

PERILAKU PASANGAN BATU CANDI PRAMBANAN TERHADAP GAYA GESER DENGAN PENGISI LEMPUNG DAN VARIASI PENAMBAHAN PASIR (10%, 20%, dan 30%)

Oleh : Fajar Purwoko¹

Abstrak: Bangunan candi batu memiliki karakteristik struktur yang serupa sebagaimana bangunan umum lainnya, misalnya gedung. Seperti halnya candi Prambanan, dengan bentuk struktur yang tinggi dan cukup ramping maka bangunan ini memiliki karakteristik struktur yang mirip dengan bangunan yang tinggi. Sebagai sebuah struktur bangunan yang tinggi, maka bangunan candi harus memenuhi persyaratan kestabilan struktur sebagaimana halnya struktur bangunan yang lain. Hal ini berarti bahwa candi harus mampu mendukung beban yang terjadi yaitu beban gempa dan beban gravitasi dari berat sendiri candi. Beban gempa dipengaruhi oleh beban gravitasi sedangkan beban gravitasi dipengaruhi oleh berat jenis batuan penyusun candi (BP3 Yogyakarta, 2009).

Dalam penelitian ini dilakukan uji geser pasangan batuan candi yaitu batu tuff dengan pengisi tanah lempung Bayat I dan II, dan Prambanan (Gunung Gilang). Dari ketiga jenis tanah tersebut diberi campuran variasi pasir, namun sebelum dilakukan pengujian geser pasangan batu, tanah campuran tersebut diuji kuat geser tanah dengan geser langsung dan pemadatan tanah untuk mencari kadar air optimum. Dalam pengujian geser pasangan batu menitikberatkan pada pengujian dengan kadar air optimum (nilai kuat geser tanah terbesar), sehingga diperoleh suatu variasi nilai yang menunjukkan perilaku geser pasangan batu dalam keadaan optimum yang dipengaruhi juga oleh variasi pasir dalam pasangan.

Hasil percobaan yang telah dilakukan menghasilkan pengujian geser langsung tanah pengisi, Bayat I, II, dan Prambanan dengan sudut gesek internal terbesar pada variasi pasir 30%, masing-masing sebesar 40.7° , 49.48° , dan 48.93° . Pada pengujian geser pasangan batu candi (tuff) tanah pengisi Bayat I, II, dan Prambanan menghasilkan nilai tegangan maksimumnya pada variasi pasir 30%, masing-masing sebesar 1.296 kg/cm^2 , 1.257 kg/cm^2 , dan 1.254 kg/cm^2 . Selain ketiga variasi tanah tersebut, pengujian geser pasangan batu juga dilakukan pada pasangan batuan tanpa pengisi dengan hasil tegangan maksimumnya sebesar 1.34 kg/cm^2 , hasil ini lebih besar jika dibandingkan dengan ketiga variasi di atas, namun batuan penyusun sudah hancur tidak dapat dipakai dan dilanjutkan pengujianya lagi. Disimpulkan bahwa tanah pengisi merupakan perata beban yang baik dan variasi pasir memberikan trend positif dalam menaikkan kuat geser pasangan batuan candi (tuff).

Kata kunci : pasangan batu, pasangan batu candi, kuat geser pasangan batu

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kompleks Candi Prambanan dan candi-candi di sekitarnya mengalami kerusakan akibat gempa yang terjadi akhir-akhir ini, seperti Candi Plaosan, Ratu Boko, Candi Sewu, dan Candi Ijo. Pada Kompleks Candi Prambanan, 3 candi utama yakni Brahma, Siwa, dan Wisnu semuanya rusak, termasuk candi pendamping, yaitu Angsa, Nandi, dan Garuda. Yang paling parah kerusakannya adalah Candi Brahma. Mahkota kemuncaknya runtuh dan teras pintu masuk ke ruang candi runtuh menutupi pintu candi. Candi Siwa yang bangunannya paling besar, retak di berbagai tempat bahkan tubuh bagian tengah Candi Siwa bergeser beberapa centimeter. Begitu pula Candi Angsa, Nandi, dan Garuda, bagian puncaknya miring dan kemuncaknya terancam jatuh. Batu-batu dari reruntuhan candi berserakan di pelataran.

¹⁾ adalah staf pengajar Program Studi Teknik Sipil Universitas Cokroaminoto Yogyakarta

Garupa halaman satu sisi barat dan gapura halaman tiga sisi selatan mengalami kerusakan berat. Walaupun begitu Kompleks Candi Prambanan tetap terbuka untuk kegiatan pariwisata. Selama proses restorasi objek wisata, Prambanan tidak ditutup. Justru diharapkan wisatawan bisa menyaksikan langsung proses restorasi tersebut. Demi keamanan, pengunjung hanya boleh melihat candi dari luar pagar teralis.

Pada saat proses restorasi ditemukan juga lempung di antara susunan batu candi. Dengan adanya tanah lempung tersebut kontak antara batu menjadi lebih baik dalam meratakan beban karena friksi antara batuan tidak merata sehingga jika terjadi gaya dari sisi batuan maka batuan dapat pecah. Karena kontak antar batuan terjadi secara langsung tanpa adanya tanah lempung yang berfungsi sebagai perata beban, pasangan batuan pada candi banyak yang mengalami kerusakan karena perata beban atau pengisi pasangan tidak berfungsi sempurna bahkan banyak yang hilang dan antar batuan terjadi rongga yang cukup besar.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui sifat fisik benda uji (batu candi dan tanah lempung) yaitu, kuat geser, kuat tekan, kadar air, serta berat jenis;
2. Menyimpulkan hasil dari percobaan pemadatan tanah lempung sebagai spesi;
3. Mengetahui kuat geser pengisi dari masing-masing asal lempung tersebut Bayat I & II, dan Prambanan yang dibandingkan dengan lempung residu di lapangan;
4. Mengetahui perbandingan perilaku tahanan geser pasangan batu candi pengisi lempung tanpa *filler* dengan pasangan batu candi pengisi lempung dengan *filler* (beban normal 7,5 ton, simulasi tinggi struktur 26.5 m);
5. Untuk mengetahui perilaku pasangan batu candi akibat dari penambahan pasir pada campuran spesi;
6. Mengetahui nilai kuat geser pasangan batuan saat deformasi awal dan akhir pada kadar air optimum;
7. Mengetahui jenis spesi yang terbaik untuk mendapatkan pasangan batu candi yang optimal dalam kuat gesernya;
8. Mengetahui perilaku spesi tanah residu di sekitar Candi Prambanan (tanah asli);
9. Mengetahui presentase gaya geser yang terjadi dari gaya geser maksimum dari perhitungan gaya gempa.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan suatu wawasan yang baru tentang restorasi candi.

1.4. Ruang Lingkup dan Batas Penelitian

Dalam penelitian ini banyak hal disesuaikan dengan kondisi peneliti dan ketersediaan bahan sehingga peneliti memberi batasan pada penelitian ini dengan hal sebagai berikut:

1. Batuan *tuff* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan batuan asli dengan mempertahankan kekasaran batuan sesuai dengan kondisi asli di lapangan. Batuan asli ini merupakan sisa dari pemugaran karena restorasi candi menggunakan beton bertulang banyak menyita tempat atau volume candi yang menyebabkan banyaknya batuan sisa yang tak dapat dipasang lagi pada tubuh candi;
2. Lempung yang digunakan pada penelitian ini adalah lempung Bayat I, Bayat II, dan Prambanan dengan mempertimbangkan penggunaan yang sebelumnya dengan hasil yang cukup memuaskan;
3. Pasangan batu menggunakan campuran lempung dan pasir dengan melakukan beberapa variasi pasir, untuk mendapatkan besar perbandingan campuran yang tepat ;

4. Penelitian ini dilakukan di Candi Prambanan. Dengan permodelan candi Siwa pada kaki candinya yang memiliki susunan batuan *tuff* hingga 7 meter dari pondasi sampai dengan kaki candi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Cagar budaya Candi Prambanan mengalami kerusakan cukup parah akibat gempa Yogyakarta tahun 2006. Banyak sekali upaya yang dilakukan BP3 Yogyakarta untuk menjaga atau memugar Candi Prambanan, sehingga informasi mengenai perkuatan pada struktur candi, deformasi akibat gempa, dan alternatif pengisi pasangan sangat berguna untuk restorasi tersebut. Dalam penelitian ini diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai bahan-bahan penyusun batu candi, mulai dari bahan utamanya berupa batuan, pengisi pasangan berupa tanah lempung (material pasangan batu), dan struktur susunan pasangan batu candi.

2.1. Struktur Candi

2.1.1. Bentuk Candi

Secara struktural, bangunan Candi Siwa terdiri atas 3 bagian utama, yaitu; kaki candi, tubuh candi, dan atap candi. Kaki candi yang merupakan struktur bagian bawah dan berfungsi sebagai fondasi bangunan dipisahkan menjadi 2, kaki I dan kaki II. Di tengah-tengah pada bagian kaki ini terdapat sumuran yang menembus hingga tanah keras di bawah fondasi. Bagian tubuh candi terbagi menjadi tubuh I dan tubuh II, yang di dalamnya terdapat ruang-ruang tempat diletakkan arca. Ketika candi ini ditemukan, bagian bangunan yang masih insitu adalah kaki I, kaki II, dan sebagian tubuh I. Atap Candi Siwa berupa undakan-undakan yang dipisahkan menjadi; atap I, atap II, atap III, atap IV, dan kemuncak serta langkan (BP3 Yogyakarta – Unit Kerja Candi Prambanan).

2.1.2. Susunan batu

Batuan candi terdiri dari batuan andesit hitam untuk bagian luar yang bersifat cukup kuat namun liat, sedangkan pada bagian dalam menggunakan batuan *tuff* dengan jenis *welded tuff* berwarna putih kekuningan, batuan *tuff* ini bersifat lebih lunak namun getas. Berdasarkan sifatnya, inilah batuan *tuff* yang digunakan sebagai pondasi. Batuan candi memiliki potongan yang berbeda-beda tetapi ukurannya cukup presisi dengan kisaran 50x40x30 cm³ dan terdapat takikan untuk menahan geser, walau hanya dibuat dengan alat-alat yang sederhana.

2.1.3. Struktur dan hubungan antara batuan

Bangunan Candi Prambanan telah mengalami banyak proses pemugaran. Banyak batuan dalam yang dikurangi untuk memberikan perkuatan struktural baik berupa portal beton cor ataupun baja. Perkuatan tersebut dipasang didalam struktur candi agar tetap menjaga estetika candi, namun kekuatan bangunannya juga diperhatikan.

Pada awalnya atau sebelum pemugaran, candi hanya berupa tumpukan batuan yang disusun secara acak dan diberikan isian berupa lempung atau pasir. Batuan tersusun mengerucut dengan batuan bagian dalam yaitu batu *tuff* yang lebih getas berfungsi sebagai pondasi dan struktur candi bagian dalam, sedangkan pada bagian luar terdiri dari batuan andesit hitam yang lebih keras namun cukup liat sehingga lebih mudah untuk dipahat sebagai relief penghias candi.

2.2. Studi-studi yang Pernah Dilakukan

Pengujian sifat-sifat tanah pengisi yang dilakukan oleh Setyowati Y. (2009) pada Candi Lumbung berusaha memberikan suatu perbandingan adhesi (lekatan tanah dan batuan) dengan kohesi (lekatan antar tanah), dari pengujian tersebut nilai lekatan kedua parameter memiliki perbandingan lurus, sehingga disimpulkan bahwa lekatan antar tanah memiliki hubungan terhadap sifat atau perilaku pasangan batuan.

2.3. Batuan Candi Dalam (Tuff)

Material penyusun pasangan batu candi ada bermacam-macam sesuai dengan lokasi candi. Pemilihan material yang dilakukan oleh nenek moyang kita disesuaikan dengan efektivitas dalam pembangunannya, yaitu, jarak *quarry* batuan atau *quarry* tanah pengisi sendiri, berikut ini adalah material penyusun pasangan tersebut. Bahan baku penyusun candi bagian dalam adalah batuan *tuff* berwarna putih kekuningan, dari berbagai jenis didapat ukuran rerata yaitu 40 x 30 x 20cm³.

2.4. Bahan Pengisi Pasangan

Lapisan pengisi batu candi dalam pengujian ini menggunakan campuran tanah lempung dengan variasi penambahan kadar pasir. Untuk penjelasan dari material atau bahan yang digunakan sebagai lapisan pengisi tersebut dapat dilihat di bawah ini.

1. Tanah Lempung

Candi Prambanan memiliki pasangan batu menggunakan campuran lempung dengan persentase terbanyak dibandingkan filler lain, seperti pasir dan gamping sehingga lempung sangat menentukan kekuatan dari pasangan batu tersebut.

2. Air

Air yang digunakan adalah air dari laboratorium Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada dan laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada dan harus sesuai dengan Persyaratan Umum Bahan Bangunan (PUBI-1982)

3. Pasir

Penulis mengambil pasir yang berasal dari Kali Krasak, yang memiliki sifat yang bagus dengan kandungan lanau sedikit, walau nilai kekekalan butirannya kurang baik karena jarak lintasan butiran pasir yang pendek. Pasir adalah butiran-butiran mineral keras yang bentuknya mendekati bulat dan ukuran butirannya sebagian besar terletak antara 0,075-5mm, dan kadar bagian yang lebih kecil dari 0,063mm lebih dari 5%. Dalam spesi pasangan batu candi adanya pasir diharapkan dapat memberikan suatu kontribusi dalam menahan gaya geser dengan meningkatkan sudut gesek internal spesi tersebut yang tentunya nilai friksi juga semakin besar.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan merupakan suatu penelitian eksperimen komparasi hasil percobaan di laboratorium dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Banyak sekali hal yang mempengaruhi kedua kondisi tersebut sehingga eksperimen ini merupakan suatu pendekatan bagi restorasi candi untuk kondisi lapangan, dalam hal ini yaitu kondisi pasangan batu Candi Prambanan.

3.1. Jenis Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan disesuaikan dengan literatur yang ada. Secara garis besar penelitian ini meliputi kegiatan sebagai berikut,

1. Pengujian dasar batuan candi (dalam), yaitu batuan tuff yang meliputi, kuat tekan, kuat geser, dan berat isi;
2. Pengujian dasar terhadap tanah lempung meliputi, kadar air, pemadatan tanah, geser langsung, dan semuanya dengan variasi lokasi *quarry* lempung dan pasir sebesar 10%, 20%, dan 30% campuran;
3. Pengujian kuat geser 2 lapisan pasangan batu candi dengan variasi lokasi *quarry* lempung dan pasir sebesar 10%, 20%, dan 30% campuran;
4. Pengujian kuat geser 2 lapisan pasangan batu candi dengan pengisi tanah asli *quarry* di sekitar Candi Prambanan;
5. Pengujian kuat geser 2 lapisan pasangan batu Candi Prambanan tanpa pengisi apapun.

3.2. Lokasi Penelitian

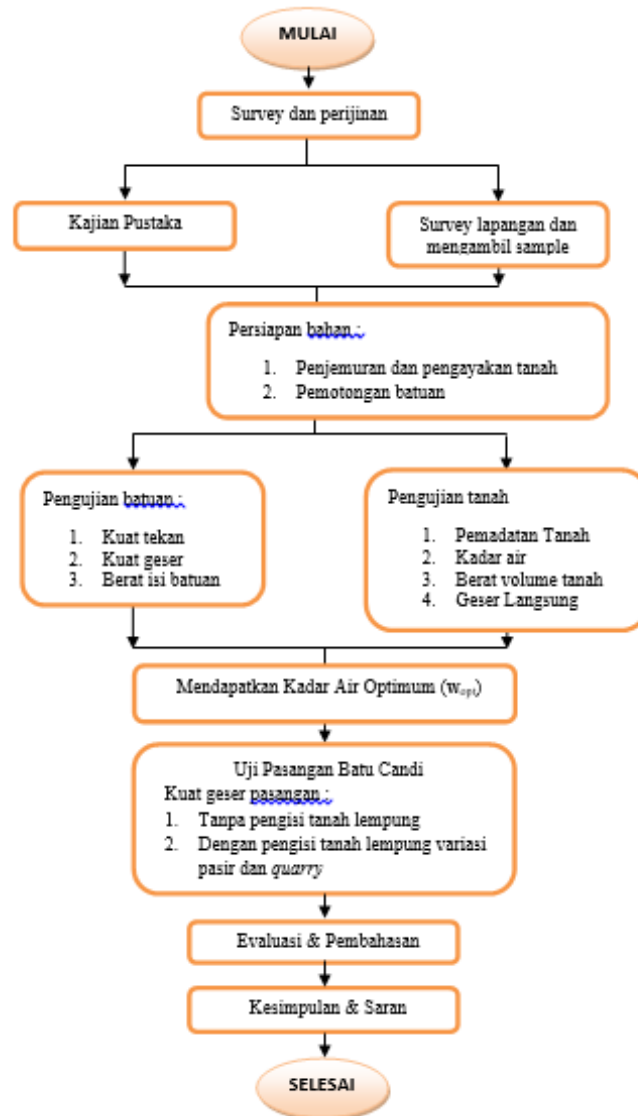
Lokasi penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, untuk pengujian tanahnya dan di Pusat Studi Ilmu Teknik (PSIT) Laboratorium Struktur dan Mekanika Bahan, Jl. Teknik Utara-Barek, Yogyakarta, untuk pengujian batuan dan uji pasangan batu candi.

3.3. Waktu Penelitian

Waktu penelitian dilakukan selama 5 bulan mulai dari proses persiapan penelitian (pengadaan tanah lempung dan batu candi), persiapan bahan, pemotongan batu-batu yang berukuran besar, pengujian kuat geser tanah, pengujian geser pasangan, pengolahan data, dan penyusunan laporan akhir.

3.4. Bagan Alir Penelitian

Untuk tahapan pelaksanaan penelitian dari tahap awal hingga akhir disajikan dalam diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Dasar

1. Batu Candi (*Tuff*)

- **Kuat Tekan**

Percobaan ini dilakukan di Laboratorium PSIT Mekanika Bahan Universitas Gadjah Mada Kuat. Tekan kubus yang dilakukan penulis menggunakan alat penekan type AW-10W kapasitas 10 ton dengan kecepatan yang konstan, dengan contoh hasil pengujian sebagai pada Tabel 1,

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan batuan *tuff*

No	Kode Benda Uji	Ukuran bidang tekan		Tanggal uji	Beban max (Kgf)	Kuat Tekan (Kgf/cm ²)	Kuat Tekan (MPa)
		Lebar (cm)	Panjang (cm)				
1	PT-3	5,86	6,06	8 Maret'10	1708	48,1	4,72
2	PT-4	5,44	5,61	8 Maret'10	870	28,5	2,8
3	PT-5	5,92	5,86	8 Maret'10	1164	33,5	3,3
					rerata	36,72	3,6

Dari hasil pengujian dengan 3 buah benda uji didapat nilai kuat tekan rerata dari batuan *tuff* yaitu, 36,72 kg/cm² atau 3,6 MPa.

- **Kuat Geser**

Pada pengujian kuat geser batuan, alat yang digunakan sama dengan pengujian kuat tekan batuan yaitu menggunakan alat penekan type AW-10W kapasitas 10 ton, hal yang membedakan yaitu bidang pengujiannya. Hasil pengujian terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian kuat geser batuan *tuff*

No	Kode Benda Uji	Ukuran bidang geser		Tanggal uji	Beban max (Kgf)	Kuat geser (Kgf/cm ²)	Kuat geser (MPa)
		Lebar (cm)	Panjang (cm)				
1	PG-1	3,91	4,84	8 Maret'10	250	13,21	1,29
2	PG-2	4,68	4,87	8 Maret'10	216	9,48	0,93
3	PG-3	3,88	4,16	8 Maret'10	92	5,70	0,56
4	PG-4	4,38	4,84	8 Maret'10	206	9,72	0,95
5	PG-5	4,51	4,73	8 Maret'10	130	6,09	0,60
6	PG-6	4,61	4,79	8 Maret'10	210	9,51	0,94
					rerata	8,95	0,88

- **Berat Isi Batu**

Dari pengujian berat isi batu yang dilakukan dalam penelitian ini didapatkan nilai rerata berat isi batu dua jenis atau dua kondisi, yaitu kondisi lapangan 1.601 gram/cm³ dan berat kering oven 1.378 gram/cm³

Tabel 3. Hasil pengujian berat isi batuan tuff

No	Kode Benda Uji	P (cm)	L (cm)	T (cm)	Volum e (cm ³)	Berat basah (gram)	Berat kering (gram)	Berat isi basah (gram/cm ³)	Berat isi kering (gram/cm ³)
1	BJ-P1	5,575	5,675	5,870	182,47 5	297,48	256,88	1,630	1,408
2		5,710	5,500	5,850					
3		5,675	5,525	5,675					
rerata	5,653	5,567	5,798						
1	BJ-P2	5,985	5,625	5,305	180,68 8	298,83	257,65	1,654	1,426
2		5,850	5,675	5,460					
3		5,935	5,600	5,480					
rerata	5,923	5,633	5,415						
1	BJ-P3	5,855	5,835	5,570	190,34 4	289,34	247,37	1,520	1,300
2		5,825	5,900	5,550					
3		6,020	5,825	5,415					
rerata	5,900	5,853	5,512						
							rerata	1,601	1,378

2. Lempung

• Kadar air lapangan

Nilai kadar air dalam tanah lempung dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 4.1,

$$\text{kadar air } (w) = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_3} \times 100\% \dots \dots \dots \text{Persamaan 4.1}$$

➤ Komparasi kadar air total

Dari pengujian kadar air yang dilakukan didapat variasi hasil dari penambahan pasir setiap sampling, yaitu pada Prambanan variasi pasir 10% sebesar 4,54%, Prambanan variasi pasir 20% sebesar 3,98%, dan Prambanan variasi pasir 30% sebesar 3,31%. Dengan cara yang identik seperti di atas maka didapatkan nilai kadar air untuk Bayat I dan Bayat II, pada Tabel 4,

Tabel 4. Tabel hasil pengujian kadar air Prambanan, Bayat I, dan Bayat II dengan variasi pasir masing-masing

	Prambanan	Bayat I	Bayat II
10%	4,54	4,999	5,78
20%	3,98	4,77	5,15
30%	3,31	3,975	4,303

Perbandingan nilai kadar air dari ketiga sampel tersebut terlihat bahwa nilai kadar air dapat menurun dalam suatu volume tanah jika tanah tersebut beberapa bagiannya atau beberapa persen dari tanah lempung disubstitusikan dengan pasir. Hal ini disebabkan bahwa *mineralogy* lempung memiliki daya ikat kuat dengan air.

4.2. Pemadatan Tanah Standar

Percobaan pemadatan tanah ini dilakukan dengan metode standar yaitu dengan tenaga pemadatan standar, dalam hal ini yaitu penumbuk standar

Berikut ini hasil pengujian pemadatan tanah Prambanan, Bayat I, dan Bayat II dengan variasi pasir metode standar proctor.

1. Tanah Lempung Prambanan

Tabel 5. Hasil pengujian pemadatan tanah prambanan dengan variasi pasir 10%, 20%, dan 30%

Prambanan	10% Pasir		20% Pasir		30% Pasir	
	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)
	1,37	16,08	1,50	13,76	1,48	9,2
1,48	18,98	1,56	16,59	1,57	13,04	
1,54	22,19	1,59	19,70	1,64	16,56	
1,49	25,68	1,61	21,92	1,68	20,13	
1,43	28,88	1,55	24,83	1,59	23,73	

2. Tanah Lempung Bayat I

Tabel 6. Hasil pengujian pemadatan tanah Bayat I dengan variasi pasir 10%, 20%, dan 30%

Bayat I	10% Pasir		20% Pasir		30% Pasir	
	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)	$\square d$ (gram/cm ³)	w (%)
	1,69	8,51	1,67	8,32	1,67	6,29
1,76	11,31	1,80	11,35	1,77	8,87	
1,83	14,36	1,86	14,08	1,82	11,74	
1,82	16,84	1,83	16,98	1,89	14,96	
1,72	19,96	1,72	20,05	1,80	17,99	

3. Tanah Lempung Bayat II

Tabel 7. Hasil pengujian pemadatan tanah Bayat II dengan variasi pasir 10%, 20%, dan 30%

Bayat II	10% Pasir		20% Pasir		30% Pasir	
	γd (gram/cm ³)	w (%)	γd (gram/cm ³)	w (%)	γd (gram/cm ³)	w (%)
	1,75	11,06	1,61	9,95	1,72	7,97
1,82	12,61	1,73	12,52	1,88	10,00	
1,86	14,25	1,85	14,04	1,91	12,64	
1,85	16,32	1,89	15,86	1,90	14,70	
1,81	17,94	1,85	17,54	1,84	16,54	

4. Tanah Prambanan asli

a. Prambanan asli

Tabel 8. Hasil pengujian pemadatan tanah Prambanan asli

Berat volume kering (γd) (gram/cm ³)	Kadar air (%)
1,59	11,45
1,64	14,55
1,64	18,05
1,68	21,31
1,59	25,25

4.3. Kuat Geser Tanah

Pengujian kuat geser pada tanah lempung dimaksudkan untuk mengetahui nilai suatu parameter kuat geser tanah yaitu kohesi (c) dan sudut gesek internal (ϕ).

1. Tanah Lempung Prambanan

Pengujian geser langsung tanah lempung Prambanan dilakukan dengan 3 kali variasi kandungan pasir yaitu dilakukan dengan 4 kali pembebanan pada kandungan pasir 10%, dan 3 kali pembebanan pada kandungan pasir 20% dan 30%. Dari ketiga data percobaan tersebut maka didapatkan hasil parameter geser tanah, berupa nilai kohesi dan sudut gesek internal yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan hasil pengujian geser langsung tanah Prambanan dengan variasi pasir

Jenis Tanah	Kohesi (Kg/cm ²)	Sudut gesek internal (Kg/cm ²)
PRAMBANAN 10%	0,61	28,15
PRAMBANAN 20%	0,54	40,39
PRAMBANAN 30%	0,48	48,93

2. Tanah Lempung Bayat I

Pengujian geser langsung lempung Bayat I dilakukan dengan 3 kali variasi yaitu dilakukan dengan 3 kali pembebanan pada kandungan pasir 10%, 20% dan 30%. Dari ketiga data percobaan tersebut maka didapatkan hasil parameter geser tanah, berupa nilai kohesi dan sudut gesek internal yang ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Tabel perbandingan hasil pengujian geser langsung tanah bayat I dengan variasi pasir

Jenis Tanah	Kohesi (Kg/cm ²)	Sudut gesek internal (Kg/cm ²)
BAYAT I 10%	0,71	35,37
BAYAT I 20%	0,44	38,66
BAYAT I 30%	0,36	40,70

3. Tanah Lempung Bayat II

Pengujian geser langsung lempung Bayat II dilakukan dengan 3 kali variasi yaitu dilakukan dengan 3 kali pembebanan pada kandungan pasir 10%, 20%. Dari ketiga data percobaan tersebut didapatkan hasil parameter geser tanah, berupa nilai kohesi dan sudut gesek internal yang ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Tabel perbandingan hasil pengujian geser langsung tanah bayat II dengan variasi pasir

Jenis Tanah	Kohesi (Kg/cm ²)	Sudut gesek internal (Kg/cm ²)
BAYAT II 10%	0,48	45,39
BAYAT II 20%	0,45	46,40
BAYAT II 30%	0,44	49,48

4. Tanah Prambanan Asli

Tanah ini merupakan pengisi asli Candi Prambanan hasil atau sisa-sisa pemugaran candi, berikut pada Tabel 12 hasil uji kuat gesernya.

Tabel 12. Tabel hasil pengujian geser langsung tanah asli Candi Prambanan

Jenis Tanah	Kohesi (Kg/cm ²)	Sudut gesek internal (Kg/cm ²)

Tanah asli Candi Prambanan	0,02	52,002
----------------------------	------	--------

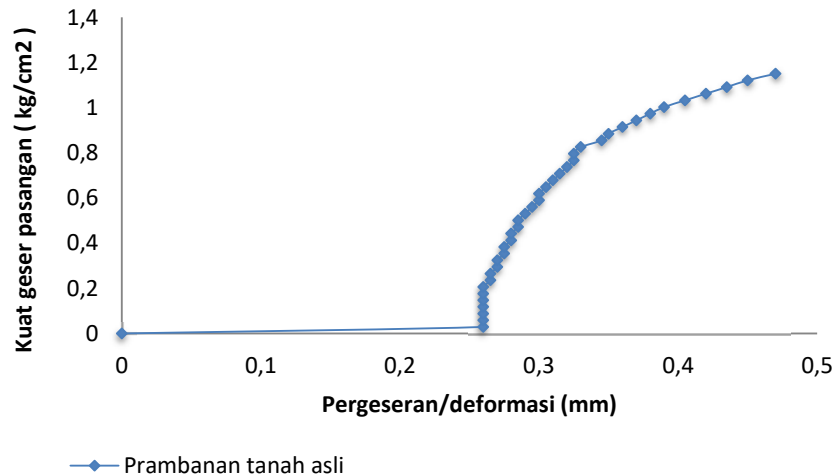
4.4. Kuat Geser Pasangan Batu Candi

Pada pembahasan bab yang sebelumnya telah dijelaskan bahwa uji geser pasangan berfungsi untuk mengetahui perilaku pasangan batu candi terhadap gaya geser (gaya horizontal). Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Bahan PSIT UGM dan pengujian geser pasangan batu ini dilakukan tanpa pengisi tanah dan dengan pengisi tanah menggunakan simulasi berat normal struktur sebesar 7,5 ton. Pengujian membutuhkan 3 orang untuk pencatat pergeseran, pemegang pompa *hydraulic jack* beban geser, dan pemegang pompa *hydraulic jack*.

Uji geser pasangan dilakukan sebanyak 13 kali, tanah Prambanan, Bayat I, Bayat II, masing-masing 3, uji tanpa pengisi dan uji geser pasangan dengan pengisi tanah asli pengisi Candi Prambanan.

1. Tanah Asli Candi Prambanan

Pengujian tanah asli Candi Prambanan dilakukan satu kali untuk mengetahui deformasi yang terjadi setelah diberikan gaya geser. Berikut Gambar 4.1 hasil pengujian tersebut,



Gambar 2. Grafik hasil pengujian geser pasangan batu candi dengan tanah pengisi tanah asli Candi Prambanan

Dari hasil percobaan diatas didapatkan deformasi awal yang terjadi sangat besar, yaitu 0,26 mm pada pembebanan 0,03 kg/cm² (50kg). Hal ini menyebabkan terjadinya kerusakan struktur terlalu cepat dengan pembebanan maksimal 1,15 kg/cm².

2. Tanpa Pengisi

Pengujian geser pasangan tanpa pengisi dilakukan satu kali untuk mengetahui deformasi yang terjadi setelah diberikan gaya geser, pengujian ini dihentikan pada pembebanan 1,34 kg/cm². Gambar 3 menunjukkan kerusakan benda uji setelah pengujian pasangan batu candi tanpa pengisi.



Gambar 3. Retakan pada pasangan batu candi tanpa pengisi tanah

3. Tanah Lempung Prambanan

Pengujian geser candi dengan pengisi tanah prambanan dilakukan 3 kali dengan variasi pasir masing-masing 10%, 20%, dan 30%.

Tabel 13. Tabel hasil pengujian geser pasangan tanah Prambanan

No	Keterangan	Tegangan saat deformasi	Tegangan maksimum (kg/cm ²)	Deformasi saat maksimum
1	Prambanan pasir 10%	0,13	1,13	0,415
2	Prambanan pasir 20%	0,06	1,19	0,58
3	Prambanan pasir 30%	0,12	1,25	0,685

Dari Tabel 13 Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tanah lempung Prambanan mengalami peningkatan jika kandungan variasi pasir meningkat.

4. Tanah Lempung Bayat I

Pengujian geser candi dengan pengisi tanah bayat I dilakukan 3 kali dengan variasi pasir masing-masing 10%, 20%, dan 30%.

Tabel 14. Tabel hasil pengujian geser pasangan tanah Bayat I

No	Keterangan	Tegangan saat deformasi	Tegangan maksimum (kg/cm ²)	Deformasi saat maksimum
1	Bayat I pasir 10%	0,097	1,26	0,36
2	Bayat I pasir 20%	0,12	1,27	0,72
3	Bayat I pasir 30%	0,25	1,30	0,68

Dari Tabel 14 Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tanah lempung Bayat I mengalami peningkatan jika kandungan variasi pasir meningkat.

5. Tanah Lempung Bayat II

Pengujian geser candi dengan pengisi tanah bayat II dilakukan 3 kali dengan variasi pasir masing-masing 10%, 20%, dan 30%.

Tabel 15. Tabel hasil pengujian geser pasangan tanah bayat II

No	Keterangan	Tegangan saat deformasi	Tegangan maksimum (kg/cm ²)	Deformasi saat maksimum
1	Bayat II pasir 10%	0,119	1,14	0,62
2	Bayat II pasir 20%	0,119	1,23	0,76
3	Bayat II pasir 30%	0,117	1,26	0,59

Dari tabel 4.15 Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tanah lempung Bayat II mengalami peningkatan jika kandungan variasi pasir meningkat.

6. Tanah Bayat I kadar pasir 30% dengan perbandingan kadar air dibawah optimum dan diatas optimum.

Sebagai pembanding dengan pengujian pasangan dengan kadar air optimum, dilakukan juga pengujian variasi kadar air dibawah dan diatas optimum pada benda uji Bayat I 30%.

Tabel 16. Tabel hasil pengujian geser pasangan tanah bayat I dengan variasi kadar air dan pasir 30%

No	Keterangan	Tegangan saat deformasi	Tegangan maksimum (kg/cm ²)	Deformasi saat maksimum
1	kadar air 5%	0,063	1,13	0,44
2	kadar air optimal	0,25	1,30	0,68
3	kadar air 30%	0,23	1,97	0,7

Dari Tabel 4.16 Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tanah lempung Bayat I kandungan pasir 30% mengalami peningkatan jika kandungan kadar air meningkat.

4.5. Koefisien Gesek Pasangan Batu Candi

Dari pembahasan hubungan antar tegangan geser dan gaya normal yang dijelaskan pada bab sebelumnya, nilai koefisien gesek pada pasangan dapat ditentukan. Koefisien ini dibagi lagi menjadi dua macam, yaitu koefisien gesek statis dan kinetis. Perbedaan dari kedua hal tersebut yaitu terjadinya tegangan geser yang terjadi, jika statis terjadi pada saat deformasi awal, sedangkan kinetik pada saat benda uji meluncur (tanpa ada tahanan lagi). Pada pengujian ini hanya didapat nilai dari koefisien gesek statik karena keterbatasan benda uji yang mudah pecah jika dilakukan pengujian hingga benda uji meluncur. Hasil dari pengujiannya dapat dilihat pada Tabel 17 berikut,

Tabel 17. Tabel koefisien gesek batu candi

No	Keterangan	Tegangan saat deformasi awal (kg/cm ²)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	Luas Bidang Geser (cm ²)	Distribusi Gaya Normal (kg/cm ²)	Koefisien Gesek Statik (m _s)
1	Prambanan	0,03	1,15	1695	4,42	0,26
2	Tanpa	0,12	1,34	1605	4,67	0,29
3	Prambanan	0,12	1,13	1635	4,59	0,25
4	Prambanan	0,06	1,19	1635	4,59	0,26
5	Prambanan	0,12	1,25	1635	4,59	0,27
6	Bayat I	0,1	1,26	1545	4,85	0,26
7	Bayat I	0,12	1,27	1695	4,42	0,29
8	Bayat I	0,25	1,3	1620	4,63	0,28
9	Bayat II	0,12	1,14	1672,5	4,48	0,25
10	Bayat II	0,12	1,23	1672,5	4,48	0,27
11	Bayat II	0,12	1,26	1710	4,39	0,29
12	Bayat I	0,06	1,13	1590	4,72	0,24
13	kadar air	0,25	1,3	1620	4,63	0,28

14	Bayat I	0,23	1,97	1545	4,85	0,41
----	---------	------	------	------	------	------

4.6. Simulasi gaya geser sebagai gaya gempa

Dari perhitungan di bawah ini didapatkan bahwa dengan ketinggian struktur candi siwa sebesar 26,5m menghasilkan gaya gempa maksimum sebesar 3,13 ton.

Perhitungan gaya geser maksimum akibat gempa yang terjadi didapatkan dari perhitungan berikut ini.

- Waktu Getar Alami , $T_1 < \zeta \cdot n$
.....Persamaan 4.2.
 ζ (zeta) = 0,17 , mengasumsikan Yogyakarta pada zona 4
n (jumlah tingkat gedung) asumsi sejumlah 6 tingkat gedung,
menghasilkan $T_1 = 1,06$ detik.
- Faktor respon gempa , $C =$
 $\frac{0,42}{T_1}$Persamaan 4.3.
 $T_1 = 1,06$ detik.,
Menghasilkan, $C = 0,412$
- Nilai $S_a, S_d =$
 $\frac{C \cdot I}{R} \cdot g$Persamaan 4.4.
 $R = 1,6$ (SNI 03-1726-2002 tabel 3), sebagai desain elastik,
 $I = 1,6$ (SNI 03-1726-2002 tabel 2), berupa bangunan monumental,
Menghasilkan, $S_a = 4,04$
- Gaya geser maksimum, $F_{max}, F_{max} =$
 $S_a \cdot M$Persamaan 4.5.
 $S_a = 4,04$
 $M = W/g = 7,61 \text{ ton} / 9,81 \text{ m/det}^2 = 0,78 \text{ ton/m/det}^2$
Menghasilkan, $F_{max} = 3,13 \text{ ton}$

Dari nilai ini akan dibandingkan nilai gaya geser yang terjadi pada pengujian di laboratorium. Pada pengujian laboratorium didapatkan hasil pada Tabel 18.

Tabel 18. presentase gaya gempa yang terjadi

No	Keterangan	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	Luas Bidang Geser (cm ²)	Gaya Geser yang terjadi (kg)	Persentase Gaya Gempa yang terjadi dari Gaya maksimum sebesar 3.13 ton
1	Prambanan tanah asli	1,15	1695	1950	62,30%
2	Tanpa pengisi	1,34	1605	2150	68,69%
3	Prambanan pasir 10%	1,13	1635	1850	59,11%
4	Prambanan pasir 20%	1,19	1635	1950	62,30%
5	Prambanan pasir 30%	1,25	1635	2050	65,50%
6	Bayat I pasir 10%	1,26	1545	1950	62,30%
7	Bayat I pasir 20%	1,27	1695	2150	68,69%
8	Bayat I pasir 30%	1,3	1620	2100	67,09%
9	Bayat II pasir 10%	1,14	1672,5	1900	60,70%
10	Bayat II pasir 20%	1,23	1672,5	2050	65,50%
11	Bayat II pasir 30%	1,26	1710	2150	68,69%
12	Bayat I 30% kadar air 5%	1,13	1590	1800	57,51%
13	kadar air optimal	1,3	1620	2100	67,09%
14	Bayat I 30% kadar air 30%	1,97	1545	3050	97,44%

Nilai gaya geser maksimum terbesar terjadi pada Bayat I 30% dengan kadar air juga sebesar 30% (diatas optimum). Hal ini membuktikan bahwa lekatan membantu batuan dalam meredam gaya gempa, yang dapat bertahan hingga 97,44 % dari gaya gempa maksimum yang akan terjadi pada zona 4 tanah sedang. Untuk semua pasangan dengan kadar air optimum memiliki gaya geser maksimum rerata sebesar 64 % dari gaya gempa maksimum yaitu sekitar 2,01 ton.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a) Pengujian dasar
 1. Batu Candi
 - ✚ Kuat tekan rata-rata batu candi (tuff) adalah 36,72 kg/cm² atau setara dengan 3,6 MPa
 - ✚ Kuat geser rata-rata batu candi (tuff) adalah 8.95 kg/cm² atau setara dengan 0.88 MPa
 - ✚ Berat isi batu candi (tuff) basah adalah 1,601 kg/cm² dan kering adalah 1.378 kg/cm²
 2. Tanah Lempung

Dari nilai kadar air dapat disimpulkan bahwa penambahan pasir menurunkan kadar air tanah uji. Hal ini dikarenakan tanah pasir sulit untuk mengikat partikel air disekitarnya. Sedangkan nilai terbesar kadar air pada Bayat II dengan variasi pasir 30%, didapatkan sebesar 5,78%.
- b) Dari percobaan pemadatan nilai berat volume kering maksimum akan meningkat jika kandungan pasir meningkat, namun lain halnya dengan kadar air optimumnya yang menurun jika kandungan pasir meningkat. Berat volume kering maksimum yang terbaik pada tanah Bayat II 30% sebesar 1,91 gram/cm³, namun memiliki kadar air optimum terendah sebesar 12.64%.
- c) Dari percobaan kuat geser tanah dengan geser langsung, nilai kohesi terbesar pada Bayat I 30% sebesar 0,7 kg/cm², dan nilai sudut gesek internal terbesar pada tanah asli Prambanan sebesar 52⁰. Hasil ini identik dengan hasil percobaan benda uji yang lain, jika tanah diberi penambahan pasir, nilai dari sudut gesek internal akan meningkat, namun nilai kohesi akan menurun.
- d) Pasangan Batu candi

Sesuai dengan bab sebelumnya maka dapat disimpulkan bahwa,

 1. Penggunaan bahan pengisi lempung pada pasangan batu candi *tuff* menurunkan tahanan geser pasangan terhadap beban horizontal, namun batuan pada lapisan pertama tidak mudah hancur akibat adanya perata beban yang mereduksi kekuatan geser dan kekuatan tekan pada batuan.
 2. Penggunaan campuran pasir cukup efektif dalam meredam gaya geser pada pasangan batu candi, hal ini di perhatikan dari nilai tahanan geser yang semakin meningkat ketika tanah pengisi mengalami penambahan pasir.
 3. Dari nilai kuat geser dengan kadar air optimum yang terjadi pada saat deformasi awal Bayat I dengan variasi pasir 30 % memiliki nilai yang terbaik, yaitu sebesar 0.25 kg/cm², sedangkan yang terkecil didapat pada pengisi tanah Prambanan asli sebesar 0,03 kg/cm².
 4. Dari nilai kuat geser maksimum yang terjadi dengan kadar air optimum optimum yang terjadi pada saat deformasi akhir, Bayat I dengan variasi pasir 30 % memiliki nilai yang terbaik, yaitu sebesar 1.3 kg/cm², sedangkan yang terkecil didapat pada pengisi tanah Prambanan dengan variasi pasir 10% sebesar 1.13 kg/cm².
 5. Spesi yang terbaik untuk pasangan batu candi menggunakan tanah Bayat I 30 % dengan variasi kadar air melebihi optimum sebesar 1.97 kg/cm² untuk nilai

- tegangan geser maksimumnya, hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar air memberikan lekatan yang lebih baik sehingga meningkatkan tahanan geser.
6. Tanah asli candi prambanan cukup baik menerima gaya geser dengan hasil kuat geser maksimumnya mendekati nilai kuat geser pasangan dengan lempung walaupun kohesinya sangat kecil tapi memiliki sudut gesek internal yang besar.
 7. Tanah pengisi yang mengandung kadar air lebih banyak dapat mencapai nilai gaya geser sebesar 97,44 % dari gaya gempa maksimum yang terjadi pada struktur candi hingga 26,5m. sedangkan untuk tanah pengisi yang lain (Kadar Air Optimum) memiliki efisiensi gaya geser yang terjadi merata sebesar 64%.

5.2. Saran

1. Penelitian dengan alternatif lempung lain perlu dilakukan untuk menambah perbendaharaan alternatif restorasi candin dan mendapatkan yang paling baik.
2. Bentuk pasangan batu candi yang sederhana diubah dengan memberikan pengunci agar *interlocking* antar batuan lebih baik
3. Terlihat dari hasil pengujian yang telah didapat kadar air sangat mempengaruhi kuat geser pasangan, sehingga perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan variasi kadar air dan variasi pasir.
4. Dengan adanya butiran pasir pasangan menjadi lebih baik menerima gaya geser, dalam penelitian selanjutnya perlu diberikan suatu inovasi terbaru berupa pemberian filler lain dengan butiran yang sedikit lebih besar dari butiran pasir.
5. Umur pengujian dalam pasangan batu candi sangat berpengaruh terhadap kadar air yang terdapat didalam tanah pengisi, jadi perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai hal ini.
6. Hasil penelitian ini seharusnya dapat memberikan kontribusi yang besar di lapangan , sedangkan di lapangan ukuran batuan candi sangat beraneka ragam, sehingga perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk mengetahui perilaku pasangan dengan batu candi yang ukurannya berbeda-beda.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardhi, I, 2009, *Karakteristik Tanah Pengisi Susunan Batu Candi Lumbung dalam Tinjauan Parameter Fisik, Mekanik, dan Kandungan Mineral*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- Bahri, S., 2009, *Perilaku Pasangan Batu Candi dengan Pengisi Lempung Terhadap Beban Geser*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- BP3 Yogyakarta, 2009, *Membangun Kembali Prambanan*, Yogyakarta.
- Das, Braja M., 1985, *Mekanika Tanah*, The University of Texas at El Paso.
- Desriantomy dan Rahmani.,H.,2009, <http://repository.petra.ac.id/14393>, diakses Mei 2010.
- Departemen Pekerjaan Umum 1982, *Persyaratan Umum Bahan Bangunan Indonesia*.
- Grim, R.E., 1953, *Clay mineralogy dalam* <http://www.sciencemag.org>, diakses Mei 2010.
- Hardiyatmo, Hary C, 1999, *Mekanika Tanah I*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Hugh and Freedman, 2002, *Gaya gesekan Statis dan Kinetis dalam voneefis.blogspot.com*, diakses Mei 2010.
- Kanginan, Marthen, 2002, *Fisika untuk SMA kelas X, Semester I*, Erlangga, Jakarta.
- Lohat, AS, 2007, www.gurumuda.com, diakses Februari 2010.
- Mahmud, 2001, *Penelitian Redaman Getaran Akibat Beban Dinamis pada Model Tanah Pasir*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- Mohr, 1910, *Kuat Geser Tanah dalam* <http://www.scribd.com/doc/25240594>, diakses Maret 2010
- Satyarno, I.,2002, *Analisis Dinamik Struktur dan Teknik Gempa*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- SNI 03-1726-2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung*
- SNI 03-1965-1990, *Pengujian Kadar Air Tanah*.

- SNI 03-4166-1996, *Metode Pengujian Kuat Geser Dinding Pasangan Bata Merah di Laboratorium*
- Setyowati, Y, 2009, *Penentuan Alternatif Material Lempung sebagai Pengisi dan Perekat Susunan Batu Candi dalam Rangka Renovasi Candi Lumbung*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- Unit Kerja Candi Prambanan 2007, *Kerusakan Candi Siwa Akibat Gempa Bumi 27 Mei 2006 dan Konsep Penanganannya*.