



Contents lists available at [JESA](https://jesa.aks.or.id/index.php/jesa/index)

Journal of Engineering and Science Application

journal homepage:
<https://jesa.aks.or.id/index.php/jesa/index>



Analisis Perbandingan Kinerja Struktur Pilar Tipe Kolom Tunggal, Ganda, dan Dinding pada Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417 Jalan Tol Solo–Yogyakarta–NYIA Kulonprogo Seksi 1 Paket 1.2

Gian Febri Setiawan^a, Arie Taveriyanto^b

Universitas Negeri Semarang, Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50229

Article Info

Keywords:

Kinerja Struktur,
Kolom Ganda,
Kolom Tunggal,
Pilar Dinding,
Pilar Jembatan.

ABSTRACT

Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417, bagian Jalan Tol Solo–Yogyakarta–NYIA Kulonprogo Seksi 1 Paket 1.2, memiliki bentang total 111,91 m dalam tiga segmen (41,79 m; 28,33 m; 41,79 m). Desain eksisting menggunakan pilar kolom ganda 2×2 m setinggi 8 m. Karena lokasi rawan gempa, tipe pilar sangat memengaruhi daya dukung, kekakuan, daktilitas, dan respons seismik struktur, sehingga dilakukan kajian komparatif tipe pilar tunggal, ganda, dan dinding untuk menentukan tipe paling efisien berdasarkan gaya dalam, persyaratan P-Δ, perilaku tekuk, daktilitas, serta stabilitas geser dan guling. Metode kuantitatif digunakan melalui pemodelan *3D finite element* dengan *CSiBridge* mengacu pada SNI 1725:2016, SNI 2833:2016, dan SE Dirjen Bina Marga No. 06/SE/Db/2021, dengan verifikasi desain menggunakan *Microsoft Excel*. Hasil menunjukkan Pilar Dinding menerima gaya ($P_u=42.453,95$ kN; $V_u=16.635,24$ kN; $M_u=155.793,01$ kNm), Pilar Tunggal ($P_u=38.300,82$ kN; $V_u=12.151,27$ kN; $M_u=107.341,37$ kNm), Pilar Ganda ($P_u=26.669,37$ kN; $V_u=7.855,38$ kN; $M_u=21.172,36$ kNm). Seluruh pilar memenuhi syarat kelangsingan, kriteria P-delta, rasio tulangan pengekang minimum, serta faktor keamanan geser ($\geq 1,5$) dan guling ($\geq 2,0$) sesuai SNI 8460:2017. Dari enam aspek kinerja, Pilar Ganda unggul tiga aspek (perilaku struktur, stabilitas geser, stabilitas guling), Pilar Tunggal dua aspek (perilaku tekuk dan daktilitas), Pilar Dinding satu aspek (persyaratan P-Δ), sehingga Pilar Ganda terbukti paling efisien sekaligus memvalidasi desain eksisting.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Gian Febri Setiawan
Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Negeri Semarang
Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50229
Email: febrighian@students.unnes.ac.id

1. LATAR BELAKANG

Pembangunan infrastruktur merupakan salah satu prioritas utama dalam agenda pembangunan nasional Pemerintah Republik Indonesia untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan pemerataan

kesejahteraan masyarakat. Di antara berbagai sektor infrastruktur, pembangunan jalan tol menjadi fokus utama karena berperan sebagai jaringan transportasi yang menghubungkan wilayah, memperlancar distribusi barang, dan meningkatkan efisiensi mobilitas penduduk [1]. Salah satu proyek strategis nasional (PSN) di bidang ini adalah Jalan Tol Solo-Yogyakarta-Kulonprogo sepanjang 96,57 km yang menghubungkan Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta, terbagi atas tiga seksi, yaitu Seksi 1 Solo-Purwomartani (35,64 km), Seksi 2 Purwomartani-JC Sleman (22,36 km), dan Seksi 3 JC Sleman-Kulon Progo (38,57 km), yang dibangun untuk meningkatkan konektivitas kawasan Joglosemar (Yogyakarta-Solo-Semarang) sekaligus terintegrasi dengan Jalan Tol Yogya-Bawen dan Solo-Bawen [2].

Dalam pelaksanaan proyek tersebut, terdapat berbagai item pekerjaan konstruksi, di antaranya pekerjaan timbunan, rigid pavement, struktural, dan utilitas. Penelitian ini memfokuskan kajian pada aspek pekerjaan struktural, yaitu pembangunan Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417 pada Seksi 1 Paket 1.2, yang berlokasi di Kelurahan Tamanmartani, Kecamatan Kalasan, Kabupaten Sleman, D.I. Yogyakarta. Jembatan ini memiliki bentang total 111,91 m dan lebar total 26,9 m, terbagi menjadi tiga bentang dengan konfigurasi panjang 41,79 m, 28,33 m, dan 41,79 m. Berdasarkan desain eksisting, struktur bawah jembatan menggunakan pilar tipe kolom ganda (*double column*) berdimensi persegi 2 m x 2 m, tinggi 8 m, dengan jarak as antarkolom 9 m.

Pilar jembatan merupakan komponen struktur bawah yang berfungsi menopang dan menyalurkan beban jembatan ke fondasi, dengan tipe yang umum digunakan meliputi pilar tunggal, pilar ganda, dan pilar dinding [3]. Pemilihan tipe pilar sangat berpengaruh terhadap kinerja struktur secara keseluruhan, terutama terhadap kapasitas daya dukung, kekakuan, daktilitas, serta respons struktur terhadap beban gempa. Mengingat lokasi Jembatan Nasional Pakem-Kalasan berada di wilayah Yogyakarta yang termasuk kategori rawan gempa, pemilihan bentuk pilar menjadi krusial bagi kinerja struktur secara keseluruhan. Pilar kolom tunggal umumnya memiliki konfigurasi yang lebih sederhana dan lebih efisien dari sisi kebutuhan material serta dimensi penampang dibandingkan pilar kolom ganda, namun pilar kolom ganda unggul dalam distribusi beban dan stabilitas terhadap beban lateral gempa [4]. Adapun pilar tipe dinding (*wall pier*) memiliki kekakuan lateral yang besar sehingga mampu meminimalkan deformasi struktur, tetapi menyerap gaya geser dasar (*base shear*) yang tinggi, sementara pilar kolom ganda memiliki daktilitas yang hampir setara dengan tipe dinding namun dengan gaya geser dasar yang lebih rendah meskipun deformasinya relatif lebih besar [5].

Desain eksisting Jembatan Nasional Pakem-Kalasan yang menggunakan pilar kolom ganda tentu telah melalui perhitungan teknis, namun diperlukan kajian lebih mendalam untuk mengetahui apakah tipe tersebut memberikan kinerja struktur yang paling optimal dibandingkan alternatif tipe pilar lain, khususnya dalam menghadapi beban struktural dan beban gempa sesuai kondisi wilayah Indonesia yang rawan gempa. Analisis perbandingan ini penting untuk mengetahui keunggulan dan keterbatasan masing-masing tipe pilar sekaligus memvalidasi keandalan desain eksisting terhadap berbagai kemungkinan respons struktur.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbandingan perilaku struktur berupa gaya aksial, gaya geser, dan momen; mengidentifikasi persyaratan $P-\Delta$, perilaku tekuk (*buckling*), daktilitas, serta stabilitas terhadap geser dan guling; dan menentukan tipe pilar yang paling efisien serta memiliki kinerja terbaik di antara pilar tipe kolom tunggal, kolom ganda, dan dinding untuk diterapkan pada Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417 Jalan Tol Solo-Yogyakarta-NYIA Kulonprogo Seksi 1 Paket 1.2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memvalidasi keandalan desain eksisting yang menggunakan pilar kolom ganda, sekaligus memberikan rekomendasi teknis mengenai tipe pilar yang paling efisien dan memiliki kinerja terbaik untuk diterapkan pada jembatan tersebut, serta menjadi bahan pertimbangan bagi praktisi dan konsultan perencanaan dalam pemilihan tipe pilar jembatan pada proyek sejenis.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Tinjauan umum

Pada penelitian akan dilakukan analisis untuk mendapatkan hasil dari perhitungan kinerja struktur pilar tipe kolom tunggal, kolom ganda, dan dinding. Perhitungan kinerja struktur dilakukan dengan memperhitungkan gaya dalam yang bekerja pada masing-masing tipe pilar, serta perbandingan efisiensi dan keamanan struktur dari setiap tipe pilar yang ditinjau. Pada penelitian ini, metode penelitian yang digunakan yaitu metode penelitian kuantitatif, dan objek yang digunakan adalah Pilar Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417 pada Jalan Tol Solo – Yogyakarta – NYIA Kulonprogo Seksi 1 Paket 1.2. Dalam melakukan analisis pilar jembatan dilakukan pemodelan pilar beserta jembatannya yang dalam penelitian ini menggunakan bantuan software CSI Bridge. Setelah dilakukan pemodelan, selanjutnya akan dilakukan perhitungan cek rancangan dengan bantuan software Microsoft Excel yang perhitungannya mengacu pada data teknis jembatan serta pembebanan sesuai SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, dan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan.

2.2. Metode Penelitian

Adapun metode penelitian dalam skripsi ini adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan data konstruksi jembatan meliputi data dimensi dan spesifikasi material, serta standar acuan perencanaan jembatan.
2. Analisis perhitungan perencanaan pilar jembatan mengacu pada SNI 1725:2016, SNI 2833:2016, Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021, dan Detail Engineering Design (DED) Jembatan Nasional Pakem-Kalasan dengan menggunakan software Microsoft sebagai program bantu dalam analisis perhitungan.
3. Pembuatan model 3D finite element struktur jembatan dengan tiga variasi tipe pilar menggunakan software CSI Bridge yang mengacu pada data geometri jembatan.
4. Analisis struktur untuk mendapatkan data gaya dalam (momen, geser, aksial), displacement, serta evaluasi parameter kinerja struktur diantaranya persyaratan P- Δ , perilaku tekuk (buckling), daktilitas serta stabilitas terhadap geser dan guling pada pilar.
5. Pengolahan data output dari hasil analisis struktur menggunakan CSI Bridge dan perhitungan parameter kinerja masing-masing tipe pilar dengan Microsoft Excel.
6. Penyajian dan perbandingan data output yang telah diolah dalam bentuk tabel perbandingan, grafik, ataupun diagram untuk menganalisis kelebihan dan kekurangan masing-masing tipe pilar.
7. Penarikan kesimpulan dari keseluruhan analisis perbandingan kinerja struktur untuk menentukan tipe pilar yang paling efisien dan efektif berdasarkan parameter-parameter yang telah dievaluasi.

2.3. Objek dan Data Penelitian



Objek penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah struktur pilar Jembatan Nasional Pakem-

Gambar 1 Objek Penelitian Pilar Eksisting

Kalasan yang berlokasi pada STA.37+417 Jalan Tol Solo – Yogyakarta – NYIA Kulonprogo Seksi 1 Paket 1.2, dengan struktur pilar eksisting merupakan tipe pilar ganda.

Berikut ini data umum dari Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417.

Tabel 1 Data Umum Jembatan

No.	Uraian	Keterangan
1	Tipe jembatan	Beton prategang (PCI girder)
2	Panjang total jembatan	111,91 m
3	Jumlah bentang	3 bentang
4	Panjang bentang	Bentang A = 41,79 m; B = 28,33 m; C = 41,79 m
5	Lebar pelat lantai	12,7 m
6	Tebal pelat lantai	0,25 m
7	Tinggi jembatan	9,5 m dari jalan eksisting yang dilalui di bawahnya
8	Jumlah abutment	2 buah
9	Jumlah pilar	2 buah

Kemudian berikut ini adalah spesifikasi material Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA.37+417.

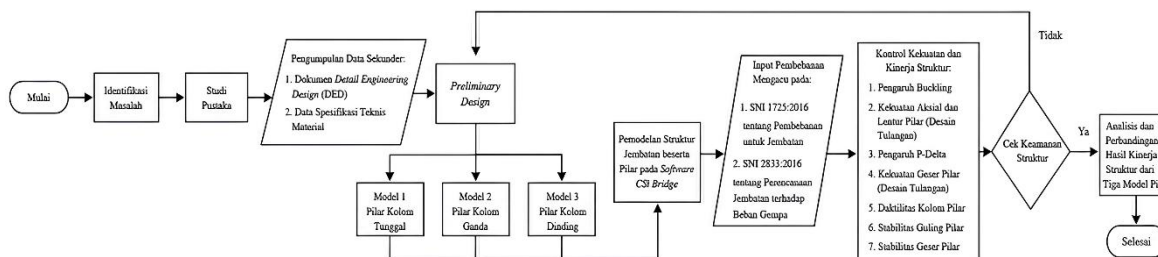
Tabel 2 Spesifikasi Material Jembatan

No.	Uraian	Keterangan
1	Gelagar PCI girder	Beton mutu f'c 50 MPa
2	Deck slab, Abutment, Pilar, Pile cap, Parapet, Pelat injak	Beton mutu f'c 30 MPa
3	Berat jenis beton	2.400 kg/m ³
4	Modulus elastisitas beton f'c 50 MPa	$4700\sqrt{50} = 33234 \text{ MPa}$
5	Modulus elastisitas beton f'c 30 MPa	$4700\sqrt{30} = 25742 \text{ MPa}$
6	Mutu tulangan BJTS 420B	Tegangan leleh (fy) = 420 MPa Tegangan ultimit (fu) = 525 MPa
7	Berat jenis tulangan	7850 kg/m ³
8	Modulus elastisitas tulangan	200000 MPa

2.4. Teknik Analisis Data

Penelitian ini menerapkan empat tahap analisis data, yaitu preliminary design, pemodelan struktur, analisis pembebanan, dan analisis respon struktur pilar jembatan. Preliminary design menentukan parameter awal struktur berdasarkan data sekunder (gambar rencana, dimensi elemen, mutu material, data tanah) mengacu pada Surat Edaran No. 06/SE/Db/2021, dengan dimensi awal ketiga tipe pilar tunggal, ganda, dan dinding ditentukan menggunakan rasio tinggi terhadap lebar penampang sebesar $L/18$ [6]. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan *software CSI Bridge* berbasis metode elemen hingga tiga dimensi. Struktur atas (*superstructure*) berupa jembatan beton PCI girder dimodelkan konsisten pada seluruh variasi menggunakan elemen *frame* dan *shell*, sedangkan struktur bawah (*substructure*) dimodelkan dalam tiga variasi berbasis penampang persegi yaitu model 1 kolom tunggal, model 2 kolom ganda tanpa balok penghubung melintang (*cross beam*), dan model 3 dinding pilar penuh. Ketiga variasi pilar dihubungkan langsung dengan kepala pilar (*pier head*) di bagian atas, dengan pile cap dimodelkan sebagai tumpuan jepit.

Analisis pembebanan dilakukan dengan memasukkan beban dari struktur atas (beban mati sendiri dan tambahan, lalu lintas, pejalan kaki, rem, angin struktur atas dan kendaraan, serta gempa) dan struktur bawah (beban mati sendiri dan angin struktur bawah) menggunakan *CSI Bridge*, tanpa memperhitungkan beban tekanan arus air karena lokasi pilar tidak berada pada area aliran sungai. Analisis respon struktur pilar selanjutnya dilakukan secara identik terhadap ketiga variasi pilar, meliputi pemeriksaan kelangsingan dan pembesaran momen kolom, desain tulangan pokok dan tulangan geser, pemeriksaan persyaratan P-delta, perhitungan kapasitas geser pada daerah sendi plastis dan di luar sendi plastis, serta pemeriksaan stabilitas geser dan guling pilar, sebagai dasar komparasi objektif antara pilar tunggal, ganda, dan dinding berdasarkan hasil numerik program. Alur penelitian secara keseluruhan disajikan pada diagram alir penelitian berikut.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Pembebanan Pilar

Analisis pembebanan pilar berdasarkan SNI 1725:2016 dilakukan dengan menghitung beban dari struktur atas (beban mati sendiri dan tambahan, lalu lintas, pejalan kaki, rem, angin struktur atas dan kendaraan, serta gempa) dan struktur bawah (beban mati sendiri dan angin struktur bawah) [7].

3.1.1. Beban sendiri (MS)

Tabel 3 Berat Sendiri Struktur Atas Bentang A 41,79 m

No.	Jenis Beban	Jumlah	Berat isi (kN/m ³)	Beban (kN)
1	Slab Jembatan	1	24	3145,536
2	Parapet	2	24	764,836
3	PCI Girder tipe 2,1 m	6	24,5	4511,994
4	Diafragma Tumpuan	10	24	415,800
5	Diafragma Lapangan	25	24	463,980

Tabel 4 Berat Sendiri Struktur Atas Bentang B 28,33 m

No.	Jenis Beban	Jumlah	Berat isi (kN/m ³)	Beban (kN)
1	Slab Jembatan	1	24	1984,248
2	Parapet	2	24	482,469
3	PCI Girder tipe 2,1 m	6	24,5	1992,803
4	Diafragma Tumpuan	10	24	326,400
5	Diafragma Lapangan	15	24	209,650

Tabel 5 Beban Sendiri Struktur Bawah

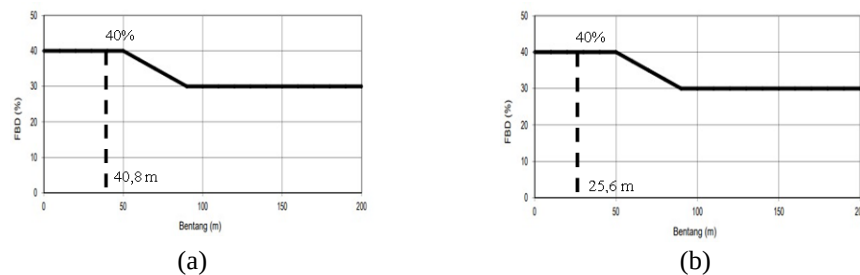
No.	Jenis Pilar	Beban (kN)
1	Pilar Tunggal	7741,572
2	Pilar Ganda	7741,572
3	Pilar Dinding	9863,172

3.1.2. Beban mati tambahan (MA)

Beban mati tambahan pada jembatan ini terdiri atas berat lapisan aspal dan berat genangan air hujan. Berat lapisan aspal bentang A sebesar 531,274 kN dan bentang B sebesar 335,135 kN. Kemudian berat genangan air hujan bentang A sebesar 236,658 kN dan bentang B sebesar 149,287 kN.

3.1.3. Beban Lajur (TD)

Beban lajur (TD) tersusun dari dua beban yaitu beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT). Nilai BTR dipengaruhi oleh panjang bentang jembatan, maka dari itu nilai bentang A dan bentang B akan berbeda. Nilai BTR bentang A ditentukan karena panjang $L > 30$ m, maka $q = 9,0 (0,5 + \frac{15}{L})$ kPa yang kemudian dikalikan lebar lajur dan panjang bentang, sehingga dihasilkan beban BTR bentang A sebesar 3727,62 kN. Kemudian untuk bentang B karena panjang $L < 30$ m, maka $q = 9,0$ kPa yang kemudian dikalikan lebar lajur dan panjang bentang, sehingga dihasilkan beban BTR bentang B sebesar 2695,68 kN. Nilai beban garis terpusat (BGT) memiliki intensitas p sebesar 49,0 kN/m. Untuk beban lajur "D", nilai FBD ditentukan berdasarkan panjang bentang jembatan yang direncanakan.



Gambar 3 Faktor beban dinamis (FBD) untuk (a) Bentang A dan (b) Bentang B

Berdasarkan grafik Faktor beban dinamis (FBD) untuk bentang A dan bentang B diatas maka dihasilkan beban BGT bentang A sebesar 802,62 kN dan bentang B sebesar 802,62 kN.

3.1.4. Beban Rem (TB)

Gaya rem dalam perencanaan struktur jembatan ditempatkan pada seluruh lajur lalu lintas searah tinjauan dan diasumsikan bekerja horizontal pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Besarnya diambil dari nilai terbesar antara 25% berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR). Dihasilkan beban rem bentang A sebesar 211,381 kN, bending momen sebesar 2800,798 kN.m dan bentang B sebesar 159,784 kN, bending momen sebesar 2117,138 kN.m.

3.1.5. Beban Angin (EW)

Berdasarkan SNI 1725:2016, kecepatan angin dasar (VB) untuk perencanaan berkisar 90–126 km/jam dan diasumsikan terdistribusi merata pada bidang struktur yang terkena angin. Kondisi hulu jembatan diasumsikan sebagai kawasan sub-urban, dan karena tidak tersedia data survei angin lokasi, nilai V10 diasumsikan sama dengan VB.

Tabel 6 Nilai Vo dan Zo

Kondisi	Lahan terbuka	Sub urban	Kota
Vo (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Zo (km/jam)	70	1000	2500

Tabel 7 Tekanan angin dasar

Komponen bangunan atas	Angin tekan (MPa)	Angin Hisap (MPa)
Rangka, Kolom dan Pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan Datar	0,0019	N/A

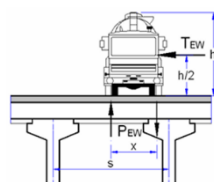
Dihasilkan beban angin struktur atas bentang A sebesar 346,618 kN, momen sebesar 4601,355 kN.m dan bentang B sebesar 217,486 kN, momen sebesar 2887,125.

Berdasarkan SNI 1725:2016, beban angin pada struktur bawah jembatan diperhitungkan pada dua arah utama, yaitu memanjang dan melintang jembatan. Apabila data angin yang lebih spesifik tidak tersedia, tekanan angin dasar untuk perencanaan ditetapkan sebesar 0,0019 MPa guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap elemen struktur bawah. Dihasilkan beban angin struktur bawah setiap pilar pada tabel berikut.

Tabel 8 Beban Angin Struktur Bawah tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Beban arah X (kN)	Momen arah X (kN.m)	Beban arah Y (kN)	Momen arah Y (kN.m)
1	Pilar Tunggal	178,1345	1019,820	48,735	279,008
2	Pilar Ganda	147,735	845,78	48,735	279,008
3	Pilar Dinding	310,3745	1776,894	41,135	235,498

Berdasarkan SNI 1725:2016, beban angin pada kendaraan yang melintas di jembatan dimodelkan sebagai tekanan merata sebesar 1,46 N/mm yang bekerja tegak lurus arah lalu lintas pada ketinggian 1.800 mm di atas permukaan jalan. Jarak antar roda pada setiap gandar diasumsikan sebesar 1,75 m untuk merepresentasikan kondisi pembebanan kendaraan secara ideal.

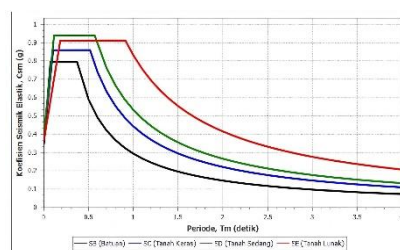


Gambar 4 Beban angin kendaraan

Dihasilkan beban angin kendaraan bentang A sebesar 61,27 kN dan bentang B sebesar 38,444 kN.

3.1.6. Beban Gempa (EQ)

Berdasarkan SNI 2833:2016 Pasal 6.3, jembatan bentang majemuk wajib dianalisis terhadap pengaruh gempa menggunakan metode yang dipilih berdasarkan zona gempa dan tingkat keberaturan struktur sesuai Tabel 8 dan Tabel 9 SNI 2833:2016. Gaya gempa rencana pada bangunan bawah, termasuk pilar, diperoleh dengan membagi gaya gempa elastis hasil analisis dengan faktor modifikasi respons (R) sesuai Tabel 6 SNI 2833:2016. Karena lokasi Jembatan Nasional Pakem-Kalasan berada di wilayah Kabupaten Sleman dan berdasarkan hasil penentuan situs dihasilkan tanah lunak, sehingga perencanaan menggunakan data respons spektrum Kabupaten Sleman yang diperoleh melalui Aplikasi LINI Bina Marga untuk mendapatkan nilai PGA, Ss, dan S1. Berikut ditampilkan hasil respons spektrum dari aplikasi tersebut.



Gambar 5 Grafik Respon Spektrum Kab. Sleman

Nilai PGA, Ss, dan S1 dari

Aplikasi LINI Bina Marga

dicari nilai faktor amplifikasi FPGA, Fa, dan Fv dengan cara interpolasi, sehingga dihasilkan nilai berikut ini.

Tabel 9 Hasil Interpolasi

PGA	Ss	S1
0,348	0,794	0,294
FPGA	Fa	Fv
1,15	1,18	1,81

Selanjutnya, menentukan berat total struktur atas yang berdasarkan perhitungan sebelumnya dihasilkan nilai sebesar 15550,07 kN. Kemudian menghitung kekakuan struktur (Kp) dan periode getar struktur (T) untuk selanjutnya dimasukkan pada penentuan koefisien respon *elastic* (Csm). Nilai Kp dan T tiap pilar disajikan pada tabel berikut.

Tabel 10 Nilai Kekakuan Struktur (Kp) dan Periode Getar Struktur (T) tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Kp arah X (kN/m)	Kp arah Y (kN/m)	Tx (detik)	Ty (detik)
1	Pilar Tunggal	1126254,509	281563,627	0,236	0,471
2	Pilar Ganda	140781,813	563127,254	0,667	0,333
3	Pilar Dinding	38621661,66	2155093,031	0,040	0,170

Selanjutnya, dalam menentukan koefisien respons *elastic* (Csm) penggunaan rumus dipengaruhi oleh nilai periode T yang terjadi pada struktur menurut SNI 2833 2016.

Untuk $T \leq T_0$: $Csm = (SDS - A_s) \cdot (T/T_0) + A_s$

Untuk $T_0 \leq T \leq T_S$: $Csm = SDS$

Untuk $T > T_S$: $Csm = SD1/T$

Nilai Csm tiap pilar disajikan pada tabel berikut.

Tabel 11 Nilai Csm tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Csm arah X (detik)	Csm arah Y (detik)
1	Pilar Tunggal	0,939	0,939
2	Pilar Ganda	0,7998	0,939
3	Pilar Dinding	0,591	0,939

Selanjutnya, menentukan nilai beban gempa berdasarkan nilai Csm dan nilai faktor modifikasi respon (R) dan jembatan dikategorikan sebagai kategori penting. Sehingga dihasilkan beban gempa sebagai berikut.

Tabel 12 Nilai Beban Gempa tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	R	Beban arah X (kN)	Momen arah X (kN.m)	Beban arah Y (kN)	Momen arah Y (kN.m)
1	Pilar Tunggal	2	7300,194	83587,218	7300,194	83587,218
2	Pilar Ganda	3,5	3553,509	40687,674	4171,539	47764,124
3	Pilar Dinding	2	4598,022	52647,354	7300,194	83587,218

3.1.7. Kombinasi Pembebanan

Perancangan struktur jembatan menggunakan kombinasi pembebanan sebagaimana ditetapkan dalam SNI 1725:2016, guna mengetahui gaya total terfaktor yang bekerja pada jembatan.

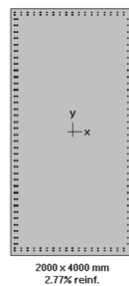
Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW ₁	EW ₂	BF	EU _L	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	γ_F	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_F	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_F	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_F	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_F	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γ_F	γ_{EQ}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,0	-	-
Ekstrem II	γ_F	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,0	1,0
Daya Jarak I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Jarak II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya Jarak III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Jarak IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Faktor (TD dan TRI)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan : γ_F dapat berupa $\gamma_{DE}, \gamma_{DA}, \gamma_{DW}, \gamma_{DR}, \gamma_{DL}, \gamma_{DS}$ tergantung beban yang ditinjau
 γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa

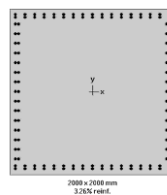
Gambar 6 Tabel Kombinasi Pembebanan SNI 1725:2016

3.2. Analisis Struktur Pilar

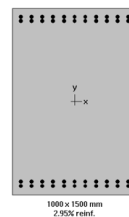
3.2.1. Penampang Pilar



(a)



(b)



(c)

Gambar 7 Penampang Pilar Kolom (a) Tunggal, (b) Ganda, (c) Dinding (tinjauan 1 m)

Data penampang pilar terdiri dari lebar, panjang, tinggi, tebal selimut beton, diameter tulangan pokok, dan jumlah tulangan. Data penampang disajikan pada tabel berikut.

Tabel 13 Data Penampang tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Lebar (mm)	Panjang (mm)	Tinggi (mm)	Selinut Beton (mm)	Dia. tul. Pokok (mm)	Jumlah tul. (buah)
1	Pilar Tunggal	2000	4000	8000	50	36	220
2	Pilar Ganda	2000	2000	8000	50	36	128
3	Pilar Dinding	1500	12700	8000	50	36	22 (per 1 m)

3.2.2. Hasil Perilaku Struktur (Output Gaya pada Pilar)

Output gaya pilar diperoleh dari hasil *Running Analyze* dari software *CSI Bridge* setelah melakukan proses input beban dan kombinasi pembebanan. Hasil *output* gaya aksial ultimit (Pu), gaya geser ultimit (Vu), dan momen ultimit (Mu) pilar kolom tunggal, ganda, dan dinding disajikan pada tabel berikut.

Tabel 14 Nilai Pu, Vu, dan Mu tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Pu (kN)	Vu (kN)	Mu (kN.m)
1	Pilar Tunggal	38300,82	12151,27	107341,37
2	Pilar Ganda	26669,37	7855,38	21172,36
3	Pilar Dinding	42453,95	16635,24	155793,01

3.2.3. Hasil Perilaku Tekuk (Buckling)

Penentuan perilaku tekuk (*buckling*) didasarkan pada rumus rasio kelangsingan SNI 2847:2019 pasal 6.2.5. sebagai berikut [8].

$$\lambda = \frac{k \cdot l_u}{r} \quad (1)$$

Dimana, k adalah faktor panjang efektif, l adalah tinggi kolom, dan r adalah modulus girasi.

Tabel 15 Rasio Kelangsingan tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	λ_x	λ_y
1	Pilar Tunggal	17,39	34,78
2	Pilar Ganda	19,87	34,78
3	Pilar Dinding	5,48	46,37

3.2.4. Hasil Persyaratan P-Δ

Berdasarkan SNI 2833:2016 pasal 6.5, perpindahan lateral pada kolom atau pilar jembatan, baik pada arah longitudinal maupun arah melintang, harus memenuhi persyaratan kinerja struktur agar tetap berada dalam batas yang diizinkan sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut [9].

$$\Delta Pu < 0,25\phi Mn \quad (2)$$

$$\Delta = Rd \Delta e \quad (3)$$

Dimana, nilai Δ adalah perpindahan titik kolom, P_u adalah beban aksial ultimit, ϕ adalah faktor reduksi, M_n adalah kuat lentur nominal, R_d adalah faktor modifikasi respon, dan Δ_e adalah perpindahan analisis gempa.

Tabel 16 Hasil Persyaratan P-Δ tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Δx (m)	Δy (m)
1	Pilar Tunggal	0,072	0,144
2	Pilar Ganda	0,059	0,221
3	Pilar Dinding	0,0016	0,00

3.2.5. Sifat Daktilitas

Penentuan sifat daktilitas didapatkan dari bentuk rasio ekivalen (ρ_s), yang diperoleh dengan mengonversi luas tulangan pengekang (Ash) sebagai indikator pembanding menjadi nilai rasio volumetrik (ρ_s) untuk memudahkan perbandingan tingkat daktilitas antar tipe pilar. Nilai ρ_s aktual dihitung berdasarkan definisi rasio volumetrik tulangan, kemudian dibandingkan terhadap syarat minimum sesuai SNI 2847:2019 Pasal 25.7.3.3 sebagai berikut [10].

$$\rho_s = \frac{4 \cdot A_v}{h_c \cdot s} \quad (4)$$

$$\rho_s \geq 0,45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y} \quad (5)$$

Dimana ρ_s adalah rasio volumetrik, A_v adalah luas tulangan geser, h_c adalah dimensi inti pilar, s adalah jarak tulangan, A_g adalah luas bruto pilar, A_c adalah luas inti pilar, f_c adalah mutu beton, dan f_y adalah mutu tulangan.

Tabel 17 Sifat Daktilitas tiap Pilar

No.	Jenis Pilar	Sendi Plastis (X)	Sendi Plastis (Y)	Selain Sendi Plastis (X)	Selain Sendi Plastis (Y)
1	Pilar Tunggal	0,3429	0,3429	0,01144	0,01353
2	Pilar Ganda	0,3429	0,3429	0,01781	0,00456
3	Pilar Dinding	0,3429	0,3429	0,00464	0,00436

3.2.6. Stabilitas Pilar terhadap Geser

Pergeseran pada struktur pilar dapat diakibatkan oleh bekerjanya gaya lateral. Oleh karena itu, pilar harus didesain untuk mampu mempertahankan posisinya guna mencegah pergeseran, baik dalam arah memanjang maupun melintang jembatan. Berikut ini merupakan perhitungan stabilitas pilar terhadap geser menggunakan kombinasi beban Ekstrem 1 EQ berdasarkan SNI 8460:2017 pasal 10.2.5.3 yang mana faktor keamanan terhadap geser lateral minimum 1,5 [11].

$$\delta b = 2/3 \phi \quad (6)$$

$$ca = ad \times C \quad (7)$$

$$\sum Rh = ca (Bx \times By) + P \times \tan \delta b \quad (8)$$

Dimana δb adalah sudut gesek tanah dan dasar pilar, ϕ adalah sudut geser dalam, ca adalah adhesi tanah dan dasar pilar, ad adalah faktor adhesi, C adalah kohesi tanah, $\sum Rh$ adalah tahanan terhadap geser, Bx dan By adalah lebar pilecap, dan P adalah gaya vertikal. Kemudian stabilitas geser dihitung dengan nilai $\sum Rh$ dibagi dengan nilai $\sum Px$ atau $\sum Py$ (gaya horizontal) sehingga dihasilkan nilai yang harus lebih dari nilai $SF = 1,5$.

Tabel 18 Stabilitas Pilar terhadap Geser Kondisi Beban Ekstrem

No.	Jenis Pilar	$\frac{\sum Rh}{\sum Px}$	$\frac{\sum Rh}{\sum Py}$
1	Pilar Tunggal	1,936	1,966
2	Pilar Ganda	3,916	3,441
3	Pilar Dinding	3,290	2,122

3.2.7. Stabilitas Pilar terhadap Guling

Selain menyebabkan pergeseran, gaya lateral yang bekerja pada pilar juga berpotensi menimbulkan kegagalan guling (*overturning*). Analisis stabilitas guling dilakukan dengan mengasumsikan titik putar berada pada sisi terluar dasar pilar yang berlawanan dengan arah datangnya gaya lateral dominan. Berikut ini merupakan perhitungan stabilitas pilar terhadap guling menggunakan kombinasi beban Ekstrem 1 EQ berdasarkan SNI 8460:2017 pasal 10.2.5.3 yang mana faktor keamanan terhadap guling minimum 2 [12].

$$b = \frac{Bx \text{ atau } By}{2} \quad (6)$$

$$\sum M_w = (P \times b) \times (1 + k) \quad (8)$$

Dimana b adalah jarak titik guling terhadap titik O (arah x atau y), B_x dan B_y adalah lebar pilecap, $\sum M_w$ adalah momen penahan guling total, P adalah gaya vertikal, dan k adalah tegangan berlebihan yang diizinkan. Kemudian stabilitas guling dihitung dengan nilai $\sum M_w$ dibagi dengan nilai $\sum M_x$ atau $\sum M_y$ (momen) sehingga dihasilkan nilai yang harus lebih dari nilai $SF = 2$.

Tabel 19 Stabilitas Pilar terhadap Guling Kondisi Beban Ekstrem

No.	Jenis Pilar	$\sum M_w$	$\sum M_w$
		$\sum M_x$	$\sum M_y$
1	Pilar Tunggal	2,368	2,409
2	Pilar Ganda	4,776	9,434
3	Pilar Dinding	4,027	5,834

3.3. Rekapitulasi Kinerja Struktur Pilar

Tabel 20 Scorecard Matrix Kinerja Tiga Tipe Pilar

Aspek Analisis	Pilar Tunggal	Pilar Ganda	Pilar Dinding
Perilaku struktur (P_u , V_u , M_u)	—	✓	—
Perilaku tekuk (<i>buckling</i>)	✓	—	—
Persyaratan $P-\Delta$	—	—	✓
Daktilitas	✓	—	—
Stabilitas geser	—	✓	—
Stabilitas guling	—	✓	—
Total Poin	2	3	1

Tabel 20 merangkum hasil perbandingan kinerja ketiga tipe pilar pada enam aspek analisis. Pilar Ganda memperoleh total 3 poin dengan keunggulan pada aspek perilaku struktur, stabilitas geser, dan stabilitas guling. Pilar Tunggal memperoleh 2 poin dengan keunggulan pada aspek perilaku tekuk dan daktilitas. Pilar Dinding hanya memperoleh 1 poin pada aspek Persyaratan $P-\Delta$. Berdasarkan rekapitulasi tersebut, Pilar Ganda merupakan tipe pilar dengan kinerja paling baik dan paling efisien secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan menentukan tipe pilar yang paling efisien dan memiliki kinerja terbaik di antara pilar kolom tunggal, kolom ganda, dan dinding untuk diterapkan pada Jembatan Nasional Pakem-Kalasan STA. 37+417, sekaligus memvalidasi keandalan desain eksisting yang menggunakan pilar kolom ganda. Hasil analisis menunjukkan kesesuaian dengan tujuan tersebut, di mana pada aspek perilaku struktur Pilar Ganda menerima gaya dalam terkecil ($P_u = 26.669,37$ kN; $V_u = 7.855,38$ kN; $M_u = 21.172,36$ kNm) dibandingkan Pilar Tunggal ($P_u = 38.300,82$ kN; $V_u = 12.151,27$ kN; $M_u = 107.341,37$ kNm) dan Pilar Dinding ($P_u = 42.453,95$ kN; $V_u = 16.635,24$ kN; $M_u = 155.793,01$ kNm). Pada aspek stabilitas, Pilar Ganda juga unggul dengan faktor keamanan geser sebesar 3,916 (arah x) dan 3,441 (arah y), serta faktor keamanan guling sebesar 4,776 (arah x) dan 9,434 (arah y), yang keduanya jauh melampaui syarat minimum SNI 8460:2017 (SF geser $\geq 1,5$ dan SF guling $\geq 2,0$). Dengan demikian Pilar Ganda unggul pada tiga dari enam aspek yang ditinjau (perilaku struktur, stabilitas geser, dan stabilitas guling) sehingga terbukti sebagai tipe pilar paling efisien sekaligus memvalidasi kelayakan desain eksisting. Adapun Pilar Tunggal unggul pada aspek perilaku tekuk dengan rasio kelangsingan terkecil pada arah transversal ($\lambda_x = 17,39$) dan aspek daktilitas di luar sendi plastis ($\psi_s = 0,01144$ pada arah x dan $0,01353$ pada arah y), sedangkan Pilar Dinding hanya unggul pada aspek persyaratan $P-\Delta$ dengan perpindahan terkecil ($\Delta x = 0,0016$ m; $\Delta y = 0,00$ m). Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan mempertimbangkan aspek efisiensi biaya dan konstruktabilitas ketiga tipe pilar, melakukan analisis dinamik riwayat waktu (time history) atau pushover nonlinier guna memperoleh gambaran perilaku struktur yang lebih mendekati kondisi aktual saat gempa besar khususnya karena Pilar Dinding menunjukkan rasio kapasitas lentur yang mendekati batas (0,97). Kemudian mengkaji variasi bentuk penampang lain seperti penampang lingkaran atau *stadium/obround section* untuk memperkaya pemahaman mengenai pengaruh geometri penampang terhadap kekuatan dan efisiensi tulangan pilar jembatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. S. Ahmad, "Dampak Pembangunan Jalan Tol Trans Jawa terhadap Pertumbuhan Ekonomi di Jawa Tengah," *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Pembangunan*, vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2022, doi: 10.29244/jekp.11.1.2022.1-18.
- [2] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Rencana Pengembangan Infrastruktur Wilayah D.I. Yogyakarta 2025–2034*. Jakarta, Indonesia: Kementerian PUPR, 2024.
- [3] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Surat Edaran Nomor 06/SE/Db/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2021.
- [4] M. Jamal, M. J. Alkas, and S. Yusuf, "Analisa perbandingan struktur pilar jembatan dengan tipe satu kolom dan dua kolom," *Jurnal SIPILsains*, vol. 8, no. 2, pp. 11–22, 2018.
- [5] I. P. Rahardjo, Chomaedhi, and Y. Hanifah, "Studi perbandingan kinerja pier jembatan tipe portal dengan tipe dinding," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 15–19, 2019.
- [6] Direktorat Jenderal Bina Marga, *Surat Edaran Nomor 06/SE/Db/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan*.

- Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2021.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *Pembebanan untuk Jembatan*, SNI 1725:2016. Jakarta, Indonesia: BSN, 2016.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, SNI 2847:2019, Pasal 6.2.5. Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa*, SNI 2833:2016, Pasal 6.5. Jakarta, Indonesia: BSN, 2016.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, SNI 2847:2019, Pasal 25.7.3.3. Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, SNI 8460:2017, Pasal 10.2.5.3. Jakarta, Indonesia: BSN, 2017.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, SNI 8460:2017, Pasal 10.2.5.3. Jakarta, Indonesia: BSN, 2017.