

EVALUASI SIMPANGAN HORIZONTAL PILAR JEMBATAN BETON BERTULANG

Yufrizal Efendi¹⁾, Ade Faisal^{2,3)}, Daniel Rumbi Teruna²⁾

¹⁾Alumni Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara

²⁾Staf Pengajar Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara

³⁾Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Abstrak

Indonesia merupakan salah satu negara yang tergolong rawan gempa. Gempa dapat menyebabkan kerusakan struktur jembatan beton bertulang. Efek gempa ini mengharuskan jembatan memiliki pilar yang kuat untuk menahan pembebanan dan mampu memberikan masa layan mengikuti peraturan yang berlaku. Studi ini bertujuan untuk mengetahui simpangan horizontal dan daktilitas simpangan pilar jembatan beton bertulang yang terletak di tanah lunak dan wilayah gempa 4 untuk berbagai asumsi pemodelan struktur. Asumsi pemodelan dibedakan dengan kondisi pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dan dengan interaksi pondasi memakai elemen pegas berdasarkan FEMA 356 dan FEMA 440. Analisa struktur yang digunakan adalah analisa statik tidak linier (*Pushover analysis*). Hasil studi menunjukkan bahwa simpangan horizontal dan daktilitas simpangan terbesar terjadi pada pilar jembatan interaksi dengan pondasi (hubungan antara pile cap dan pangkal tiang pancang dianggap rigid, sedangkan ujung tiang pancang dianggap sendi) berdasarkan FEMA 356. Sedangkan simpangan horizontal dan daktilitas simpangan terkecil terjadi pada pilar jembatan tanpa interaksi pondasi (dasar pile cap dianggap jepit) berdasarkan FEMA 440. Secara keseluruhan daktilitas simpangan pilar jembatan yang diperoleh menunjukkan pada kondisi yang aman.

Kata Kunci: Pilar jembatan, pembebanan, simpangan horizontal, daktilitas simpangan.

1. Pendahuluan

Kepulauan Indonesia pada umumnya merupakan wilayah yang tak luput dari bahaya gempa. Resiko gempa sulit untuk dihindari tetapi tentu saja dapat diminimalkan seperti halnya yang terjadi pada struktur-struktur bangunan, misalnya jembatan. Salah satu struktur bagian bawah jembatan yang terpenting adalah pilar. Menurut *American Concrete Institute* (1995), pilar jembatan merupakan bagian bangunan bawah jembatan (*substructure*) yang terletak di tengah-tengah antara abutmen, dimana secara umum berfungsi untuk meneruskan beban vertikal dan horizontal ke pondasi. Hubungan antara bangunan atas dengan pilar jembatan dapat dicor monolit. Bangunan atas jembatan akan menjadi menerus yang disokong oleh beberapa buah pilar jembatan sesuai dengan panjang jembatan. Sehingga struktur berbentuk portal, dimana pilar akan menahan rotasi bangunan atas jembatan yang merupakan hasil dari momen induksi oleh aksi portal.

Pemodelan struktur pilar jembatan dapat dibuat secara sederhana (praktis) ataupun kompleks, tergantung seberapa lengkap informasi dan kemampuan yang dimiliki oleh perencana. Pemodelan secara praktis umumnya menganggap perletakan pilar jembatan sebagai jepit, sedangkan pemodelan yang kompleks menganggap ada pengaruh interaksi antara pondasi dan tanah. Akibatnya deformasi hasil yang akan diperoleh nantinya akan berbeda juga. Memahami deformasi hasil dari berbagai pemodelan ini adalah penting. Sayangnya informasi tentang hal ini belumlah tersedia, khususnya untuk kondisi di Indonesia. Studi ini bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan simpangan horizontal dan daktilitas simpangan pada pilar jembatan beton bertulang yang terletak di tanah lunak untuk wilayah gempa 4 akibat berbagai variasi pemodelan.

2. Metodologi

2.1 Konstanta Pegas

Menurut SNI 2833:2008, koefisien reaksi tanah dasar (*subgrade*) dapat ditentukan dengan menggunakan data N-SPT dari hasil pengujian tanah di lapangan. Dalam penelitian ini konstanta pegas untuk perhitungan interaksi pondasi tiang yang ditinjau dibatasi pada konstanta pegas tanah dalam arah y, konstanta pegas aksial tiang dalam arah z, dan konstanta pegas rotasi pondasi keliling sumbu x.

2.2 Pemodelan Sendi Plastis dan Elemen Pilar

2.2.1 Momen-kurvatur kolom

Studi ini memakai hubungan momen-kurvatur untuk mendefinisikan sendi plastis pada elemen pilar jembatan berdasarkan persamaan yang telah dimodifikasi oleh Valles *et al.* (1996).

2.2.2 Sendi plastis

Studi ini menggunakan pemodelan satu buah pilar kantilever, dimana diasumsikan pilar jembatan dalam bentuk jepit-bebas. Gaya lateral (gempa) bekerja pada pusat titik berat *cap* atas, sehingga sendi plastis dianggap akan terjadi pada bagian bawah pilar. Pemodelan pilar jembatan kantilever mengacu kepada Priestley *et al.* (1996).

2.2.3 Hubungan tegangan-regangan pada beton

Hubungan tegangan-regangan pada beton menggunakan model Mander untuk beton terkekang dan beton tidak terkekang (Mander *et al.*, 1988).

2.2.4 Hubungan tegangan-regangan pada baja

Hubungan tegangan-regangan pada baja menggunakan model King untuk tulangan baja (Montejo dan Kowalsky, 2007).

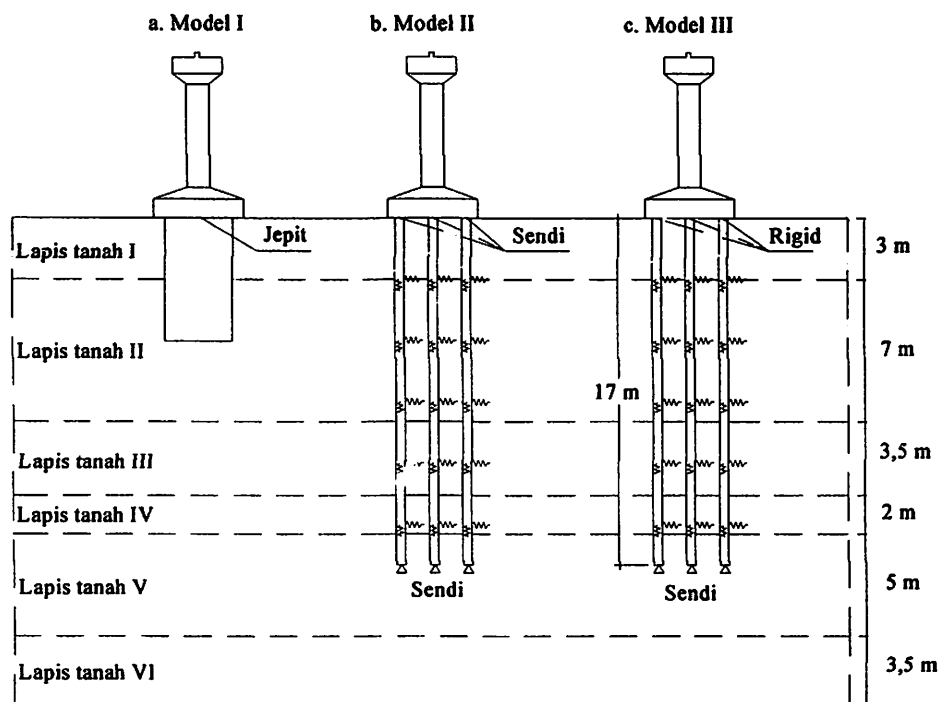
2.2.5 Hubungan momen-rotasi

Menurut Haselton *et al.* (2008), model elemen balok-kolom telah dikembangkan oleh Ibarra *et al.* (2003, 2005), dimana terdapat kurva *backbone* monotonik trilinear dan penggabungan garis-garis dari model. Untuk melengkapi perubahan perilaku siklik akibat gempa pada model maka dalam studi ini dipakai model Haselton.

2.3 Pemodelan Struktur dan Elemen

Pemodelan struktur pilar jembatan menggunakan *software* dengan cara menggambarkan geometri pilar jembatan sebagai langkah awal. Tujuan penggunaan program ini untuk memudahkan perencanaan dalam menganalisa simpangan horizontal terhadap pembebanan pada pilar jembatan. Adapun rencana pemodelan pilar jembatan, pondasi tiang pancang, dan tanah seperti ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu:

1. Terdapat 3 bentuk pemodelan umum tetapi secara detail ada 6 cara analisa yang dilakukan seperti: pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dengan dasar *pile cap* dianggap jepit, pilar jembatan dengan interaksi pondasi dimana antara pangkal tiang pancang dan *pile cap* dianggap sebagai sendi dan ujung tiang pancang juga dianggap sendi, dan pilar jembatan dengan interaksi pondasi dimana antara pangkal tiang pancang dan *pile cap* dianggap sebagai *rigid* dan ujung tiang pancang dianggap sendi. Masing-masing model menggunakan ketentuan FEMA 356 dan FEMA 440 untuk analisa simpangan horizontal.
2. Beban-beban yang bekerja pada jembatan termasuk berat sendiri bagian *superstructure* merupakan beban aksial terpusat pada elemen model dan diasumsikan bekerja pada titik berat *cap*.
3. Letak sendi plastis direncanakan di bagian bawah kolom atau di atas *pile cap*.
4. Beban gempa dianggap dinamik dengan menggunakan analisa spektrum respons.
5. Lapisan tanah setiap kedalaman 3 m dimodelkan sebagai pegas (*spring*).



Gambar 1. Rencana pemodelan pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dan dengan interaksi pondasi

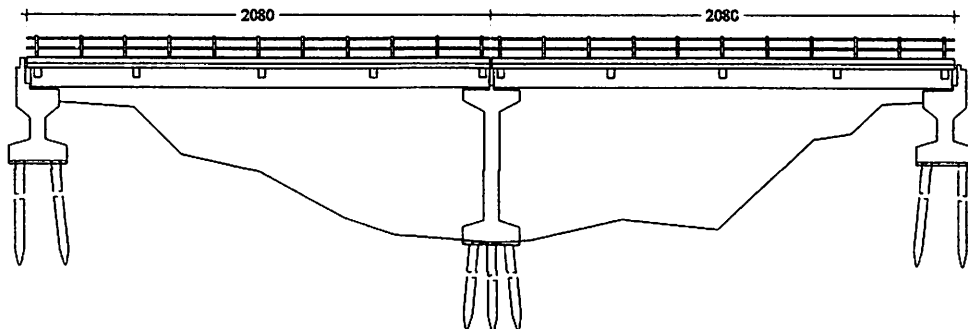
Nilai konstanta pegas tanah yang digunakan untuk perhitungan interaksi pondasi tiang berdasarkan ketentuan dalam SNI 2833:2008 dengan menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) dengan cara pengeboran tanah sampai kedalaman 24 m seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil SPT

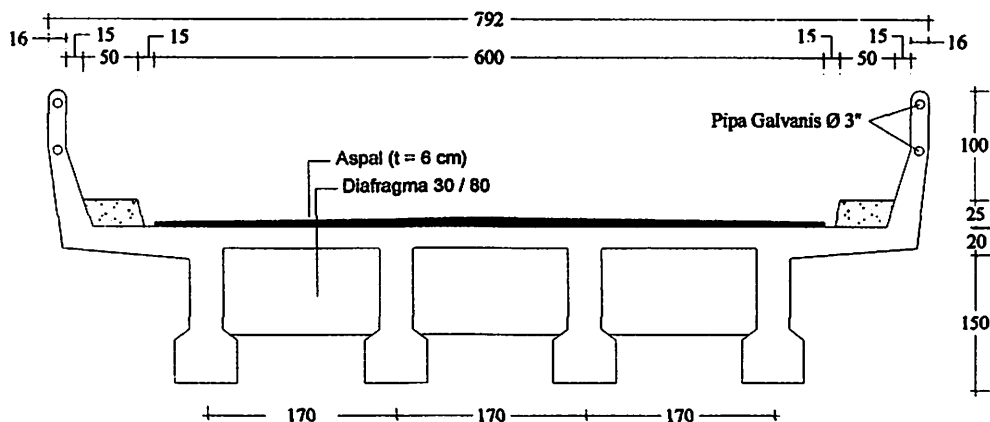
Kedalaman (m)	N-SPT	γ_r (kN/m ³)
3	3	11,768
6	6	12,209
9	8	12,396
12	18	13,651
15	60	18,299
18	60	18,780
21	45	19,221
24	60	19,280

2.3.1 Geometri struktur jembatan

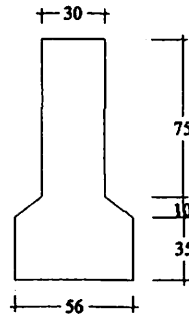
Jembatan secara umum terdiri dari bagian *superstructure* dan *substructure*, dimana pada sebagian jembatan bentang pendek tidak membutuhkan pilar jembatan sebagai *substructure*. Dalam studi ini jembatan yang dijadikan objek adalah jembatan balok T konvensional dengan panjang total 41,60 m. Jembatan ini menggunakan bangunan pilar tunggal di tengah-tengah jembatan. Panjang bentangan adalah simetris yaitu masing-masing 20,80 m dengan tumpuan sendi-rol. Geometri struktur jembatan secara lengkap seperti ditunjukkan pada Gambar 2 sampai dengan Gambar 5.



Gambar 2. Tipikal penampang memanjang jembatan

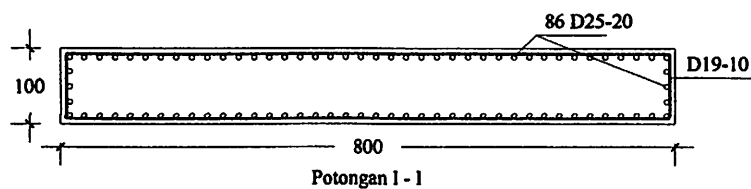
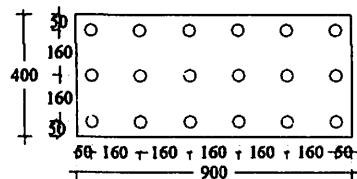
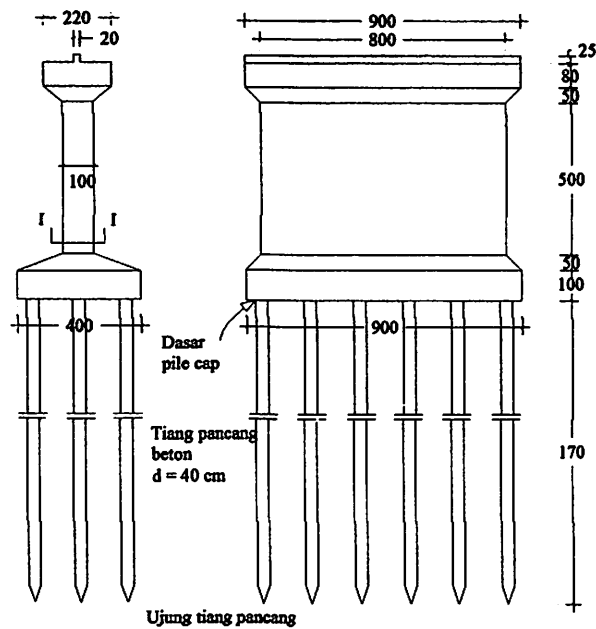


Gambar 3. Tipikal penampang melintang *superstructure* jembatan



Gambar 4. Tipikal penampang melintang balok jembatan

Pilar jembatan dapat digolongkan sebagai pilar dinding (*pier wall*) tunggal dan juga termasuk jenis pilar kantilever karena antara struktur pilar dan balok (*girder*) tidak dicor monolit. Pilar dinding yang terdiri dari kepala pilar (*pier head*), kolom pilar (*pier column*), dan poer (*pile cap*) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pilar dan pondasi tiang pancang jembatan

2.3.2 Properti Material

Properti material yang digunakan di dalam pemodelan pilar jembatan adalah:

1. Trotoar
 - a. Berat jenis beton tidak bertulang: 24 kN/m^3 .
2. Pilar jembatan (*cap*, *column*, dan *pile cap*)
 - a. Mutu beton K250 ($f'_c = 20,75 \text{ MPa}$).
 - b. Modulus elastis beton $E_c = 21409,519 \text{ MPa}$.
 - c. Berat jenis beton bertulang: 25 kN/m^3 .
 - d. Rasio *Poisson* beton: 0,2.
3. Tiang Pancang
 - a. Mutu beton prategang K400 ($f'_c = 33,20 \text{ MPa}$).
 - b. Tebal dinding: 7,5 cm.
 - c. Modulus elastis beton prategang $E_c = 27081,137 \text{ MPa}$.
 - d. Berat jenis beton prategang: 25 kN/m^3 .
4. Material properti untuk baja
 - a. Rasio *Poisson* baja: 0,3.
 - b. Mutu baja tulangan longitudinal dan transversal $f_y = 400 \text{ MPa}$.
 - c. Modulus elastis baja $E_s = 200000 \text{ MPa}$.

2.3.4 Pembebanan

Penentuan beban-beban yang bekerja pada pilar jembatan merupakan tahapan terpenting. Adapun beban-beban tersebut bekerja pada pilar jembatan secara vertikal maupun horizontal. Pembebanan pada model pilar jembatan menggunakan RSNI T-02-2005 sebagai standar pembebanan batas yang merupakan dasar untuk menentukan aksi-aksi pada jembatan jalan raya yang dikelompokkan menurut sumbernya. Adapun aksi-aksi (beban) yang dipergunakan dalam analisa ini adalah:

1. Aksi dan beban tetap
 - a. Berat sendiri struktur (berat komponen jembatan: lantai, trotoar, balok, diafragma, tiang sandaran, *railing*, dan pilar).
 - b. Beban mati tambahan/utilitas (lapisan aspal dan air hujan).
2. Beban lalu lintas
 - a. Beban lajur D, terdiri dari:
 - i. Beban terbagi rata (BTR).
 - ii. Beban garis (BGT).
 - b. Pembebanan untuk pejalan kaki.
3. Aksi lingkungan (pengaruh gempa)

Pengaruh beban gempa horizontal yang bekerja pada pilar jembatan berdasarkan spektrum respons gempa 500 tahunan menurut SNI 03-1726-2002.

2.4 Spektrum Respons Desain

Menurut SNI 03-1726-2002, Indonesia memiliki wilayah yang luas dan terdiri dari pulau-pulau yang memiliki intensitas gempa yang berbeda-beda maka harus dibagi atas 6 zona (wilayah) gempa, dimana wilayah gempa 1 adalah wilayah dengan kegempaan paling rendah dan wilayah gempa 6 dengan kegempaan paling tinggi. Sedangkan jenis tanah dapat ditetapkan sebagai tanah keras, tanah sedang, dan tanah lunak apabila untuk lapisan setebal maksimum 30 m paling atas.

2.5 Analisa Beban Dorong Statik

Analisis beban dorong statik (*static Pushover analysis*) adalah suatu analisis statik nonlinier yang digunakan untuk menghitung respons struktur akibat gempa. Struktur diberi beban statik dalam arah lateral (sebagai representasi gempa rencana). Beban statik pada struktur diberikan secara bertahap sampai terjadi pelelehan pertama, penambahan beban kemudian akan menyebabkan kondisi sendi plastis. Pada kondisi sendi plastis struktur tidak dapat kembali kepada kondisi sebelumnya dan untuk beban yang terus bertambah struktur dapat mengalami keruntuhan (SNI 03-1726-2002).

2.5.1 Waktu getar alami efektif

Waktu getar alami efektif (T_e) diperoleh melalui analisa ragam getar.

2.5.2 Target perpindahan

Target perpindahan adalah kebutuhan perpindahan untuk bangunan pada titik kontrol akibat pengaruh gerakan tanah. Hal ini merupakan parameter yang sangat penting dalam analisis *Pushover* untuk mengetahui kinerja bangunan (Sethy, 2011).

2.5.2.1 Metode koefisien perpindahan (FEMA 356)

Metode koefisien perpindahan merupakan metode utama yang terdapat dalam FEMA 273/356 untuk prosedur statik nonlinier. Perhitungannya melalui modifikasi respons elastis linier dari sistem struktur SDOF ekuivalen menggunakan faktor modifikasi C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 , kemudian diperoleh target perpindahan δ_t (Dewobroto, 2005). Target perpindahan pada titik kontrol δ_t juga dipengaruhi oleh waktu getar alami efektif T_e , percepatan spektra S_a dan gravitasi g , sehingga diperoleh persamaan:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

2.5.2.2 Metode koefisien perpindahan yang diperbaiki (FEMA 440)

Metode koefisien perpindahan FEMA 440 merupakan hasil modifikasi dan perbaikan dari metode koefisien perpindahan FEMA 356. Perbedaan keduanya terdapat pada penentuan target perpindahan yaitu nilai C_1 dan C_2 .

2.6 Daktilitas Simpangan

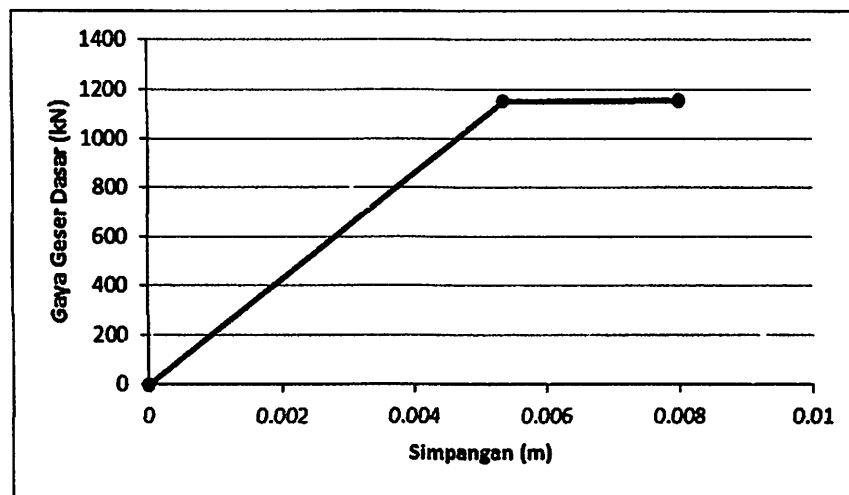
Daktilitas simpangan merupakan nilai yang dihasilkan saat terjadi deformasi pasca-elastis pada elemen. Daktilitas simpangan μ_D secara matematis didefinisikan sebagai rasio antara simpangan pada saat ultimit (kondisi batas) yang mampu dicapai Δ_u dengan simpangan pada saat leleh Δ_y pada struktur (Caltrans, 2013), dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

3. Hasil Analisa dan Pembahasan

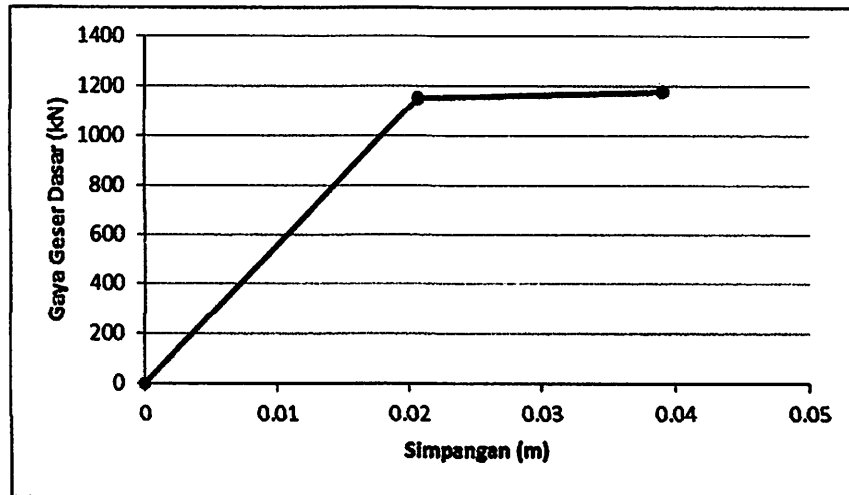
3.1 Kurva Kapasitas FEMA 356

Kurva kapasitas menurut FEMA 356 selanjutnya diidealisasi sehingga diperoleh kurva bilinear untuk ketiga model pada pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dan dengan interaksi pondasi seperti ditunjukkan pada Gambar 6 sampai dengan Gambar 8.



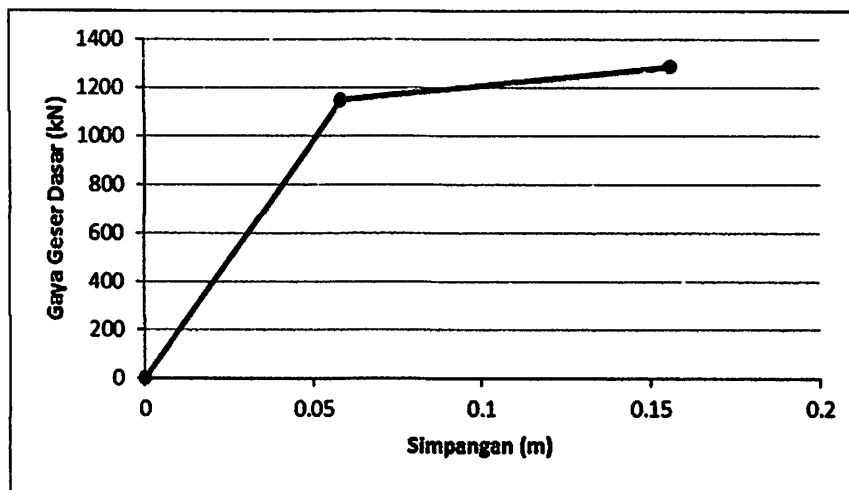
Gambar 6. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model I: pilar jembatan tanpa interaksi pondasi (dasar *pile cap* dianggap jepit) menurut ketentuan FEMA 356

Hasil pada Gambar 6 menjelaskan bahwa simpangan 0,0054 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,0080 m dan gaya geser dasar 1156,0380 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).



Gambar 7. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model II: pilar jembatan dengan interaksi pondasi (hubungan antara *pile cap* dan tiang pancang dianggap sendi, sedangkan ujung pondasi juga dianggap sendi) menurut ketentuan FEMA 356

Hasil pada Gambar 7 menjelaskan bahwa simpangan 0,0206 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,0390 m dan gaya geser dasar 1180,0370 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).

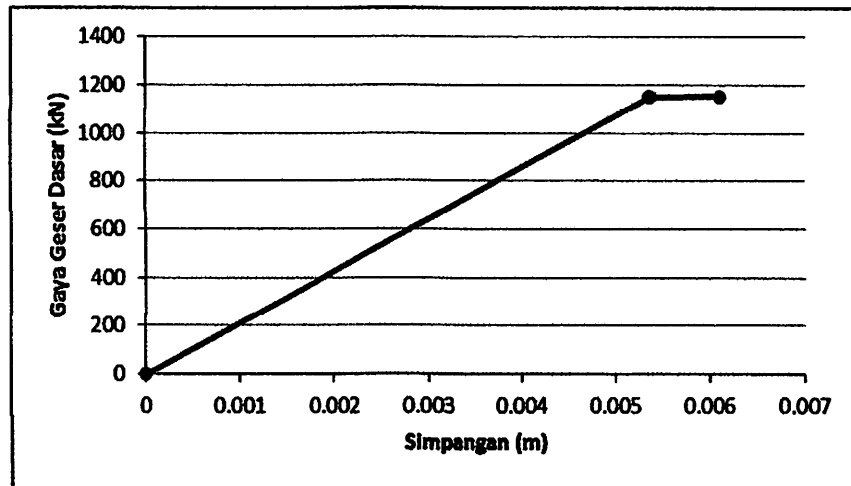


Gambar 8. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model III: pilar jembatan dengan interaksi pondasi (hubungan antara *pile cap* dan tiang pancang dianggap *rigid*, sedangkan ujung pondasi dianggap sendi) menurut ketentuan FEMA 356

Hasil pada Gambar 8 menjelaskan bahwa simpangan 0,0585 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,1560 m dan gaya geser dasar 1290,3120 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).

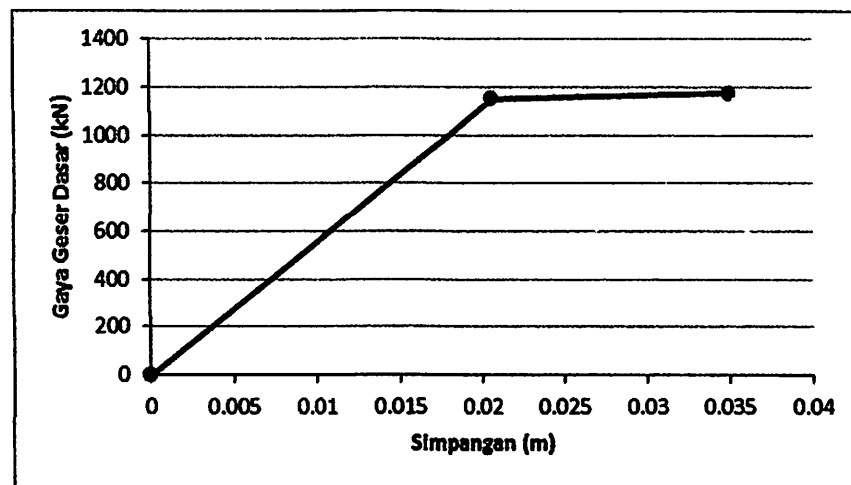
3.2 Kurva Kapasitas FFMA 440

Kurva kapasitas menurut FEMA 356 selanjutnya diidealisasi menjadi kurva bilinear untuk ketiga model pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dan dengan interaksi pondasi seperti ditunjukkan pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 11.



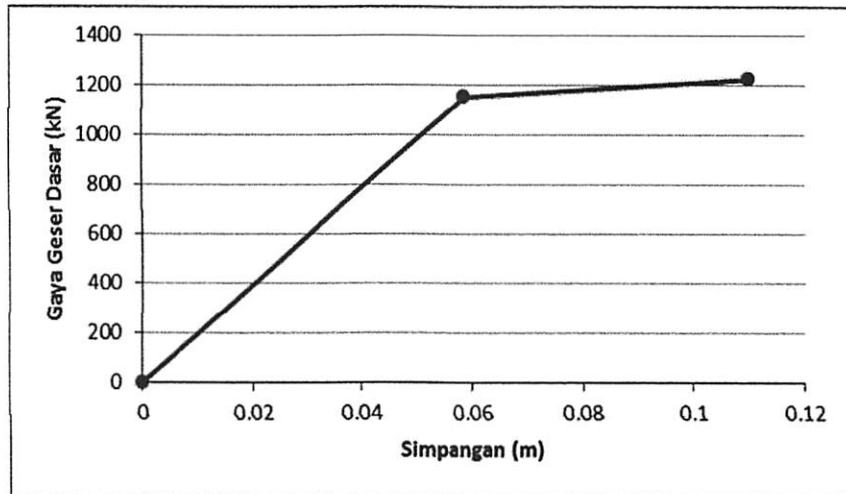
Gambar 9. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model I: pilar jembatan tanpa interaksi pondasi (dasar *pile cap* dianggap jepit) menurut ketentuan FEMA 440

Hasil pada Gambar 9 menjelaskan bahwa simpangan 0,0054 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,0061 m dan gaya geser dasar 1153,1780 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).



Gambar 10. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model II: pilar jembatan dengan interaksi pondasi (hubungan antara *pile cap* dan tiang pancang dianggap sendi, sedangkan ujung pondasi juga dianggap sendi) menurut ketentuan FEMA 440

Hasil pada Gambar 10 menjelaskan bahwa simpangan 0,0206 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,0350 m dan gaya geser dasar 1173,9490 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).

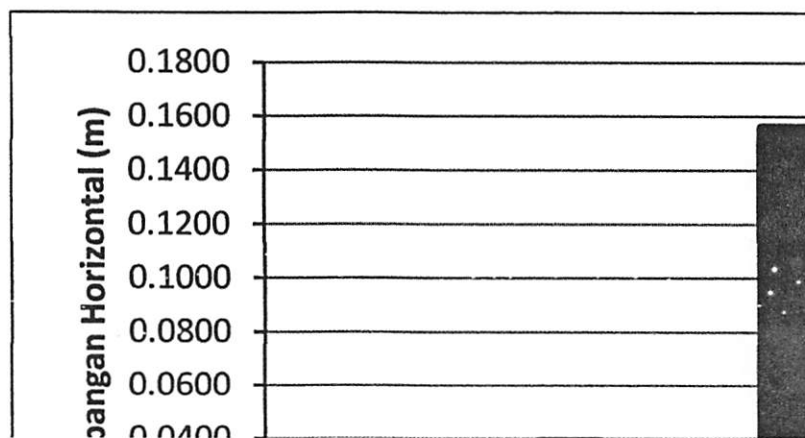


Gambar 11. Hubungan gaya geser dasar dan simpangan pada model III: pilar jembatan dengan interaksi pondasi (hubungan antara *pile cap* dan tiang pancang dianggap *rigid*, sedangkan ujung pondasi dianggap sendi) menurut ketentuan FEMA 440

Hasil pada Gambar 11 menjelaskan bahwa simpangan 0,0585 m dan gaya geser dasar 1152,0510 kN terjadi pada saat leleh pertama, sedangkan simpangan horizontal 0,1100 m dan gaya geser dasar 1225,4810 kN terjadi pada saat kondisi batas (target perpindahan).

3.3 Simpangan Horizontal

Simpangan horizontal merupakan target perpindahan dari hasil idealisasi kurva *Pushover*, yaitu nilai yang diperoleh melalui respons pilar jembatan yang dipengaruhi akibat pembebanan yang bekerja baik secara aksial dan lateral. Jika dilakukan peninjauan selanjutnya maka target perpindahan dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur pilar jembatan akibat gempa rencana sehingga dapat diketahui kondisi struktur tersebut akibat gempa tertentu. Faktor interaksi pondasi tiang pancang berada di bawah pilar jembatan ternyata akan meningkatkan simpangan horizontal karena terjadinya deformasi terutama dengan pemberian tumpuan sendi pada ujung tiang pancang.



Gambar 12. Perbandingan simpangan horizontal pilar jembatan menurut FEMA 356 dan FEMA 440

Berdasarkan Gambar 12 menunjukkan bahwa simpangan horizontal pada pilar jembatan secara berurutan dari model I, II, dan III terus meningkat baik menurut ketentuan FEMA 356 maupun FEMA 440. Sedangkan prosentase perubahan simpangan horizontal terbesar pada pilar jembatan terjadi untuk model III dan terkecil untuk model II.

3.4 Daktilitas Simpangan

Daktilitas simpangan pada pilar jembatan berdasarkan kurva idealisasi (bilinier) dengan menggunakan standar Caltrans (2013) seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai daktilitas diperoleh dari perbandingan antara simpangan pada kondisi batas dengan simpangan pada saat leleh pertama.

Tabel 2. Daktilitas simpangan pilar jembatan

Model	Daktilitas Simpangan, μ_D	
	Menurut FEMA 356	Menurut FEMA 440
I	1,4916	1,1390
II	1,8900	1,6962
III	2,6651	1,8792

Menurut Caltrans (2013) bahwa untuk dinding pilar terletak di sumbu kuat dan ditinjau terhadap sumbu lemah maka daktilitas yang disyaratkan adalah ≤ 5 . Daktilitas simpangan pilar jembatan yang diperoleh untuk keseluruhan model adalah ≤ 5 . Hal ini menunjukkan bahwa simpangan horizontal dari kurva idealisasi (bilinier) untuk semua model dalam kondisi aman.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan yang diperoleh dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Secara keseluruhan model pilar jembatan tanpa interaksi pondasi dan pilar jembatan dengan interaksi pondasi beserta tanah menurut FEMA 356 dan FEMA 440 memiliki kurva kapasitas yang hampir sama, karena setelah gaya geser dasar mencapai nilai maksimum maka langsung terjadi degradasi kekuatan. Berdasarkan idealisasi kurva *Pushover* (bilinier) maka simpangan horizontal terbesar terjadi pada model III menurut ketentuan FEMA 356 adalah 0,1560 m, sedangkan simpangan horizontal terkecil terjadi pada model I menurut ketentuan FEMA 440 adalah 0,0061 m.
2. Nilai daktilitas simpangan terbesar untuk pilar jembatan terjadi pada model III menurut FEMA 356 adalah 2,6651 yang merupakan struktur paling daktail dan daktilitas simpangan terkecil terjadi pada model I menurut FEMA 440 adalah 1,1390. Secara keseluruhan model berdasarkan daktilitas simpangan dalam kondisi aman karena memenuhi persyaratan maksimum daktilitas ≤ 5 menurut ketentuan Caltrans (2013).

Daftar Pustaka

- American Concrete Institute 343R-95. 1995. *Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures*. Reported by: ACI-ASCE Committee 343.
- Caltrans. 2013. *Seismic Design Criteria Version 1.7*. California Department of Transportation Sacramento, California.
- Dewobroto, W. 2005. *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Presentasi dan Prosiding: Civil Engineering National Conference: Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism – Unika Soegijapranata, Semarang 17-18 Juni 2005.
- FEMA 356. 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Prepared by: American Society Of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- FEMA 440. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Prepared by: Applied Technology Council (ATC-55 Project), Redwood City, California.
- Haselton, C.B. and Deierlein, G.G. 2008. *Assessing Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment-Frame Buildings*. PEER Report 2007/08 Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. 1988. *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. ASCE - Journals of Structural Engineering Vol. 114 No. 8, August 1988.
- Montejo, L.A. and Kowalsky, M.J. 2007. *CUMBIA: Set of Codes for the Analysis of Reinforced Concrete Members*. Technical Report No. IS-07-01, Constructed Facilities Laboratory, North Carolina State University, Raleigh, N.C.
- Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. 1996. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley and Sons, New York.
- RSNI T-02-2005 Standar Nasional Indonesia. 2005. *Pembebanan untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sethy, K. 2011. *Application of Pushover Analysis to RC Bridge*. A Project Report. National Institute of Technology, Rourkela.
- SNI 03-1726-2002 Standar Nasional Indonesia. 2002. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- SNI 2833:2008 Standar Nasional Indonesia. 2008. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C. and Madan, A. 1996. *IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings*. Technical Report NCEER-96-0010, Buffalo, New York.