

Pengaruh Gaya Gempa Terhadap Kestabilan Struktur Pola Susun Batu Candi

Oleh
Bramantara, ST
Staff Balai Konservasi Peninggalan Borobudur

Pendahuluan

Benda Cagar Budaya merupakan salah satu kekayaan budaya Indonesia, kekayaan tersebut mengandung aspek ilmu pengetahuan yang sangat besar. Dalam perkembangannya Benda Cagar Budaya mengalami berbagai macam proses yang sebagian besar dipengaruhi oleh perubahan kondisi alam. Dengan adanya fenomena alam yang berupa gempa maka perlu di kaji mengenai pola susun batu yang ada kaitannya dengan stabilitas struktur benda cagar budaya dalam hal bangunan candi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari terbentuknya pola susun batu dengan model yang bermacam-macam terhadap kestabilan struktur bangunan candi yang dihasilkan

Pengamatan pola susun batu tersebut dilaksanakan pada candi-candi Hindu dan Budha di kawasan, Jawa Tengah, dan DIY (Candi Borobudur dan Kompleks Candi Prambanan)

Studi Pustaka

Secara analogi umum tanpa sebuah konsep yang rinci percobaan atas susunan beberapa lapis blok batu dan tanpa adanya perlakuan tambahan (tanpa tambahan perekat) maka pada posisi ini lapisan batu paling atas merupakan bagian yang paling peka terhadap getaran akibat pukulan atau guncangan. Sedangkan lapisan paling bawah merupakan bagian yang mendapat efek paling sedikit terhadap suatu deformasi.

Pernyataan dan kondisi di atas membuktikan bahwa berat suatu beban itu sendiri (adanya massa dan gravitasi) memberikan nilai kestabilan structural pada bangunan yang disusun tanpa perekat (**dry masonry**).

Prinsip Sebuah Kestabilan terbagi menjadi 5 bagian yaitu :

- **Strenght** (kekuatan) : beberapa hal yang dihasilkan dari faktor ini adalah : Tegangan lentur, tarik, dan tegangan geser dengan syarat tegangan yang dihasilkan tersebut < tegangan yang diijinkan
- **Stiffnesh** (kekakuan) : hasil yang

- diakibatkan adalah deformasi, lendutan dan displacement. Untuk mendapatkan angka aman maka nilai dari proses akibat tersebut harus < tegangan ijin yang terjadi "aman".
- **Serviceability** (aman dalam pemakaian dan dapat berfungsi sesuai dengan rencana).
- **Stability** (stabilitas) : beberapa hal yang diakibatkan meliputi : tegangan geser, tegangan akibat guling, **buckling**, bentuk, struktur (tidak runtuh) < tegangan ijin yang terjadi.
- **Comfortable** (nyaman).

Kondisi Kestabilan Struktur Pola Susun Batu

A. Candi Borobudur.

Batu penyusun Candi Borobudur terdiri dari Batuan Andesit dengan komposisi : Porositas : (21,6 – 51,3) % ; Berat Jenis Riil : 2,62 – 2,83 ; Kekerasan (skala Mohs) : 5 – 7 ; Kadar Air jenuh : 8,63 – 13,59 % ; Permeability : (0,6 – 12,7) darcys ; Massa padat terdiri dari mineral 31,01 – 63,55 % dan masa dasar 36,45 – 68,99 %

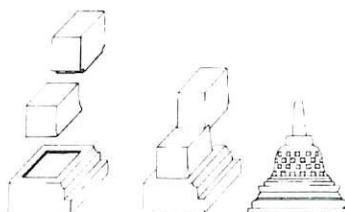


Jenis sambungan Batu di Candi Borobudur

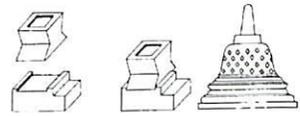
- Sambungan Batu Dengan Tipe Ekor Burung.



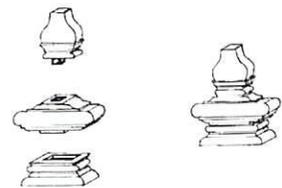
- Sambungan batu dengan tipe takikan



- Sambungan Dengan Tipe Alur Dan Lidah



- Sambungan dengan Tipe purus dan Lubang.

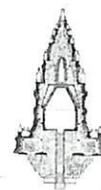


B. Kompleks Candi Prambanan

Jenis Batuan Kompleks Candi Pambanan.

Batuan Andesit ; Porositas : 29,4 % ; Berat Jenis Riil : 2,6 ; Kekerasan (skala Mohs) : 3-5 ; Kadar Air jenuh : 15,9 % ; Angka pori : 0,4 ; Densitas : 1,9 gr/cm³

Ukuran Batuan dan bentuk penampang Candi pada Kompleks Candi Prambanan cenderung mempunyai bentuk ramping menyerupai kerucut.



Jenis sambungan Batu pada Kompleks Candi Prambanan.

- Sambungan atas - bawah



- Sambungan Menyamping (kanan - kiri)



Hasil Studi

- Penggunaan Angkur pada sambungan Pemakaian angkur pada candi Borobudur tidak semuanya dipasang. Pemakaian angkur hanya pada bagian-bagian tertentu yang menopang gaya geser, guling lebih besar (pada bagian langkan bagian pojok), dan ikatan pada susunan antara satu batu dengan batu lainnya tidak menggunakan spesi/mortar. Berbeda dengan hal tersebut. Pada Candi Prambanan susunan ikatan antar satu batu dengan batu lainnya menggunakan angkur hampir pada semua batu luar (**outer stone**), dan pada nantinya diberikan spesi

C. Uji Laboratorium dan Experimen

Uji Kuat Tekan

Uji Kuat Tekan dilakukan di laboratorium Balai Konservasi Peninggalan Borobudur. Uji ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sampai sejauh mana kekuatan dari batuan yang diuji.

Bahan & Alat:

SAMPEL batu bentuk kubus 3 buah ukuran
 : (15x15x15) cm
 : (15,1x15x15) cm
 : (14,7x14,8x15) cm

SAMPEL batu bentuk silinder 3 buah ukuran

: (10,2 x 20,2) cm
 : (10,1 x 20,2) cm
 : (10,1 x 20,2) cm

Hasil Yang Diperoleh SILINDER

Kuat Tekan Sampel A = 63/81, 67 = 0,77 kN/cm²
 Kuat Tekan Sampel B = 110/80, 077 = 1,37 kN/cm²
 Kuat Tekan Sampel C = 197/80,077 = 2,46 kN/cm²

KUBUS

Kuat Tekan Sampel A = 610/225 = 2,711 kN/cm²
 Kuat Tekan Sampel B = 105/226,5 = 0,464 kN/cm²
 Kuat Tekan Sampel C = 395/217,56 = 1,826 kN/cm²

Uji Experimental dan Pemodelan Pola Susun Batu

Uji experimental ini dengan

membuat susunan batu sesuai pada pola susun batu candi asli kemudian dilakukan perlakuan geser dan guling terhadap pola susun tersebut

Bahan & Alat:

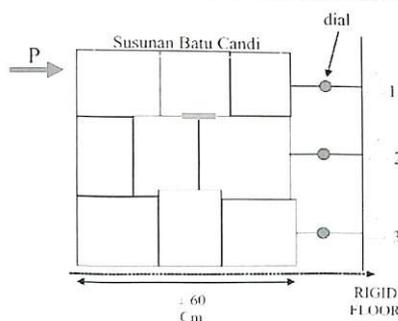
- Blok batu yang disusun dengan pola seperti pada candi (model pola susun)
- Dial (LVDT) dan data logger

Metode dan langkah Kerja :

- Pola susun blok batu tersebut diberi perlakuan dengan gaya geser arah horisontal, dengan tiga perlakuan beban horisontal.
- Data **logger** tersebut mencatat setiap besaran gaya yang bekerja dalam satuan kN dan besaran pergeseran susunan batu masing-masing lapis dalam satuan mm,
- Dari data pergeseran tersebut kita buat grafik pola pergeseran pada masing-masing interval beban,.

Uji Pergeseran

Uji Pergeseran Pola Susun Batu, pada beban 0 Kg, di atas pola susun batu tersebut tidak ditaruh beban
 Uji Pergeseran Pola Susun Batu, pada beban 100 Kg, di atas pola susun batu tersebut ditaruh beban sebesar 100 Kg
 Uji Pergeseran Pola Susun Batu, pada beban 100 Kg, di atas pola susun batu tersebut ditaruh beban sebesar 200 Kg



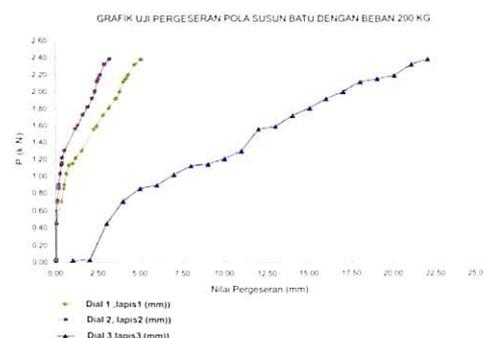
Pembahasan

UJI EXPERIMENTAL DAN PEMODELAN POLA SUSUN BATU CANDI.

Nilai pergeseran pada dial yang dihasilkan pada hasil uji pergeseran pemodelan struktur dapat dilihat pada grafik uji pergeseran.

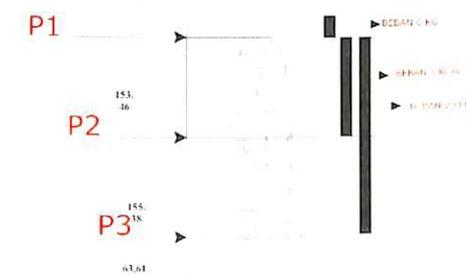
Analisa Simplifikasi untuk UJI PEMODELAN POLA SUSUN BATU

Perhitungan gaya geser ini untuk menentukan gaya geser yang terjadi pada masing-masing lapis batu pada Candi pada kondisi beban 0 Kg, 100 Kg dan 200 Kg



yang didasarkan pada hasil percobaan **Experimental** pola susun. Analisa **Simplifikasi** untuk mengetahui pengaruh pergeseran pada masing-masing lapis batu terhadap kestabilan Strukturnya. Adapun langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

Analisa Perhitungan Beban Geser di lapangan SAMPEL Langkan Lorong 1 Batang c



$$P_n = (F_n) \text{ kN} \times (t/l)$$

P_n : Gaya geser yang dihasilkan pada lapis ke n

F_n : Besarnya nilai Beban pada percobaan Experimental Pola

Hasil Studi

Susun batu dengan beban 0, 100 dan 200 Kg saat dial mulai bergerak

t : tebal sampel pagar langkan

l : lebar sampel pagar langkan

P1, P2 dan P3 : ditujukan untuk beban sesuai Uji Experimental Pola Susun Batu pada masing-masing beban 0, 100 dan 200 Kg

Besar gaya geser yang terjadi pada sampel perhitungan Langkan Lorong 1 bidang c adalah sebagai berikut :

Gaya geser pada lapis 1 dengan beban 0 Kg = 0,9345 kN

Gaya geser pada lapis 2 dengan beban 100 Kg = 1,335 kN

Gaya geser pada lapis 3 dengan beban 200 Kg = 1,78 kN

Analisa Pengaruh Gaya Gempa dengan METODE STATIK EKUIVALEN dan ANALISA SIMPLIFIKASI

Koefisien gempa (c) untuk daerah Candi Borobudur (Magelang) dan sekitarnya adalah : **c = 0,15**

Analisa gaya Gempa dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q_i = V_b \frac{W_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^2}$$

Dimana

Q_i : Distribusi gaya di semua lapisan batu

V_b : Gaya Total yang bekerja pada struktur

H_i : Tinggi Lapisan batu pada masing pendistribusian Gaya

N : Jumlah Lapis pendistribusian gaya

$$c = \frac{a}{g}$$

$$a = 0,15 g = 0,15 \times 9,81 \text{ (m/dt}^2 \text{)} = 1,472 \text{ m/dt}^2$$

Gaya Total

$$V_b = 175,513 \text{ kN}$$

Distribusi gaya

$$Q_{pd} \text{ 200 Kg} = \frac{1,75513 \times 2582,236}{322,484} = 1,405 \text{ kN}$$

Analisa = Nilai distribusi Gaya total pada h beban 200 Kg **1,405 kN < 1,78 kN → Aman**

$$Q_{pd} \text{ 100 Kg} = \frac{1,75513 \times 61,072}{322,484} = 0,332 \text{ kN}$$

Analisa = Nilai distribusi Gaya total pada h beban 100 Kg **0,332 kN < 1,335 kN → Aman**

$$Q_{pd} \text{ 0 Kg} = \frac{1,75513 \times 3,17}{322,484} = 0,017 \text{ kN}$$

Analisa = Nilai distribusi Gaya total pada h beban 0 Kg **0,017 kN < 0,9345 kN → Aman**

P e n u t u p

Bentuk sambungan pada Candi Borobudur secara konstruksional lebih sempurna dari bentuk yang ada pada Candi Prambanan. Hasil percobaan dengan **Metode Statik Ekuivalen** menunjukkan bahwa perambatan pergeseran batu arah horisontal cross-section terhadap bangunan utama lebih teratur dan stabil pada kondisi Pola Susun batu yang diberi perletakan beban dengan beban maksimal.

Dari **Analisa Simplifikasi** yang dikorelasikan dengan Perhitungan Gaya Gempa Metode Statik Ekuivalen, pada sampel **Langkan Lorong 1 Bidang c**, dihasilkan perhitungan bahwa nilai Gaya Geser akibat gaya gempa < dari nilai geser pada perhitungan dengan **Analisa Simplifikasi** dan Uji experimental, sehingga disimpulkan bahwa struktur pola

susun batu pada sampel diatas **Aman** dan tetap stabil dalam menerima beban akibat gaya gempa. Koefisien gempa (c) untuk daerah Candi Borobudur (Magelang) dan sekitarnya adalah 0,15, sehingga percepatan gempanya adalah 1,472 m/dt²

Penggunaan sistem sambungan batu sesuai dengan bentuk aslinya dulu (sistem pasak, ekor burung dan lain-lain) harus mulai dikembangkan kembali, Hal ini mengingat pengaruh dari kekakuan sebuah bangunan bila menggunakan sistem sambungan dengan spesi semen khususnya bangunan candi terhadap gerakan gaya horisontal atau vertikal (gempa bumi) sangatlah besar, yang mengakibatkan rusaknya struktur bangunan. ☒

P u s t a k a

Subagyo, R. 1996, **Studi Teknis Konstruksi Sambungan Batu Candi Borobudur**, Balai Studi dan Konservasi Borobudur

Arsip Fotografi, **Proyek Pemugaran Candi Borobudur**.

Ir. Sanggono, KH, 1997, **Buku Teknik Sipil**.

V.N Vazirani, S.P Chandola, **Civil Engineering Handbook Vol II. LAPT-II**

Borobudur dalam sketsa

