

## RESPON PENDOPO JOGLO YOGYAKARTA TERHADAP GETARAN GEMPA BUMI

**Bisatya W. Maer**

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Arsitektur, Universitas Kristen Petra - Surabaya

### ABSTRAK

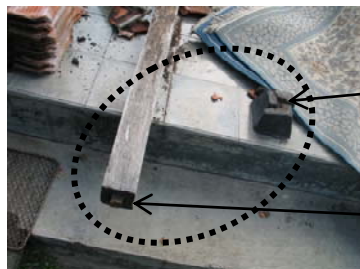
Dua buah bangunan Pendopo Joglo di Yogyakarta pada gambar 1A dan 1B mengalami kerusakan berbeda setelah kejadian gempa bumi bulan Mei 2006. Pada Pendopo Joglo 1A sokoguru patah tepat dibawah sunduk-kili dan bangunan runtuh, sedangkan pada pendopo joglo 1B sokoguru bergeser posisinya pada tumpuan umpak, tapi bangunan tidak runtuh. Perbedaan struktur kedua bangunan terletak pada sistem tumpuannya, yaitu Pendopo Joglo 1A menggunakan tumpuan sendi berupa pen dan lubang di kaki sokogurnya, sedangkan pada pendopo joglo 1B sokoguru hanya diletakkan diatas umpak sehingga dapat bergeser apabila digetarkan gempa. Pergeseran ini memberikan sifat meredam getaran gempa yang dapat dipelajari dari teknologi *base-isolator*. Tulisan ini bukan sebuah penelitian yang didasarkan pada fakta lapangan, tapi berisi analisis tentang perbedaan respon kedua bangunan terhadap getaran gempa akibat adanya perbedaan sifat tumpuan. Analisis dalam tulisan ini didasarkan pada analisis beban gempa statik ekuivalen<sup>(2)</sup> dan dibahas secara kualitatif

**Kata kunci:** gempa, Pendopo Joglo, sistem tumpuan, repon struktur, peredaman.

### ABSTRACT

After May 2006 earthquake the two Pendopo Joglo buildings in Yogyakarta, as displayed in figure 1A and 1B, were showed different failures. In Pendopo Joglo 1A, the sokoguru was broken right under the sunduk-kili causing the building to collapse. On the other hand, in Pendopo Joglo 1B case, the sakaguru was slipped but still remained on its position on the umpak so the building did not collapse. The structure differences between the two buildings were the support system used for each building. Pendopo Joglo 1A used pen and hole in the sokoguru base to act as pin joint support, while in Pendopo Joglo 1B, the sokoguru was only placed on the umpak, so it could slip if the earthquake shook it. The slip (as in 1B case) restrained the earthquake vibration as could be learned in base isolator technology. This writing is not a study based on field observation but an analysis about the two buildings different responses to the earthquake vibration which was caused by the different support character. This analysis is based on Static Equivalent Earthquake Load Analysis and is using qualitative method.

**Keywords:** earthquake, Pendopo Joglo, support system, structural responses, damping.



Lubang pen pada umpak

Pen kayu pada dasar sokoguru

Sumber: Foto koleksi pribadi Maria Hidayatun (2006)

**Gambar 1A. Pendopo joglo pasca gempa dengan tumpuan diangker pada umpak**



Sumber: Foto koleksi pribadi Maria Hidayatun (2006)

**Gambar 1B. Pendopo joglo pasca gempa dengan tumpuan tanpa angker**

### GEMPA DAN RESPON BANGUNAN

Kulit bumi terdiri dari kurang lebih 10 lempeng tektonik yang masing masing lempeng bergerak secara tidakseragam dengan kecepatan 2 – 5 cm per tahun\*. Pertemuan antar lempeng disebut dengan patahan yang terdiri dari material yang lebih lemah dari material lempengnya. Akibat pergerakan lempeng yang tidak seragam dan terjadi terus menerus, maka terkumpul energi potensial yang makin lama makin besar pada material patahan, sehingga terjadi pengekangan tegangan-tegangan maupun regangan-regangan pada material patahan tersebut yang makin lama makin besar. Apabila tegangan-tegangan dan regangan-regangan tersebut meningkat sangat tinggi sehingga melampaui kekuatan batas material patahan, maka terjadilah keruntuhan material patahan tersebut dan terjadi pelepasan sebagian atau seluruh energi potensial yang sudah lama terkekang berbentuk gelombang gempa yang merambat kesemua arah dan menghasilkan getaran gempa bumi pada permukaan tanah. Semakin kuat material didaerah patahan, maka semakin lama pengekangan energinya sehingga semakin besar energi gempa yang dilepaskan. Oleh karena itu gempa yang punya waktu ulang sangat panjang dikelompokkan sebagai gempa besar, sedangkan gempa dengan waktu ulang yang pendek sebagai gempa kecil.

Ada dua komponen getaran gempa bumi, yaitu pada arah horisontal dan arah vertikal. Komponen getaran gempa bumi yang dominan terhadap respon bangunan adalah komponen getaran pada arah horisontal, sedangkan komponen getaran gempa vertikal bisa berpengaruh pada komponen-komponen

struktur tertentu dan benda-benda non struktural yang ada didalam bangunan.

Waktu getar (T) dari getaran gempa selalu berubah-ubah secara dinamis, makin lama waktu getar semakin pendek sampai akhirnya getaran gempa berhenti. Perubahan waktu getar akan mengakibatkan respon struktur bangunan juga berubah-ubah membentuk ragam-getar yang berbeda-beda. Ragam getar pertama yaitu gerakan dinamis struktur yang menyerupai gerakan pendulum bolak-balik dengan waktu getar panjang dan mengakibatkan simpangan horisontal terbesar pada puncak struktur (gambar 2a). Pada suatu saat bila waktu getar memendek, ragam getar berubah menjadi ragam getar ke-2, pada ragam getar ini terjadi simpangan horisontal yang besar ditengah dan di puncak struktur (gambar 2b), besarnya simpangan pada ragam getar ke-2 ini lebih kecil dari ragam getar pertama. Pada saat-saat berikutnya waktu getar memendek lagi dan ragam getar berubah ke ragam getar ke-3 dan seterusnya sampai getaran pada bangunan berhenti.

Getaran gempa menggeser pondasi bangunan dan getarannya merambat ke-struktur atas mengakibatkan perilaku dinamis pada struktur bangunan. Respon bangunan terhadap getaran gempa berbeda beda, untuk bangunan tertentu ragam getar pertama dominan, pada bangunan yang lain ragam lebih tinggi yang dominan.

Perambatan getaran ke-struktur atas akan mengakibatkan terjadinya gaya-gaya yang memaksa komponen-komponen struktur bekerja menahan gaya-gaya tersebut melalui tegangan-tegangan didalam material komponen-komponen struktur maupun join-join nya. Gaya-gaya dan momen yang bekerja pada sistem struktur bangunan akan ditahan oleh komponen-komponen maupun join-join sesuai dengan sifat tiap joinnya. Pada join yang kaku akan bekerja gaya normal, gaya geser dan momen lentur, sedangkan pada join sendi bekerja gaya normal dan gaya geser saja.

\* Bolt, Bruce A. Engineering Seismology Dalam Yousef Bozorgnia & Vitelmo V. Bertero (Eds) *Earthquake Engineering*, bab 2



Gambar 2a.  
Ragam getar pertama



Gambar 2b.  
Ragam getar kedua

Simpangan horisontal  $\Delta_1$  Pada ragam getar pertama lebih besar dari simpangan horisontal  $\Delta_2$  pada ragam getar kedua dan seterusnya sampai getaran berhenti.

### ANALISIS BEBAN GEMPA STATIK EKIVALEN.

Beban gempa statik ekuivalen adalah beban statik yang dianggap seolah-olah bekerja pada struktur secara aktif, padahal sebenarnya beban tersebut belum ada sebelum digetarkan gempa bumi.

SNI 03-1762-2002<sup>(1)</sup> menetapkan untuk bangunan yang "beraturan"\* direkomendasikan penggunaan "analisis beban gempa statik ekuivalen", yaitu cara analisis statik 3 dimensi (3D) linier pada struktur bangunan yang "beraturan" yang praktis berperilaku sebagai struktur 2 dimensi (2D). Karena keteraturannya maka apabila bangunan digetarkan, pada salah satu sumbu utamanya akan dominan gerak translasi ragam getar pertama saja sedangkan ragam getar ke-2 akan dominan dalam gerak translasi pada arah sumbu utama yang lain. Dengan demikian struktur 3D pada bangunan yang "beraturan" akan berperilaku sebagai struktur 2D dalam masing-masing arah sumbu utamanya. Dan karena adanya perbedaan tingkat ragam getar pada kedua arah sumbu maka respon dinamik struktur hanya ditentukan oleh ragam getar pertama dimana bekerja gaya geser dasar gempa terbesar, dan dapat ditampilkan sebagai akibat dari beban gempa statik ekuivalen. Apabila bekerjanya beban geser dasar gempa tidak sejajar salah satu sumbu utama, maka perilaku 3D diantisipasi dengan memasukkan beban gempa dasar penuh pada sumbu yang ditinjau dan 30% pada sumbu yang tegak lurus.

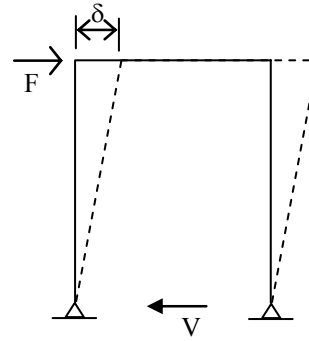
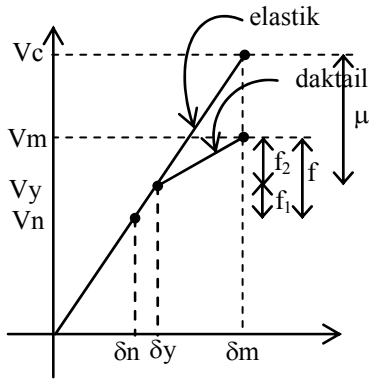
Bangunan Pendopo Joglo dengan "konfigurasi-nya" yang sederhana dapat dikelompokkan "beraturan" seperti ketentuan dalam pasal 4.2.1 SNI 03 - 1762 - 2002. Maka untuk pembahasan selanjutnya dilakukan analisis respon bangunan berdasarkan analisis beban statik ekuivalen dengan meninjau struktur secara 2D pada satu arah sumbu utama.

Gaya gempa menggeser pondasi dengan percepatan tertentu, dan bangunan merespon getaran tersebut berdasarkan sifat strukturnya. Berat massa mengakibatkan bekerjanya gaya inerti yang arahnya berlawanan dengan arah datangnya gaya gempa, kekakuan struktur mengakibatkan timbulnya gaya pegas dan kecepatan mengakibatkan terjadi gaya redam. Peredaman adalah mekanisme yang menguntungkan bagi struktur bangunan. "Peredaman elastik" dihasilkan oleh sifat lentur-elastik struktur, sedangkan "peredaman plastis" dihasilkan oleh sifat daktil struktur.

Konsep analisis beban statik ekuivalen didasarkan pada filosofi perencanaan struktur: bangunan tidak rusak sama sekali terhadap getaran gempa kecil, boleh rusak terhadap getaran gempa besar tapi tidak roboh. SNI 03 - 1762 - 2002 menetapkan gempa rencana dengan periode ulang 500 tahun dan umur bangunan 50 tahun, maka resiko terjadinya gempa rencana adalah 10%. Dengan suatu tingkat daktilitas tertentu struktur akan melakukan pelelehan (pembentukan sendi plastis) pertama apabila terjadi beban yang melampaui kekuatannya akibat pengaruh gempa rencana.

Struktur yang elastik memikul beban seluruh gempa rencana ekuivalen  $V_c$ , sedangkan struktur yang daktil melakukan pelelehan pertama pada saat beban sebesar  $V_y = V_c / \mu$  Faktor daktilitas  $\mu$  mereduksi beban gempa, sehingga struktur menerima beban yang lebih kecil dari beban gempa rencana. Semakin daktil sebuah struktur maka reduksi beban gempa semakin besar, dalam SNI 03 - 1762 - 2002 untuk struktur yang daktil penuh  $\mu = 5,3$ , sedangkan struktur yang berperilaku elastik penuh  $\mu = 1$ . Struktur bangunan direncanakan terhadap beban gempa nominal statik ekuivalen  $V_n$ .  $V_n$  ini lebih kecil dari  $V_y$  karena direduksi dengan faktor kuat lebih  $f_1$ . Faktor kuat lebih ini diberikan karena dalam kenyataannya selalu terjadi kekuatan unsur-unsur struktur yang berlebihan karena jumlah tulangan atau profil yang terpasang lebih besar dari yang diperlukan.

\* Menurut pasal 4.2.1 SNI 03 - 1762 - 2002 bangunan yang beraturan adalah yang memenuhi beberapa ketentuan: denah persegi panjang tanpa tonjolan, denah tidak ada coakan sudut, sistem struktur terbentuk oleh subsistem-subsistem yang saling tegak lurus, ketentuan lainnya lebih diperuntukkan bangunan bertingkat banyak.



**Gambar 2c Diagram beban-simpangan struktur bangunan**      **Gambar 2d simpangan pada portal**

$V_c$  = beban gempa rencana (500 tahunan)  
 $V_y$  = Beban gempa batas leleh pertama  
 $V_n$  = beban gempa nominal  
 $V_m$  = beban gempa maksimal (ambang runtuh)

Rumus beban geser dasar nominal statik ekuivalen ( $V_n$ ):

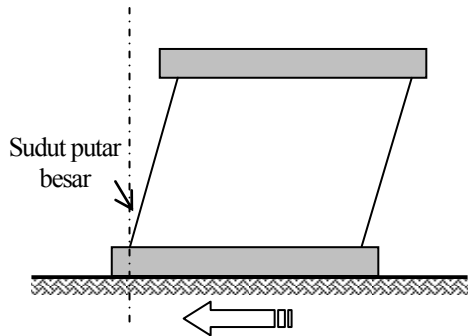
$$V_n = (C_1 \cdot I \cdot W_t / R) \cdot W_t$$

Beban geser dasar kemudian didistribusikan menjadi beban gempa nominal statik ekuivalen ( $F$ ) pada seluruh tinggi bangunan dengan rumus:

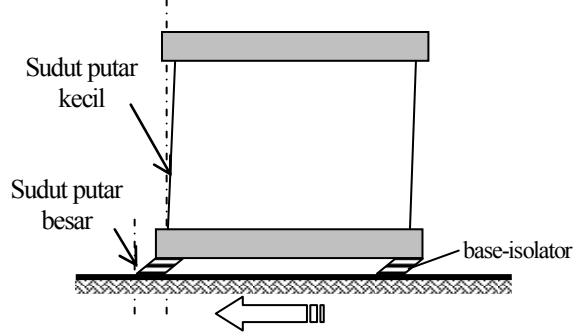
$$F_i = (W_i \cdot z_i / \sum W_i \cdot Z_i) \cdot V_n$$

Catatan:  $V_n$  = beban geser dasar nominal statik ekuivalen,  $C_1$  = nilai faktor respon gempa yang terkait dengan waktu getar alami fundamental  $T_1$ ,  $I$  = faktor keutamaan atau kategori bangunan.  $R$  = faktor reduksi gempa yang berhubungan dengan daktilitas struktur,  $W_t$  = berat total bangunan,  $F_i$  = beban gempa nominal statik ekuivalen pada lantai ke- $i$ ,  $W_i$  = berat lantai ke- $i$  termasuk beban hidup,  $z_i$  = tinggi lantai ke- $i$  sampai pada penjepitan lateral.

Dari rumus  $F_i$  diatas nampak bahwa untuk bangunan satu lantai, besarnya beban gempa nominal statik ekuivalen ( $F_n$ ) sama dengan beban geser dasar nominal statik ekuivalen ( $V_n$ ), bekerjanya  $F_n$  pada titik berat bangunan.



**Gambar 3a. Sistem dengan tumpuan terikat pada pondasi**



**Gambar 3b. Sistem dengan base-isolator**

Dalam tulisan ini, analisis beban gempa statik ekuivalen diatas dimanfaatkan bukan untuk menghitung beban gempa nominal tapi pemahamannya dimanfaatkan untuk menganalisis respon struktur bangunan pendopo joglo terhadap beban gempa.

### BASE-ISOLATOR

Selain peredaman yang mengandalkan sifat lentur-elastis atau daktilitas struktur bangunan ada peredaman lain dengan menggunakan peralatan mekanis, antara lain dengan menggunakan *base-isolator* (isolasi-dasar). Ada beberapa macam sistem base-isolator, yang dibahas dalam tulisan ini adalah isolator dengan sistem slip. Pada prinsipnya *base-isolator* berusaha "memisahkan" bangunan dari gerakan horisontal pondasi dengan memasang peralatan *isolator* diantara kolom dan pondasi. *Base-isolator* mempunyai sifat yang sangat fleksibel terhadap gaya horisontal, tapi mampu menahan berat bangunan dengan baik. Dengan sifat sangat fleksibel tersebut maka pada saat gempa menggeser pondasi, base-isolator melakukan simpangan horisontal bolak-balik yang besar, dengan demikian energi getaran gempa

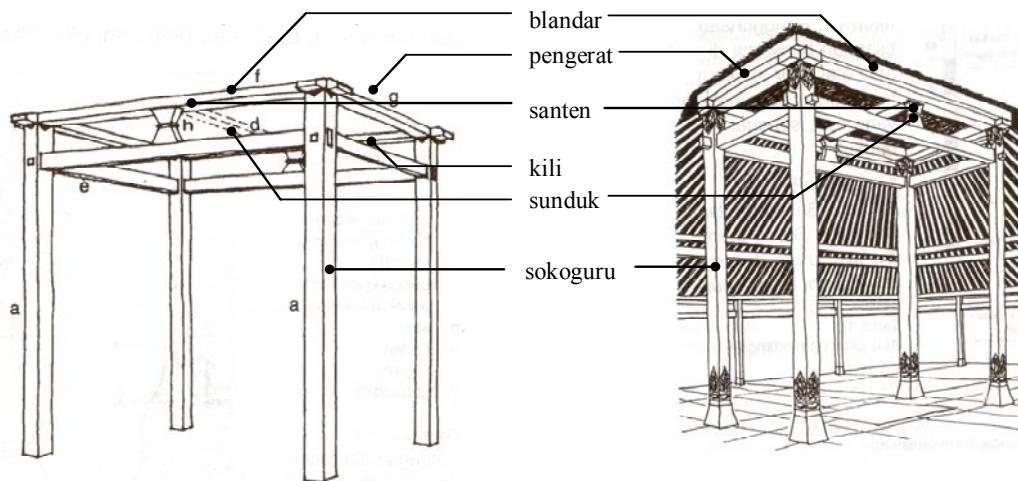
dari tanah dialihkan oleh isolator sehingga tidak merambat ke struktur bangunan.

Getaran yang datang paling awal mengakibatkan terjadinya ragam getar pertama. Pada struktur yang di-isolasi, ragam getar pertama ini menyebabkan deformasi yang besar hanya pada sistem isolasinya (*base-isolator*) saja, sedangkan struktur bangunan mengalami deformasi yang sangat kecil (gambar 3a dan 3b).

### SISTEM STRUKTUR PENDOPO JOGLO

Stabilitas terhadap beban horisontal Pendopo Joglo berpusat pada sistem struktur bangunan sektor guru\*, beban horisontal sepenuhnya didukung oleh struktur dari sektor guru tersebut. Jadi untuk mempelajari respon struktur bangunan pendopo terhadap beban horisontal dapat difokuskan pada perilaku struktur bangunan sektor guru saja.

#### Anatomi:



Sumber: Frick, Heinz (1997), Pola Struktural dan teknik bangunan di Indonesia, halaman 116

**Gambar 4. Struktur bangunan sokoguru**

Dari gambar 5a dan 5b nampak bahwa join antara sunduk/kili dengan soko-guru adalah pen dan lubang yang dipasak. Join seperti ini bisa bertahan terhadap rotasi akibat momen dan cenderung bersifat kaku<sup>(3)</sup>. Mengenai join sokoguru dengan sunduk dan kili ini ada hal yang bisa diteliti lebih jauh yaitu adanya sifat kembang-susut kayu. Sifat ini memungkinkan berkurangnya keketatan sambungan pen-lubang tersebut sehingga kemungkinan join bisa

berputar dengan sangat terbatas terhadap momen yang bekerja. Apabila benar terjadi perputaran join tersebut maka momen yang ditahan oleh join menjadi berkurang, dan ini malah menguntungkan bagi struktur karena sebagian gaya gempa "terlepas". Untuk pembahasan selanjutnya dianggap join tersebut benar-benar kaku. Santen yang ada ditengah bentang sunduk yang menyatukan sunduk dengan blandar menambah kekakuan sokoguru atas karena perputaran join sokoguru dengan sunduk/kili dan, khususnya pada arah bentang yang lebar terhambat oleh perlawanan geser santen (lihat juga gambar 6b).

Di atas blandar/pengerat terdapat tumpang sari yang terdiri dari tumpukan balok-balok kayu membentuk bidang kerucut terbalik yang masif sangat kaku dan berat. Panjang bagian soko-guru yang berada diatas sunduk/ kili ("sokoguru atas", tinggi  $h_1$ ) jauh lebih pendek dibanding bagian kolom sokoguru yang berada dibawah sunduk/ kili ("sokoguru bawah", tinggi  $h_2$ ), misalnya pada bangunan yang ada dalam gambar 1b perbandingan  $h_1 : h_2$  kurang lebih  $1 : 8$ , sehingga kekakuan

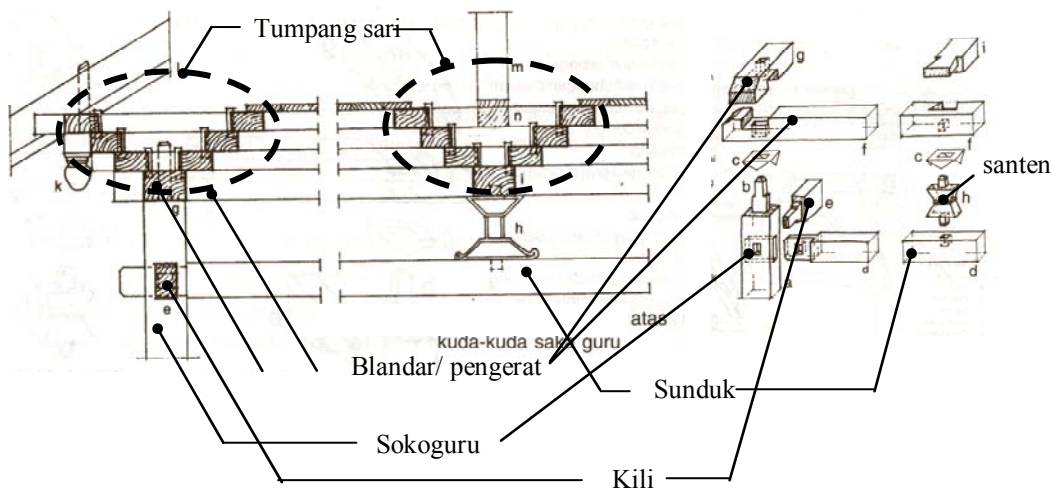
sokoguru  $h_1$  kurang lebih 8 kali lebih besar dari sokoguru  $h_2$  (gambar 6a).

### TUMPUAN SOKOGURU

Sokoguru diletakkan diatas umpak. Sokoguru pada gambar 1a diletakkan dengan ikatan pen-lubang, sokoguru pada gambar 1b diletakkan tanpa ikatan pen-lubang.

Tumpuan dengan ikatan pen-lubang pada pendopo joglo ini merupakan tumpuan sendi, tumpuan ini bisa bekerja menahan gaya normal tekan dan gaya geser horisontal.

\* Istilah sektor guru diadopsi dari tulisan Joseph Priotomo dalam Pengkonstruksian Sektor Guru dari Griya Jawa: Tafsir Atas Kawruh Kalang, Demensi Desember 2005.



Sumber: Frick, Heinz (1997), Pola Struktural dan teknik bangunan di Indonesia, halaman 118

**Gambar 5a: Detil tumpang sari, sokoguru, blandar/pengerat, sunduk/kili, santen**

Sumber: Frick, Heinz (1997), Pola Struktural dan teknik bangunan di Indonesia, halaman 117

**Gambar 5b: Detil join sokoguru, blandar/pengerat, sunduk/kili, santen**

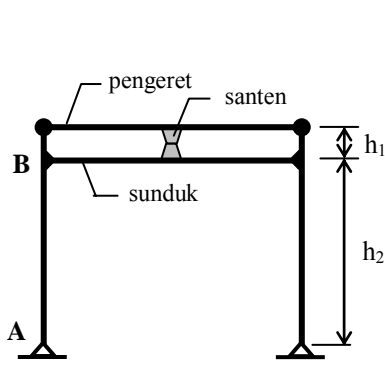
Bagaimana dengan tumpuan tanpa ikatan pen-lubang? Dalam pemahaman struktur bangunan, tumpuan yang hanya diletakkan dan hanya mampu bekerja menahan gaya normal yang tegak lurus pada bidang-temu nya (*interface*) di-idealisasikan sebagai tumpuan rol. Selain itu dalam mekanika gaya dipahami bahwa bidang-temu diantara dua benda mempunyai kapasitas geser yang besarnya tergantung dari kekasaran kedua material dan gaya normal yang menekan bidang temu tersebut. Besarnya kapasitas geser maksimal menurut Dishongh (2001)<sup>(2)</sup>, dapat dihitung dengan rumus: koefisien geser dikalikan dengan gaya normal (N) yang bekerja tegak lurus pada bidang-temu tersebut. Besarnya koefisien gesek antara kayu dan beton sekitar 0.7, jadi apabila besarnya gaya geser gempa lebih besar dari pada  $0.7 \times N$  maka sokoguru akan tergeser, sedangkan apabila besarnya gaya geser gempa lebih kecil dari pada  $0.7 \times N$  tumpuan akan menahan gaya geser gempa dan bekerja sebagai "sendi" sebatas kapasitas gesek tumpuan tersebut menahan gaya geser horisontal. Oleh karena itu dalam pembahasan selanjutnya tumpuan ini disebut "sendi-terbatas", dimana besarnya gaya geser yang bisa ditahan oleh "sendi-terbatas" tergantung dari perbandingan antara besarnya kapasitas geser dibandingkan gaya geser yang bekerja. Apabila besarnya kapasitas geser lebih besar dari gaya geser maka tumpuan bersifat "sendi", sedangkan apabila besarnya kapasitas geser lebih kecil dari gaya geser maka tumpuan bersifat "rol".

## RESPON SISTEM STRUKTUR JOGLO 1A TERHADAP GETARAN GEMPA.

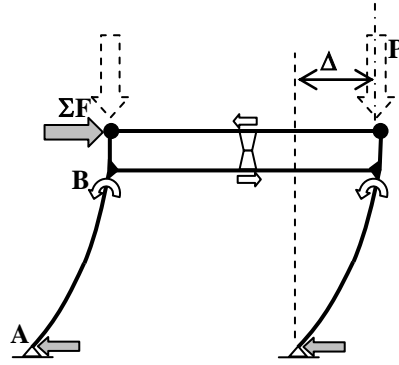
Pendopo Joglo dibangun dari konstruksi kayu dengan tumpuan sendi didasar soko guru, idealisasi strukturnya seperti gambar 6a. Seperti yang diuraikan diatas, pendopo joglo termasuk bangunan yang beraturan menurut SNI 03 - 1762 - 2002, struktur bangunannya berperilaku seperti struktur bangunan 2D dan respon dinamikanya ditentukan oleh respon ragam-getar pertamanya (gambar 2a, 6a s/d 6d).

Struktur bangunan sektor guru berperilaku seperti portal kaku yang mendapat beban gempa statik ekuivalen  $\Sigma F$  pada ujung atas sokogurunya.

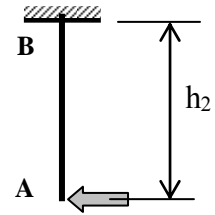
Untuk bentang lebar dari Sektor Guru, karena ditengah bentang sunduk terdapat santen yang menyatukan sunduk dengan blandar, maka santen tersebut memperkaku sokoguru atas ( $h_1$ ) seperti yang diuraikan didepan, akibatnya sokoguru atas relatif tidak terdeformasi akibat gaya geser horisontal (gambar 6c). Dengan kondisi seperti ini, maka sokoguru bawah ( $h_2$ ) dapat di idealisasikan sebagai kantilever vertikal pada saat menerima gaya geser horisontal dititik A ditumpu dengan jepitan dititik B (gambar 6d). Momen maksimal bekerja pada sokoguru bawah tepat dibawah sunduk/ kili dititik B (gambar 6c).



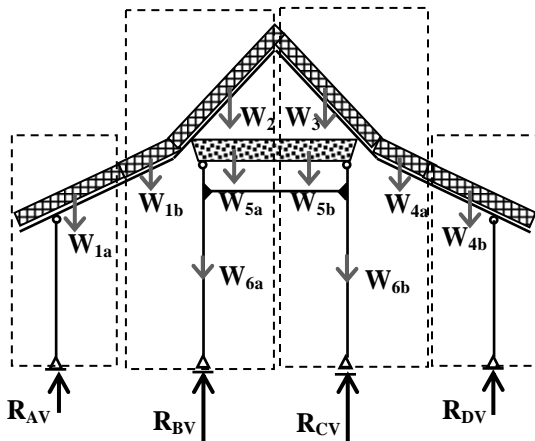
Gambar 6a. Idealisasi struktur bangunan Sektor Guru,  $h_2$  jauh  $> h_1$



Gambar 6b. Perilaku join kaku antara sokoguru dan mekanisme P-Δ

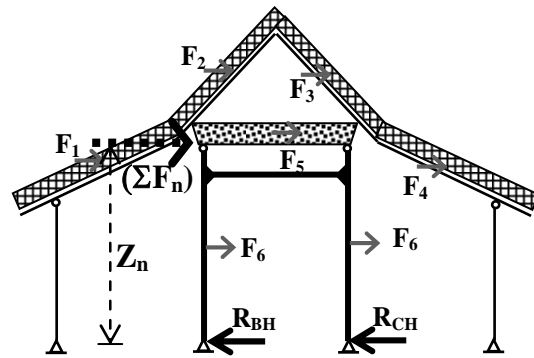


Gambar 6c. Idealisasi sokoguru sebagai struktur kantilever



Gambar 7a beban gravitasi pada sokoguru

Soko-guru dan soko-pengarak menerima beban gravitasi menurut luas tributary masing-masing



Gambar 7b beban gempa pada sokoguru

Massa atap seluruh bangunan dan tumpang sari menghasilkan beban gempa ( $\Sigma F_n$ ) yang harus ditahan oleh sokoguru

Distribusi beban gravitasi dan beban gempa lateral pada sokoguru –soko-guru dan sokopengarak-sokopengarak tidak sama. Dalam tinjauan terhadap beban gravitasi, beban atap dan tumpang sari diteruskan ke pondasi umpak berdasarkan masing-masing *tributary-area* dari sokoguru dan soko pengarak. Dalam gambar 7a beban mati untuk sokopengarak-sokopengarak adalah  $W_{1a}$ , beban untuk sokoguru-sokoguru adalah  $W_{1b} + W_2 + W_{5a} + W_{6a}$ . Sedangkan dalam tinjauan terhadap beban gempa, berat massa ( $W_t$ ) yang menentukan besarnya beban geser dasar gempa adalah beban dari tumpang sari dan dari berat seluruh atap bangunan, dalam gambar:  $W_1$  s/d  $W_6$  (gambar 7b). Hal ini disebabkan seluruh gaya geser gempa didukung hanya oleh struktur bangunan sektor guru saja.

Pada struktur pendopo joglo ini besarnya beban gempa statik ekuivalen sama dengan beban geser dasar gempa statik ekuivalen, yaitu  $\Sigma F_n = V = (C_1 \cdot I \cdot W_t / R) \times W_t$ .

Titik berat struktur bangunan sektor guru berada kurang lebih di ujung atas sokoguru karena berat massa berada diatas, maka besarnya momen maksimal pada sokoguru  $M_{maks} = \Sigma F_n \times (h_1 + h_2)$

Karena struktur Sektor Guru berperilaku sebagai portal kaku dimana join sokoguru dengan sunduk dan kili merupakan join kaku, maka seluruh beban gempa ditahan oleh struktur Sektor Guru dengan perilaku elastik penuh, kalau dilihat dalam diagram beban-simpangan pada gambar 2c ada pada posisi Vc. Apabila terjadi getaran gempa yang besar ( $\Sigma F_n$  besar), maka sokoguru akan mengalami simpangan horisontal bolak-balik yang besar, momen serta gaya geser yang bekerja pada sokoguru juga besar.

Simpangan besar pada sokoguru bisa menimbulkan mekanisme P-Δ yaitu terjadinya tambahan momen eksentris  $M_e = P \times \Delta$  pada sokoguru karena garis kerja gaya gravitasi diujung atas sokoguru bergeser terlalu jauh terhadap tumpuan didasar sokoguru (gambar 6b).

## RESPON SISTEM STRUKTUR JOGLO 1B TERHADAP GETARAN GEMPA.

Sistem struktur joglo 1B adalah struktur rangka kaku dengan tumpuan "sendi-terbatas", gaya geser yang diterima sokoguru sebatas kapasitas-gesek bidang temu antara sokoguru dengan umpak. Bila beban geser dasar  $V$  lebih kecil dari kapasitas-gesek tersebut berarti tumpuan masih bersifat sendi, maka respon struktur bangunan sama dengan respon struktur pendopo joglo 1A.

Apabila besarnya gaya geser dasar gempa ( $V$ ) melampaui kapasitas-gesek pada bidang temu sokoguru dengan umpak, maka sokoguru bergeser dari posisi asalnya. Mekanisme pergeseran posisi sokoguru ini bisa dibandingkan dengan mekanisme yang terjadi pada *base-isolator* yang menggunakan sistem slip. Keduanya memberikan dampak meredam yang sama, yaitu "terlepasnya" energi gempa yang "terkunci" pada bidang-temu, sehingga sebagian dan gaya geser yang merambat ke-struktur atas menjadi berkurang. Perilaku ini mengakibatkan simpangan horisontal struktur menjadi lebih kecil.

Gaya normal akibat beban gravitasi ( $N_1$ ) yang bekerja pada 4 buah soko-guru adalah beban mati dari atap sesuai *tributary area* untuk semua sokoguru, yaitu:  $W_{1b} + W_2 + W_3 + W_{4a} + W_{5a} + W_{5b} + W_{6a} + W_{6b}$ ; (gambar 7a). Dalam hal ini  $W_{1a}$  dan  $W_{4b}$  tidak termasuk didalamnya.

Seperti pada struktur pendopo joglo 1A, besarnya beban gempa statik ekuivalen sama dengan beban geser dasar gempa statik ekuivalen, yaitu  $\square F_n = V = (C_{1,I} \cdot W_t / R) \times W_t$ .

SNI 03 - 1762 - 2002 juga menetapkan faktor respon gempa vertikal ekuivalen sebesar:  $C_v = \psi A_0 \cdot I$ . Dalam persamaan ini faktor reduksi gempa sudah diperhitungkan. Kalau diperhitungkan  $(\psi A_0) = \pm 0,2 \cdot C_1^*$ , jadi besarnya faktor respon gempa vertikal kurang lebih sebesar  $0,2 \times$  faktor respon gempa horisontal  $C_v = 0,2 \cdot C_1$ .

Besarnya komponen gaya gempa vertikal  $N_2 = 0,2 \cdot C_1 \cdot W_t$ . Komponen gaya vertikal ( $N_2$ ) ini pada saat bekerja keatas akan mengurangi besarnya gaya normal tekan pada sokoguru ( $N_1$ ), sehingga gaya normal tekan pada sokoguru =  $N_1 - N_2$ . Kapasitas gesek bidang-temu sokoguru dengan umpak ikut berkurang dengan berkurangnya gaya normal tekan

tersebut. Bergesernya sokoguru dari umpak bisa terjadi apabila:

$$V > 0,7 \times (N_1 - N_2)$$

Catatan: 0.7 adalah koefisien gesek antara kayu dengan beton<sup>(1)</sup>.

Tidak seperti yang terjadi pada *base-isolator*, slip yang terjadi pada soko-guru tidak bisa bekerja bolak-balik ia akan berhenti pada saat  $V < 0,7 \times (N_1 - N_2)$  dimanapun posisinya dan tidak bisa kembali keposisi asalnya.  $V$  yang menggeser sokoguru ini terjadi pada ragam getar pertama yaitu pada saat getaran gempa baru datang. Dengan berhentinya slip sokoguru ini maka tumpuan menjadi "sendi" dan perilakunya kembali seperti struktur pendopo joglo 1A, tapi dengan beban gempa yang lebih kecil.

Pergeseran sokoguru ini memberi dampak meredam yang mirip dengan perilaku slip pada *base-isolator*, yaitu mengurangi besarnya beban gempa yang menimpa struktur bangunan. Pergeserannya bisa dibandingkan dengan simpangan horisontal yang terjadi pada *base-isolator*. Perbedaan diantara keduanya terletak pada teknologinya, *base-isolator* merupakan peralatan isolasi yang direncanakan dan dikerjakan di pabrik dengan teknologi dan ketelitian yang tinggi, ia punya kemampuan untuk melakukan simpangan horisontal bolak-balik, ratio perbandingan kapasitas dukung dengan kekakuan horisontalnya terkontrol melalui perancangan yang cermat dan setelah getaran gempa berhenti *base-isolator* mampu kembali ke-posisi awalnya. Sedangkan tumpuan "sendi-terbatas" pada sokoguru ini tidak bekerja bolak-balik, tidak punya kemampuan kembali keposisi asalnya.

## KESIMPULAN

Struktur bangunan pendopo joglo 1A ditumpu dengan sendi pada umpak, merespon beban gempa dengan perilaku elastik penuh.

Tumpuan struktur bangunan pendopo joglo 1B hanya diletakkan tanpa ikatan pen-lubang dan bersifat "sendi terbatas". Struktur 1B merespon getaran gempa dengan perilaku slip pada tumpuan sokoguru yang berdampak meredam getaran gempa, setelah slip berhenti struktur bangunannya berperilaku elastik penuh tapi dengan beban gempa yang sudah menjadi kecil.

## DAFTAR PUSTAKA

Bandan Standardisasi Nasional. *Tata Cara Prerencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, SNI 03 - 1762 - 2002.

\* Dalam SNI 03 - 1762 - 2002, koefisien  $\psi$  untuk wilayah 3 = 0,5 (tabel 7),  $A_0$  adalah percepatan muka tanah.  $A_0$  untuk tanah sedang diwilayah 3 = 0,23 (tabel 5), jadi  $(\psi \cdot A_0) = 0,5 \times 0,23 = 0,115$ ;  $C_1 = 0,55$  (tabel 6), maka  $(\psi \cdot A_0) = 0,209 \cdot C_1$ . Kalau diperhitungkan dengan cara yang sama untuk tanah lunak dan tanah keras didapat  $(\psi \cdot A_0) = 0,2 \cdot C_1$



- Dishongh, Burl E., 2004, *Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur*, (Pariatmono), Penerbit Erlangga.
- Frick, Heinz. 1997, *Pola Struktural dan Teknik Bangunan di Indonesia*.
- Kelly, M. James. 2004, *Seismic Isolation*. Dalam Yousef Bozorgnia & Vitelmo V. Bertero (Eds) *Earthquake Engineering*. hal 11-1 s/d 11-30, CRC Press LLC.
- Lindenburg, Michael R., 2006, Baradar, Majid. *Seismic Design of Building Structures*, USA, Professional Publications, Inc.
- Ronald, Arya, Santosa M., Soeleman S., 1987, *Joglo Buildings, a Study of Construction, Proportion & Structure of Royal House*, Department of Architecture Engineering Faculty – UGM, Yogyakarta.
- Skinner, R., Robinson W.H, Mc Verry, G.H. 1993, *An Introduction to Seismic Isolation*, England, John Willey & Sons.