansi menara tinggi yang mempunyai frekuensi alami rendah juga. Bangunan *Beach Manhole* (BMH) dan rumah listrik mempunyai kerentanan gempabumi yang lebih baik. Hal ini disebabkan BMH umumnya dibangun di dalam tanah, sedangkan rumah listrik dibangun sebagai bangunan kecil.

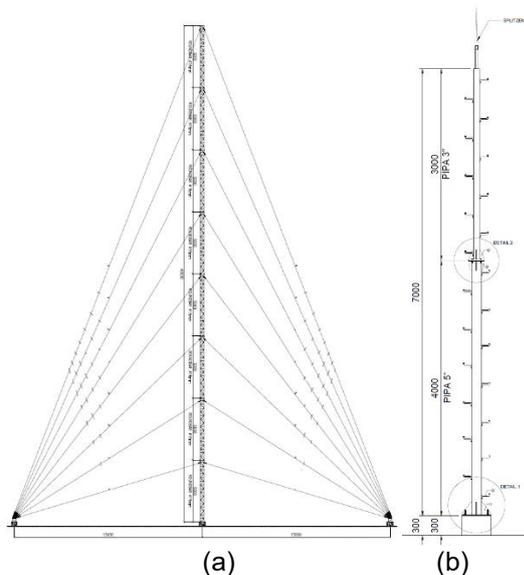
1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian dan kajian ini adalah untuk mengetahui tingkat ancaman gempabumi pada rencana lokasi bangunan darat Ina-CBT dan perilaku bangunan darat Ina-CBT akibat guncangan gempabumi untuk mengetahui tingkat dari kerentanan bangunan tersebut. Tingkat kerentanan terhadap tsunami tidak dibahas, karena menara direncanakan berada di luar jangkauan serangan tsunami.

II. BAHAN DAN METODE

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dimensi dan material menara Ina-CBT yang akan dibangun menggunakan data menara pada tahun sebelumnya (2019) di lokasi lain. Setiap lokasi mempunyai tingkat ancaman gempa yang berbeda-beda, sehingga hasil kajian pada satu lokasi tidak harus dapat digunakan untuk daerah lain. Bahan lainnya adalah peta ancaman gempa yang didapat dari buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 (Kemen PUPR, 2017).

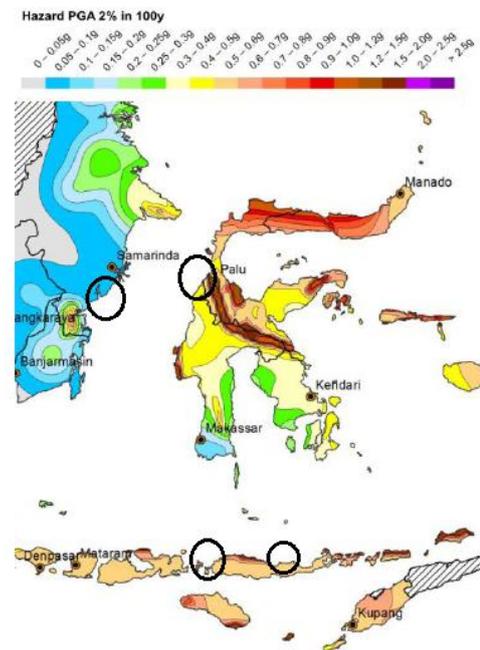


Gambar 3. Dimensi Menara Fasilitas darat Ina-CBT (a) Menara Segitiga (Duta Rimba Teknik, 2020a) (b) Menara Tunggal (Duta Rimba Teknik, 2020b)

Peta ancaman gempa di buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 (KemenPUPR, 2017) merupakan dasar dalam merancang bangunan aman gempa di Indonesia. Peta ini berisi nilai ancaman gempabumi yang dinyatakan dalam nilai percepatan puncak gempabumi di permukaan tanah (*peak ground acceleration*). Informasi lainnya adalah berupa probabilitas terjadinya nilai percepatan puncak tersebut. Gambar 4 menunjukkan nilai percepatan gempabumi di batuan dasar di lokasi kajian untuk probabilitas gempa 2500 tahunan. Dengan kata lain, nilai percepatan di sini akan disamai atau dilampaui dengan kemungkinan 2% dalam 50 tahun.

Selain nilai puncak, dalam membangun struktur aman gempa, diperlukan spektrum respon getaran gempabumi di setiap lokasi tersebut. Untuk ini, Kementerian PUPR telah menyiapkan laman untuk memperoleh spektrum respon getaran gempabumi pada setiap lokasi di Indonesia. Laman tersebut

dinamakan Desain Spektra Indonesia (Kemen PUPR, 2011), dan bisa diakses melalui: http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/



Gambar 4. Nilai Percepatan Gempabumi di Batuan Dasar di Lokasi Kajian (tanda lingkaran) dengan Probabilitas 2% Dalam 50 Tahun (Gempa 2500 Tahunan) (KemenPUPR, 2017)

2.2. Metode

Metode Penelitian yang dilakukan adalah:

- Mengunjungi laman Desain Spektra Indonesia di atas dan memperoleh desain spektra untuk 4 lokasi fasilitas darat.
- Melakukan pengumpulan data dimensi menara yang digunakan pada tahun 2019.
- Melakukan analisis struktur menara segitiga dan menara tunggal pada perangkat lunak program analisis struktur, untuk mendapatkan perilaku menara tersebut saat terjadi gempa.
- Memberikan rekomendasi perancangan menara untuk 4 lokasi fasilitas darat Ina-CBT

Penelitian dilakukan pada bulan Februari – Maret 2020, sesuai dengan penjadwalan dari kegiatan Ina-CBT di Pusat Teknologi Reduksi Risiko Bencana.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

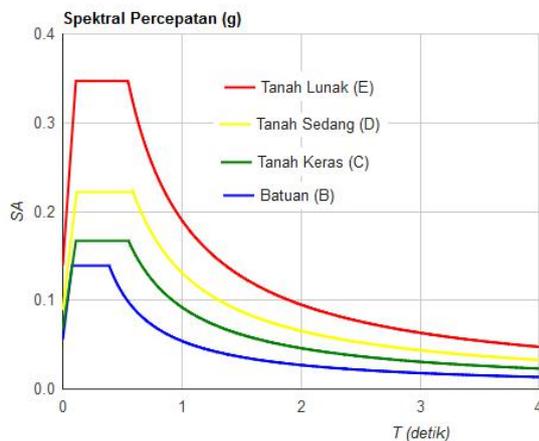
3.1. Spektrum Respon Gempa

3.1.1. Sekitar Kota Balikpapan

Wilayah sekitar Kota Balikpapan di Kalimantan akan dipilih sebagai lokasi penempatan fasilitas darat Ina-CBT karena dekat dengan calon Ibu Kota Negara (IKN) dan sudah memiliki fasilitas kelistrikan dan telekomunikasi yang baik. Salah satu tujuan

dari pemasangan Ina-CBT di Selat Makassar ini adalah untuk memberikan peringatan dini kepada wilayah IKN dan sekitarnya sehingga lebih siaga dalam menghadapi ancaman tsunami di wilayah ini.

Dengan mengunjungi laman yang ditunjukkan pada sub-bab 2.1, maka dengan menentukan lokasi menara, yaitu di sekitar Kota Balikpapan, maka diperoleh Spektrum Respon Gempa pada daerah tersebut yang ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar tersebut merupakan nilai spektral percepatan di permukaan dari gempa *risk-targeted maximum considered earthquake* dengan probabilitas keruntuhan bangunan 1% dalam 50 tahun.



Gambar 5. Spektrum Respon Gempa di Wilayah Sekitar Kota Balikpapan (Kemen PUPR, 2011)

Dengan asumsi bahwa tanah di lokasi pemasangan menara berada sekitar pantai, maka digunakan kurva spektrum pada tanah lunak (E). Dengan kurva ini, jika periode getar alami menara berada pada 0,103 detik – 0,566 detik, maka menara akan menerima percepatan gempa desain sebesar 0,338 g, dengan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/detik²). Nilai-nilai lain dalam spektrum ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Nilai Variabel Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Kota Balikpapan (Kemen PUPR, 2011)

Variabel	Nilai
PGA (g)	0,098
S _s (g)	0,203
S ₁ (g)	0,082
C _{RS}	0,930
C _{R1}	1,190
F _{PGA}	2,500
F _A	2,500
F _V	3,500
PSA (g)	0,246
S _{MS} (g)	0,507
S _{M1} (g)	0,287
S _{DS} (g)	0,338

S _{D1} (g)	0,191
T ₀ (detik)	0,113
T _s (detik)	0,566

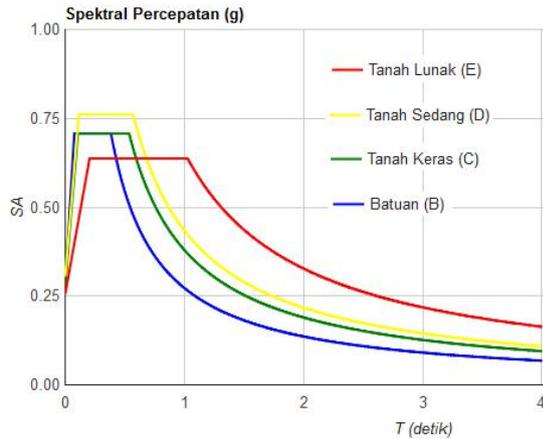
Tabel 2. Nilai Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Kota Balikpapan (Kemen PUPR, 2011)

T (detik)	SA (g)
0	0,135
T ₀	0,338
T _s	0,338
T _s +0	0,287
T _s +0,1	0,250
T _s +0,2	0,221
T _s +0,3	0,198
T _s +0,4	0,179
T _s +0,5	0,164
T _s +0,6	0,151
T _s +0,7	0,140
T _s +0,8	0,130
T _s +0,9	0,122
T _s +1	0,115
T _s +1,1	0,108
T _s +1,2	0,103
T _s +1,3	0,097
T _s +1,4	0,093
T _s +1,5	0,088
T _s +1,6	0,084
T _s +1,7	0,081
T _s +1,8	0,078
T _s +1,9	0,075
T _s +2	0,072
4	0,048

3.1.2. Sekitar Pasowe

Wilayah pantai sekitar Pasowe (sebelah selatan Donggala) di Pulau Sulawesi akan dipilih sebagai lokasi penempatan fasilitas darat Ina-CBT Selat Makassar untuk sisi Sulawesi karena sudah memiliki fasilitas kelistrikan dan telekomunikasi yang baik.

Sama dengan metode pada sub-bab 3.1.1, maka diperoleh spektrum respon gempa pada pantai sekitar Pasowe yang ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar tersebut merupakan nilai spektral percepatan di permukaan dari gempa *risk-targeted maximum considered earthquake* dengan probabilitas keruntuhan bangunan 1% dalam 50 tahun.



Gambar 6. Spektrum Respon Gempa di Wilayah Sekitar Pasowe di Sulawesi (Kemen PUPR, 2011)

Dengan asumsi bahwa tanah di lokasi pemasangan menara berada sekitar pantai, maka digunakan kurva spektrum pada tanah lunak (E). Dengan kurva ini, jika periode getar alami menara berada pada 0,205 detik – 1,027 detik, maka menara akan menerima percepatan gempa desain sebesar 0,637 g, dengan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/detik²). Nilai-nilai lain dalam spektrum ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Nilai Variabel Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Pasowe (Kemen PUPR, 2011)

Variabel	Nilai
PGA (g)	0,439
S _s (g)	1,061
S ₁ (g)	0,409
C _{RS}	1,099
C _{R1}	1,286
F _{PGA}	0,900
F _A	0,900
F _V	2,400
PSA (g)	0,395
S _{MS} (g)	0,955
S _{M1} (g)	0,981
S _{DS} (g)	0,637
S _{D1} (g)	0,654
T ₀ (detik)	0,205
T _s (detik)	1,027

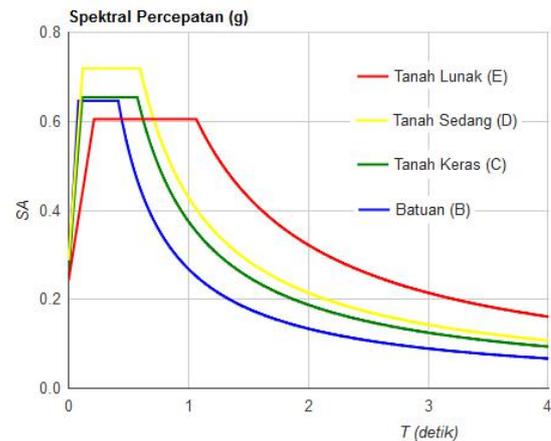
Tabel 4. Nilai Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Pasowe (Kemen PUPR, 2011)

T (detik)	SA (g)
0	0,255
T ₀	0,637
T _s	0,637
T _s +0	0,580
T _s +0,1	0,533
T _s +0,2	0,493
T _s +0,3	0,458
T _s +0,4	0,428
T _s +0,5	0,402

T _s +0,6	0,379
T _s +0,7	0,358
T _s +0,8	0,339
T _s +0,9	0,323
T _s +1	0,307
T _s +1,1	0,294
T _s +1,2	0,281
T _s +1,3	0,269
T _s +1,4	0,259
T _s +1,5	0,249
T _s +1,6	0,240
T _s +1,7	0,231
T _s +1,8	0,223
T _s +1,9	0,216
T _s +2	0,209
4	0,163

3.1.3. Sekitar Labuan Bajo

Wilayah pantai sekitar Labuan Bajo di Pulau Flores akan dipilih sebagai lokasi penempatan fasilitas darat Ina-CBT Labuan Bajo karena sudah memiliki fasilitas kelistrikan dan telekomunikasi yang baik. Sama dengan metode pada sub-bab 3.1.1, maka diperoleh Spektrum Respon Gempa pada pantai Labuan Bajo yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Spektrum Respon Gempa di Wilayah Pantai Labuan Bajo (Kemen PUPR, 2011)

Dengan asumsi bahwa tanah di lokasi pemasangan menara berada sekitar pantai, maka digunakan kurva spektrum pada tanah lunak (E). Dengan kurva ini, jika periode getar alami menara berada pada 0,213 detik – 1,064 detik, maka menara akan menerima percepatan gempa desain sebesar 0,605 g, dengan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/detik²). Nilai-nilai lain dalam spektrum ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Nilai Variabel Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Labuan Bajo (Kemen PUPR, 2011)

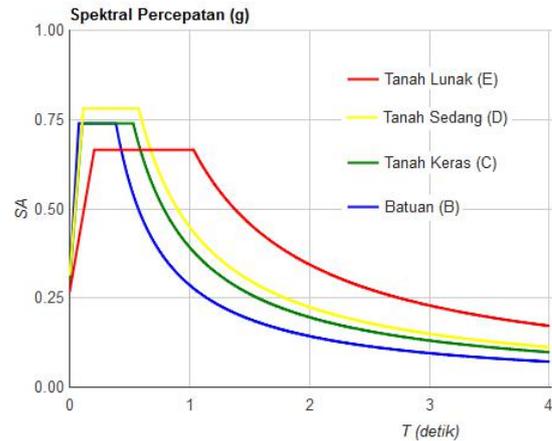
Variabel	Nilai
PGA (g)	0,447
S _s (g)	0,969
S ₁ (g)	0,403
C _{RS}	1,063
C _{R1}	0,969
F _{PGA}	0,900
F _A	0,937
F _V	2,400
PSA (g)	0,402
S _{MS} (g)	0,908
S _{M1} (g)	0,967
S _{DS} (g)	0,605
S _{D1} (g)	0,644
T ₀ (detik)	0,213
T _s (detik)	1,064

Tabel 6. Nilai Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Labuan Bajo (Kemen PUPR, 2011)

T (detik)	SA (g)
0	0,242
T ₀	0,605
T _s	0,605
T _s +0	0,553
T _s +0,1	0,510
T _s +0,2	0,472
T _s +0,3	0,440
T _s +0,4	0,412
T _s +0,5	0,387
T _s +0,6	0,365
T _s +0,7	0,346
T _s +0,8	0,328
T _s +0,9	0,312
T _s +1	0,298
T _s +1,1	0,285
T _s +1,2	0,273
T _s +1,3	0,261
T _s +1,4	0,251
T _s +1,5	0,242
T _s +1,6	0,233
T _s +1,7	0,225
T _s +1,8	0,217
T _s +1,9	0,210
T _s +2	0,204
4	0,161

3.1.3. Sekitar PLTU Ropa

Wilayah pantai sekitar PLTU Ropa di Pulau Flores akan dipilih sebagai lokasi penempatan fasilitas darat Ina-CBT Gunung Rokatenda karena sudah memiliki fasilitas kelistrikan dan telekomunikasi yang baik. Sama dengan metode pada sub-bab 3.1.1, maka diperoleh Spektrum Respon Gempa pada pantai sekitar PLTU Ropa yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Spektrum Respon Gempa di Wilayah Pantai PLTU Ropa (Kemen PUPR, 2011)

Dengan asumsi bahwa tanah di lokasi pemasangan menara berada sekitar pantai, maka digunakan kurva spektrum pada tanah lunak (E). Dengan kurva ini, jika periode getar alami menara berada pada 0,206 detik – 1,032 detik, maka menara akan menerima percepatan gempa desain sebesar 0,665 g, dengan g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/detik²). Nilai-nilai lain dalam spektrum ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Nilai Variabel Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Sekitar PLTU Ropa (Kemen PUPR, 2011)

Variabel	Nilai
PGA (g)	0,479
S _s (g)	1,109
S ₁ (g)	0,429
C _{RS}	1,097
C _{R1}	0,992
F _{PGA}	0,900
F _A	0,900
F _V	2,400
PSA (g)	0,431
S _{MS} (g)	0,998
S _{M1} (g)	1,030
S _{DS} (g)	0,665
S _{D1} (g)	0,687
T ₀ (detik)	0,206
T _s (detik)	1,032

Tabel 8. Nilai Spektrum Respon untuk Jenis Tanah Lunak (E) Lokasi: Sekitar PLTU Ropa (Kemen PUPR, 2011)

T (detik)	SA (g)
0	0,266
T ₀	0,665
T _s	0,665
T _s +0	0,607
T _s +0,1	0,557
T _s +0,2	0,515
T _s +0,3	0,480

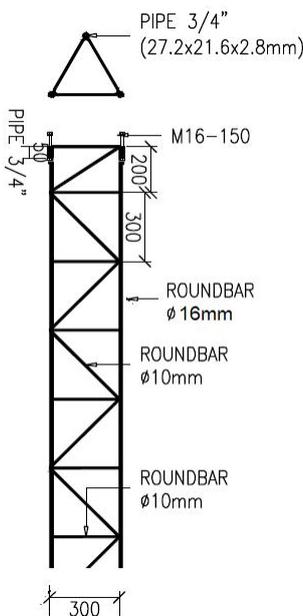
T _S +0,4	0,448
T _S +0,5	0,421
T _S +0,6	0,396
T _S +0,7	0,375
T _S +0,8	0,355
T _S +0,9	0,338
T _S +1	0,322
T _S +1,1	0,308
T _S +1,2	0,294
T _S +1,3	0,282
T _S +1,4	0,271
T _S +1,5	0,261
T _S +1,6	0,251
T _S +1,7	0,242
T _S +1,8	0,234
T _S +1,9	0,226
T _S +2	0,219
4	0,172

3.2. Dimensi Menara

3.2.1. Menara Segitiga

Menara segitiga terdiri dari bagian inti yang merupakan rangka segitiga. Bagian inti terdiri dari bar luar dan bar dalam (Duta Rimba Teknik, 2020a). Bar luar dan dalam terbuat dari baja BjTP 24 dengan kuat tarik sebesar 380 MPa dan batas ulur 235 MPa (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Gambar bagian inti dari menara segitiga ditunjukkan pada Gambar 9, dengan dimensi:

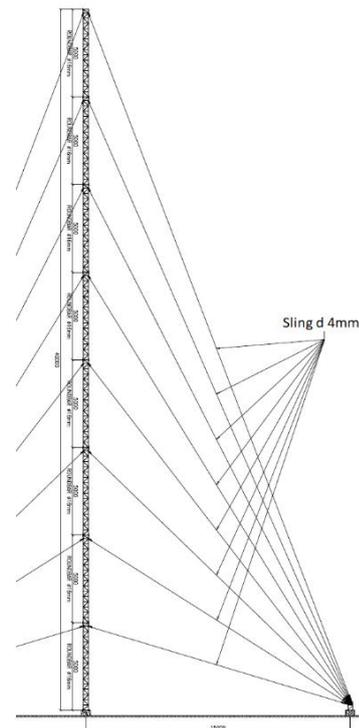
- Diameter bar luar 16 mm ($A=201\text{mm}^2$) sehingga $Ft = 80400\text{ N}$
- Diameter bar dalam 10 mm ($A=78\text{mm}^2$) sehingga $Ft = 31200\text{ N}$
- Lebar segitiga 300 mm
- Tinggi segmen kecil segitiga 300 mm



Gambar 9. Bagian Inti dari Menara Segitiga dengan Ketinggian 40 m

Menara segitiga juga terdiri dari bagian penambat berupa beberapa kabel sling yang menambat bagian inti pada 3 sisi. Kabel sling merupakan baja mutu tinggi dengan kuat tarik sebesar 1200 MPa. Gambar dari keseluruhan menara segitiga ditunjukkan pada Gambar 10. Dimensi terdiri dari:

- Diameter Sling Penambat 4 mm ($A=12\text{mm}^2$) sehingga $Ft = 14400\text{ N}$
- Jumlah Sling Penambat 8 x 3 sisi
- Jarak Terjauh Sling 15 m
- Sling diikat ke menara setiap 5 m
- Tinggi keseluruhan menara 40 m

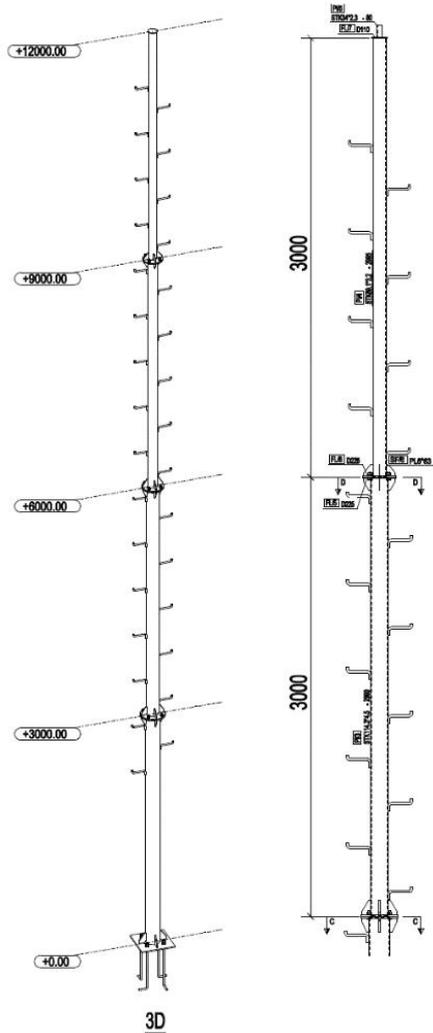


Gambar 10. Gambar Menara Segitiga dengan Ketinggian 40 m

3.2.2. Menara Tunggal

Menara tunggal hanya terdiri dari bagian inti yang merupakan tabung silinder (Duta Rimba Teknik, 2020b). Material yang digunakan adalah baja Grade A dengan kuat tarik 310 MPa dan batas ulur 230 MPa (ASTM International, 2015). Gambar dari bagian ini ditunjukkan pada Gambar 11, dengan dimensi:

- Silinder 1 (terbawah): STK 165,2x4,5-2988 mm ($A = 2271\text{ mm}^2$) ($I = 7335677\text{ mm}^4$)
 - Silinder 2: STK 139,8x4,5-2989 mm ($A = 1912\text{ mm}^2$) ($I = 4379512\text{ mm}^4$)
 - Silinder 3: STK 114,3x4,5-2990 mm ($A = 1551\text{ mm}^2$) ($I = 2342006\text{ mm}^4$)
 - Silinder 4 (teratas): STK 89,1x3,2-2995 mm ($A = 863\text{ mm}^2$) ($I = 797208\text{ mm}^4$)
- Tinggi menara 12 m (3m x 4 segmen)



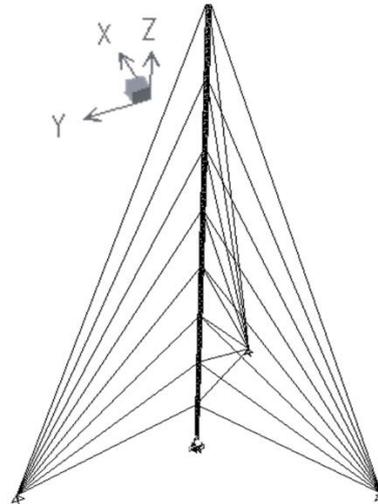
Gambar 11. Menara Tunggal dengan Ketinggian 12 m

3.3. Analisis Struktur

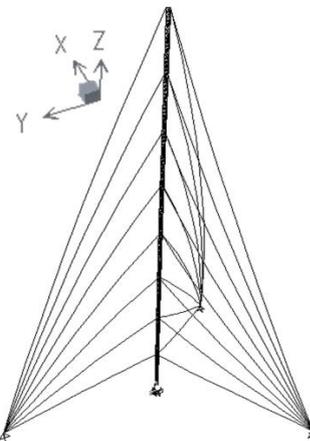
3.3.1. Menara Segitiga

Berdasarkan data dimensi dan material pada sub-bab 3.2.1 maka dibuat model struktur menara segitiga pada perangkat lunak Program Analisa Struktur (*Computers and Structures, Inc.*, 2014). Gambar 12 menunjukkan model struktur menara segitiga di atas.

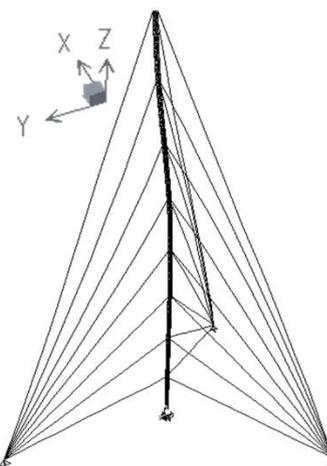
Dari hasil analisis ragam getar, tampak bahwa waktu getar alami struktur masuk kategori frekuensi rendah (antara 0,2 – 1,0 detik). Struktur dengan frekuensi alami rendah, berpotensi teresonansi oleh getaran gempa di daerah berkategori tanah lunak (E), yaitu di lokasi kajian.



Gambar 12. Model Menara Segitiga dengan Ketinggian 40 m

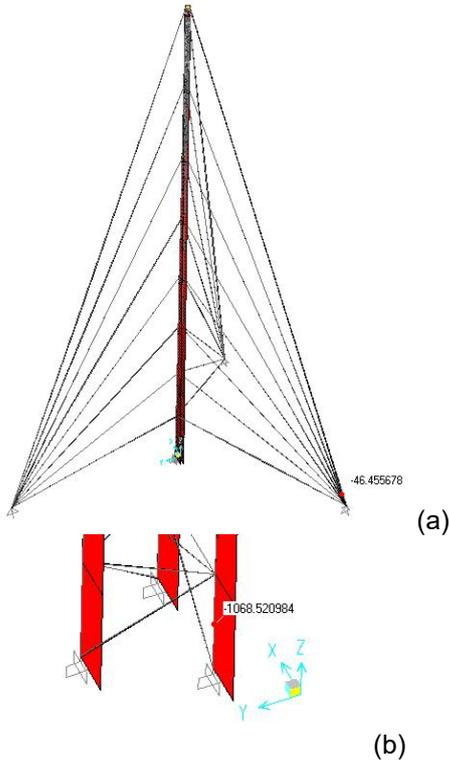


Gambar 13. Ragam Getar ke-1 dengan $T = 0,372$ detik Model Menara Segitiga

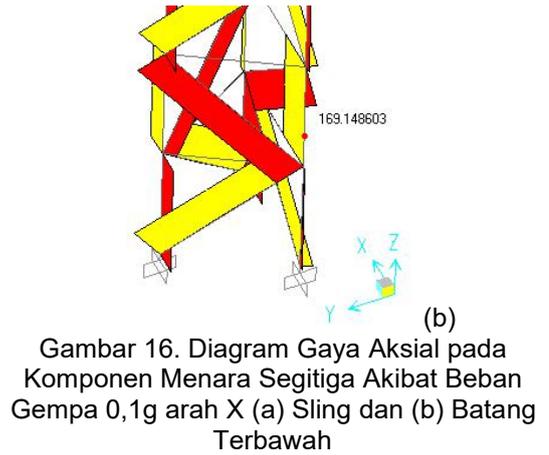
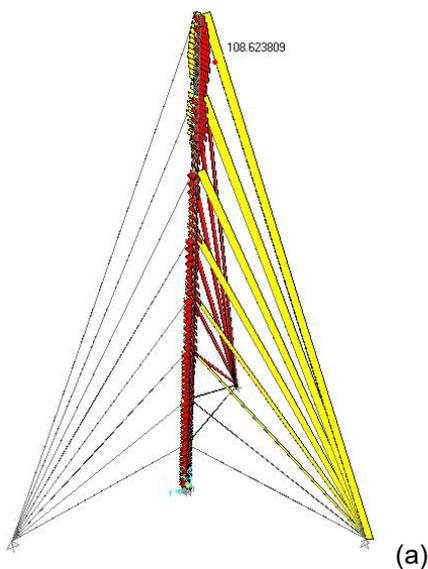


Gambar 14. Ragam Getar ke-3 dengan $T = 0,258$ detik Model Menara Segitiga

Analisis struktur selanjutnya adalah melihat pengaruh berat sendiri terhadap gaya yang terjadi pada komponen menara segitiga. Berdasarkan hasil analisis, kabel sling mengalami gaya tekan sebesar 46 Newton, sedangkan komponen batang vertikal di posisi paling bawah mengalami gaya tekan sebesar 1068 Newton.

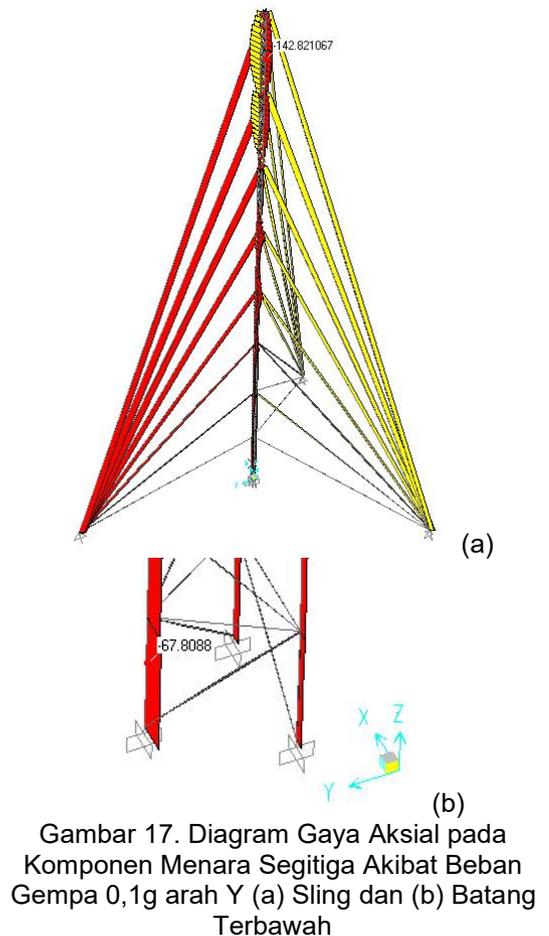


Gambar 15. Diagram Gaya Aksial pada Komponen Menara Segitiga Akibat Berat Sendiri (a) Sling dan (b) Batang Terbawah



Gambar 16. Diagram Gaya Aksial pada Komponen Menara Segitiga Akibat Beban Gempa 0,1g arah X (a) Sling dan (b) Batang Terbawah

Analisis struktur dilanjutkan dengan memberikan beban gempa arah X dan Y dengan koefisien gempa sebesar masing-masing 0,1g ($g=9,81 \text{ m/detik}^2$). Hasil analisis untuk gempa arah X dapat dilihat pada Gambar 16. Berdasarkan hasil analisis, kabel sling mengalami gaya tarik sebesar 108 Newton, sedangkan komponen batang vertikal di posisi bawah mengalami tarik sebesar 169 Newton dan posisi atas mengalami tekan sebesar 262 Newton.



Hasil analisis untuk gempa arah Y dapat dilihat pada Gambar 17. Berdasarkan hasil analisis, kabel sling kedua dari atas mengalami gaya tarik sebesar 62 Newton, sedangkan komponen batang vertikal di posisi bawah mengalami tekan sebesar 67 Newton dan posisi atas mengalami tarik sebesar 254 Newton.

Tabel 9. Tegangan pada Struktur akibat Gempa Arah X Sebesar 0,1g

Komponen	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Gaya Akibat Gempa (N)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
B1608	1070	5,40	171	0,86	7,35
B1605	602	3,04	188	0,95	4,60
B1602	207	1,05	278	1,40	2,66
B1008	16	0,21	132	1,69	1,94
B1005	10	0,13	113	1,45	1,60
B1002	5	0,06	49	0,63	0,71
S08	6,27	0,51	18	1,45	2,06
S06	21	1,69	65	5,24	7,27
S04	34	2,74	118	9,52	12,81
S02	47	3,79	108	8,71	13,26

Tabel 10. Tegangan pada Struktur akibat Gempa Arah Y Sebesar 0,1g

Komponen	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Gaya Akibat Gempa (N)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
B1608	1070	5,40	67	0,34	6,82
B1605	602	3,04	89	0,45	4,10
B1602	207	1,05	174	0,88	2,13
B1008	16	0,21	2,3	0,03	0,28
B1005	10	0,13	6	0,08	0,23
B1002	5	0,06	12	0,15	0,23
S08	6,27	0,51	14	1,13	1,74
S06	21	1,69	26	2,10	4,13
S04	34	2,74	68	5,48	8,77
S02	47	3,79	93	7,50	12,05

Tabel 9 dan 10 menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi akibat percepatan gempa respon sebesar 0,1g. Distribusi percepatan gempa pada struktur mengikuti standar SNI 1726 2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012), dan kombinasi pembebanan mengikuti standar yang sama.

Seperti ditunjukkan pada sub-bab 3.1 (Spektrum Respon Gempa), maka ada empat macam spektrum di keempat lokasi. Dengan

waktu getar alami ke-1 menara segitiga adalah $T = 0,372$ detik, maka percepatan respon yang akan dialami menara ini ditunjukkan pada Tabel 11. Dari keempat lokasi, maka tiga lokasi (sekitar Pasowe (Sulawesi), Labuan Bajo, dan sekitar PLTU Ropa) mempunyai nilai percepatan respon tinggi, yaitu antara 0,6g – 0,7g. Selanjutnya menara segitiga ini dianalisis terhadap gempa dengan percepatan respon sebesar 0,7g. Hasil ditunjukkan pada tabel 12 dan 13. Berdasarkan standar SNI 1729 2015 (Badan Standardisasi Nasional, 2015), faktor keamanan untuk tekan dan lentur adalah 1,67. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi pada batang vertikal dan diagonal (12,53 MPa dan 12,09 MPa) masih di bawah tegangan ijin dari kuat tarik baja BJTP24 yaitu $235 / 1,67 = 140$ MPa (N/mm²).

Sesuai dengan SNI 0076:2008 (Badan Standardisasi Nasional, 2008), maka baja sling mutu E mempunyai kuat tarik minimum sebesar 1320 MPa. Sedangkan tegangan tarik yang terjadi adalah antara 57 – 69 MPa, masih di bawah 1320 MPa tersebut.

Tabel 11. Nilai Percepatan Respon Menara Segitiga di Empat Lokasi

Waktu Getar T (detik)	Lokasi	Percepatan Spektrum Respon Tanah Lunak (E) (g)
0,372	Sekitar Balikpapan	0,338
0,372	Sekitar Pasowe	0,637
0,372	Labuan Bajo	0,605
0,372	Sekitar PLTU Ropa	0,665

Tabel 12. Tegangan pada Struktur akibat Gempa Arah X Sebesar 0,7g

Komponen	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Gaya Akibat Gempa (N)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
B1608	1070	5,40	1197	6,05	12,53
B1605	602	3,04	1316	6,65	10,29
B1602	207	1,05	1946	9,83	11,08
B1008	16	0,21	924	11,85	12,09
B1005	10	0,13	791	10,14	10,29
B1002	5	0,06	343	4,40	4,47
S08	6,27	0,51	126	10,16	10,77
S06	21	1,69	455	36,69	38,73
S04	34	2,74	826	66,61	69,90
S02	47	3,79	756	60,97	65,52

Tabel 13. Tegangan pada Struktur akibat Gempa Arah Y Sebesar 0,7g

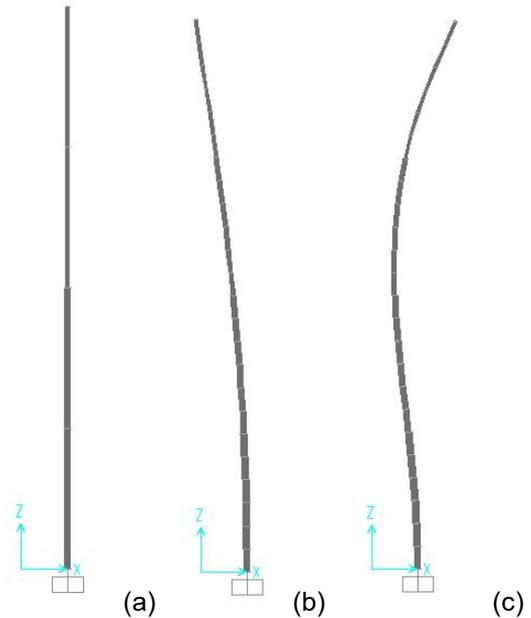
Komponen	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Gaya Akibat Gempa (N)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
B1608	1070	5,40	469	2,37	8,85
B1605	602	3,04	623	3,15	6,79
B1602	207	1,05	1218	6,15	7,41
B1008	16	0,21	16,1	0,21	0,45
B1005	10	0,13	42	0,54	0,69
B1002	5	0,06	84	1,08	1,15
S08	6,27	0,51	98	7,90	8,51
S06	21	1,69	182	14,68	16,71
S04	34	2,74	476	38,39	41,68
S02	47	3,79	651	52,50	57,05

Rekomendasi yang dapat disampaikan sehubungan dengan hasil di atas adalah:

- Menara tunggal dengan ketinggian 42 meter dengan dimensi seperti di atas dapat dipasang di keempat lokasi.
- Untuk menara tunggal dengan dimensi lain, misalnya harus lebih tinggi, atau berada di lokasi lain, maka perlu analisis lebih lanjut.
- Kuat pondasi harus disesuaikan dengan hasil di atas. Pondasi harus mampu menahan gaya berat sebesar 1761 kN (176 ton) dan harus mampu menahan momen sebesar 9478 kN.mm (9,478 kN.m). Jika tidak, maka kerusakan bisa terjadi pada pondasinya.
- Material menara yang digunakan harus mampu menahan serangan fisik dan kimiawi lingkungan sekitarnya untuk selama masa layan Ina-CBT ini.

3.3.2. Menara Tunggal

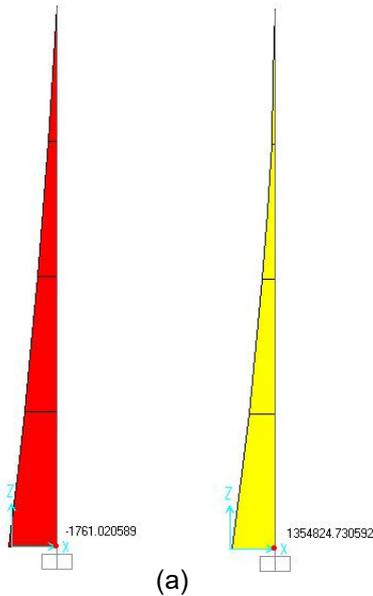
Berdasarkan data dimensi dan material pada sub-bab 3.2.2 maka dibuat model struktur menara tunggal pada perangkat lunak Program Analisa Struktur (*Computers and Structures, Inc.*, 2014). Gambar 18 menunjukkan model struktur menara tunggal tersebut.



Gambar 18. (a) Model Menara Tunggal dengan Ketinggian 12 m (b) Ragam Getar ke-1 dengan $T = 0,845$ dan (c) Ragam Getar ke-3 dan $T = 0,206$ detik (Hasil Analisis dalam Perangkat Lunak)

Dari hasil analisis ragam getar di atas, tampak bahwa waktu getar alami struktur masuk kategori frekuensi rendah (antara 0,2 – 1,0 detik). Struktur dengan frekuensi alami rendah, berpotensi teresonansi oleh getaran gempa di daerah berkategori tanah lunak (E), yaitu di lokasi kajian.

Analisis struktur selanjutnya adalah melihat pengaruh berat sendiri terhadap gaya yang terjadi pada komponen menara segitiga. Diagram gaya aksial akibat berat sendiri ditunjukkan pada Gambar 19(a). Berdasarkan hasil analisis, komponen batang pipa di posisi paling bawah mengalami gaya tekan sebesar 1761 Newton. Analisis struktur dilanjutkan dengan memberikan beban gempa arah X saja (karena simetris dengan arah Y) dengan koefisien gempa sebesar 0,1g ($g=9,81$ m/detik²). Hasil analisis untuk gempa arah X dapat dilihat pada Gambar 19(b). Berdasarkan hasil analisis, komponen batang pipa di posisi paling bawah mengalami momen sebesar 1354824 Newton.mm (1,354 kN.m).



Gambar 19. (a) Diagram Gaya Aksial Akibat Berat Sendiri dan (b) Diagram Momen Akibat Gempa arah X pada Batang Menara Tunggal

Tabel 14. Tegangan pada Struktur akibat Gempa Arah X Sebesar 0,1g (Hasil Analisis dalam Perangkat Lunak)

Pipa	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Momen Gempa (kN.mm)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
1	1761	0,78	1354	15,25	16,18
2	1183	0,62	826	13,18	13,93
3	698	0,45	389	9,49	10,03
4	303	0,35	104	5,81	6,23

Tabel 14 menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi akibat percepatan gempa respon sebesar 0,1g. Distribusi percepatan gempa pada struktur mengikuti standar SNI 1726 2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012), dan kombinasi pembebanan mengikuti standar yang sama.

Seperti ditunjukkan pada sub-bab 3.1 (Spektrum Respon Gempa), maka ada empat macam spektrum di keempat lokasi. Dengan waktu getar alami ke-1 menara tunggal adalah $T = 0,845$ detik, maka percepatan respon yang akan dialami menara ini ditunjukkan pada Tabel 15. Dari keempat lokasi, maka tiga lokasi mempunyai nilai percepatan respon tinggi, yaitu antara 0,6g – 0,7g. Selanjutnya menara tunggal ini dianalisis terhadap gempa dengan percepatan respon sebesar 0,7g. Hasil ditunjukkan pada Tabel 16. Berdasarkan standar SNI 1729 2015 (Badan Standardisasi Nasional, 2015), faktor keamanan untuk tekan dan lentur adalah 1,67. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi pada pipa/tabung

menara (107,65 MPa) masih di bawah tegangan izin dari kuat tarik baja BJTP24 yaitu $235 / 1,67 = 140$ MPa (N/mm²).

Tabel 15. Nilai Percepatan Respon Menara Tunggal di Empat Lokasi

Waktu Getar T (detik)	Lokasi	Percepatan Spektrum Respon Tanah Lunak (E) (g)
0,845	Sekitar Balikpapan	0,338
0,845	Sekitar Pasowe	0,637
0,845	Labuan Bajo	0,605
0,845	Sekitar PLTU Ropa	0,665

Tabel 16. Tegangan pada Komponen Struktur akibat Gempa Arah X Sebesar 0,7g

Pipa	Gaya Berat (N)	Tegangan (N/mm ²)	Momen Gempa (kN.mm)	Tegangan (N/mm ²)	Tegangan Total (N/mm ²)
1	1761	0,78	9478	106,72	107,65
2	1183	0,62	5782	92,28	93,03
3	698	0,45	2723	66,45	66,99
4	303	0,35	728	40,68	41,10

Rekomendasi yang dapat disampaikan sehubungan dengan hasil di atas adalah:

- Menara tunggal dengan ketinggian 12 meter dengan dimensi seperti di atas dapat dipasang di keempat lokasi.
- Untuk menara tunggal dengan dimensi lain, misalnya harus lebih tinggi, atau berada di lokasi lain, maka perlu analisis lebih lanjut.
- Kuat pondasi harus disesuaikan dengan hasil di atas. Pondasi harus mampu menahan gaya berat sebesar 1761 kN (176 ton) dan harus mampu menahan momen sebesar 9478 kN.m (9,478 kN.m). Jika tidak, maka kerusakan bisa terjadi pada pondasinya.
- Material menara yang digunakan harus mampu menahan serangan fisik dan kimiawi lingkungan sekitarnya untuk selama masa layan Ina-CBT ini.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil kajian:

- Kajian kerentanan gempabumi telah dilakukan terhadap fasilitas darat Ina-CBT berupa menara segitiga dan menara tunggal pada empat calon lokasi: sekitar Kota Balikpapan, sekitar Pasowe (Sulawesi), Labuan Bajo, dan sekitar PLTU Ropa.
- Keempat calon lokasi mempunyai tingkat ancaman gempa sedang (sekitar Kota Balikpapan) sampai dengan tinggi (sekitar Pasowe (Sulawesi), Labuan Bajo, dan sekitar PLTU Ropa). Tingkat sedang ditunjukkan dengan percepatan *response* sebesar 0,338g dan tingkat tinggi ditunjukkan dengan 0,665g.
- Hasil kajian terhadap menara segitiga dan menara tunggal menunjukkan bahwa menara-menara tersebut mampu menahan percepatan respon gempa sampai dengan 0,7g.

Rekomendasi dari hasil kajian:

- Kuat pondasi harus disesuaikan dengan hasil di atas. Pondasi harus mampu menahan gaya aksial dan momen (untuk menara tunggal). Jika kekuatan pondasi tidak terpenuhi, maka kegagalan akan terjadi pada pondasi.
- Material menara yang digunakan harus mampu menahan serangan fisik dan kimiawi lingkungan sekitarnya selama masa layan Ina-CBT ini.
- Menara-menara dengan dimensi selain di atas dan ditempatkan di lokasi lain, maka harus dianalisis lagi lebih lanjut.

PERSANTUNAN

Kegiatan ini didanai dari DIPA PTRRB 2020 yaitu Inovasi Sistem dan Teknologi Indonesia *Tsunami Early Warning System* (Ina-TEWS). Kegiatan kajian kerentanan fasilitas Ina-CBT di darat merupakan bagian dari *Desk Top Study* yang dilakukan di awal kegiatan. Ucapan terima kasih disampaikan kepada rekan-rekan di PTRRB dan B2TKS yang membantu dalam perolehan data sekunder menara dan fasilitas lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM International. 2015. A500/A500M – 13 Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel

Structural Tubing in Rounds and Shapes. 6p.

Badan Standardisasi Nasional. 2002. SNI 07-2052:2002 Baja Tulangan Beton. 15p.

Badan Standardisasi Nasional. 2008. SNI 0076:2008 Tali Kawat Baja, 24p.

Badan Standardisasi Nasional. 2012. SNI 1726:2012 Tatacara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. 196p.

Badan Standardisasi Nasional. 2015. SNI 1155:2011 Kawat Baja Tanpa Lapisan untuk Konstruksi Beton Pratekan, 10p.

Badan Standardisasi Nasional. 2015. SNI 1729:2015 Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. 290p.

Computers and Structures, Inc. 2014. SAP2000 Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, Advanced 14.0.0.

Duta Rimba Teknik. 2020a. Drawing Guyed 40 Meter [terhubung berkala] <http://www.cvdutarimba.com/search/label/GUYED%2040%20M?m=0> [16 Maret 2020]