

## Respon Struktur Candi Mendut Terhadap Getaran Lalu Lintas

Linus Setyo Adhidhuto<sup>1</sup>, Rony Muhammad<sup>1</sup>, Jati Kurniawan<sup>1</sup>, Puji Santosa<sup>1</sup>, Ajar Priyanto<sup>1</sup>  
Balai Konservasi Borobudur<sup>1</sup>  
Linus.setyo.a@gmail.com

### ABSTRAK

Candi Mendut hanya berjarak 27 meter dari jalan raya. Banyaknya kendaraan yang melintas pada jalan tersebut terutama kendaraan berat seperti truk dan bus menimbulkan kekhawatiran akan kelestarian candi tersebut. Getaran yang timbul dari kendaraan tersebut bila mengenai struktur candi dengan frekuensi tertentu dan dalam intensitas yang besar akan berpotensi menimbulkan kerusakan pada candi.

Pengukuran respon getaran dilakukan pada 2 titik yaitu bagian atap dan lantai candi untuk dapat mengetahui apakah getaran yang timbul akibat lalu lintas telah melebihi batas ambang getaran. Pengukuran getaran menggunakan *accelerograph* yang dapat mengukur getaran dalam 3 arah / triaxial. Untuk dapat mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya getaran yang timbul maka dilakukan percobaan respon getaran pada tanah dengan variasi kecepatan kendaraan dan berat kendaraan.

Dari pengukuran yang telah dilakukan pada Candi Mendut, ternyata respon getaran yang dihasilkan akibat lalu lintas jalan raya sebesar 0,107mm/s, masih di bawah batas ambang getaran mekanik pada bidang paling atas sebesar 8,5 mm/s. Dari hasil percobaan juga diketahui bahwa kecepatan dan berat kendaraan berbanding lurus dengan besarnya getaran yang ditimbulkan.

**Kata Kunci:** getaran, cagar budaya, lalu lintas, Candi Mendut

### ABSTRACT

Mendut Temple is only 27 meters from the road. Many heavy vehicles like bus and truck are passing on the road. Vibration from the vehicles hit the temple everytime. If the frequency of vibration match the natural frequency of the temple, and the amplitude exceeded the vibration threshold of the temple, it will potentially cause damage to the structure.

Vibration measurements are carried out on 2 points, on the roof and floor of the temple to find out whether the vibrations caused by traffic have exceeded the vibration threshold. An accelerograph has been used to measure vibrations in 3 directions. An experiment also have been carried out with variation in vehicle sped dan weight to find out the factor that affect the amplitudo of vibrations.

From the measurements done at Mendut Temple, it turns out that the vibration caused by vehicles are 0,107 mm/s, still below the vibration threshold for horizontal plane of the highest floor 8,5 mm/s. From the experimental results it is also known that the speed and weight of the vehicle is directly proportional to the amplitude of vibration occurred.

Keywords: vibration, cultural heritage, traffic, Mendut Temple.

**Keywords:** Vibration; cultural heritage; traffic; Mendut Temple

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Semakin berkembangnya negara indonesia berakibat pada pembangunan yang berjalan progresif. Pembangunan infrastruktur ini ditandai dengan semakin banyak dibangun jalan-jalan raya, rumah-rumah penduduk, serta fasilitas umum lainnya. Pembangunan ini pun akhirnya sedikit banyak berdampak pada bangunan maupun struktur cagar budaya.

Beberapa candi di Indonesia terletak di area perkotaan dan diantaranya terletak sangat dekat dengan jalan raya. Hal ini sebenarnya sangat menguntungkan dari segi pariwisata karena akses jalan yang mudah menjadi satu nilai plus bagi pengunjung untuk berwisata di candi tersebut. Namun hal ini ternyata juga menjadi pisau bermata dua bagi kelestarian candi tersebut. Kendaraan yang melewati jalan tersebut ternyata menimbulkan getaran yang bila

mengenai candi dengan frekuensi tertentu dan dalam intensitas yang besar akan berpotensi merusak candi.

Candi Prambanan, Candi Kalasan, candi Mendut dan candi Lor adalah beberapa contoh candi yang terletak sangat dekat dengan jalan raya, sedangkan candi Gunung Gangsir adalah salah satu contoh candi yang terletak dekat dengan rel kereta api. Candi Prambanan dan Candi Kalasan bahkan terletak di dekat jalan provinsi yang sangat sering dilewati truk-truk barang dan bus berukuran besar. Getaran dari kendaraan bertonase tinggi ini bahkan bisa dirasakan meskipun berjarak puluhan meter dari jalan.

Kondisi ini memunculkan kekhawatiran di kalangan pelestari cagar budaya terkait dengan keutuhan dan kelestarian cagar budaya tersebut. Kendaraan berat yang melewati jalan raya tentu saja akan menghasilkan getaran yang bisa menggetarkan candi mengingat jarak yang pendek antara candi tersebut dengan jalan raya. Getaran ini tentu saja berpotensi untuk menimbulkan kerusakan pada cagar budaya bila berlangsung secara terus menerus serta melebihi batas ambang getaran yang diperbolehkan. Batas ambang getaran sebenarnya sudah ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup melalui peraturan nomor KEP-49/MENLH/11/1996 tentang Baku Tingkat Getaran. Pada aturan tersebut telah ditetapkan batas ambang kecepatan getaran kejut untuk bangunan kuno yang memiliki sejarah yang tinggi yaitu sebesar 2 mm/s (Kementerian Lingkungan Hidup, 1996). Namun aturan ini masih bersifat umum sehingga pada kajian ini akan digali lebih lanjut mengenai kesesuaian aturan ini dengan kondisi struktur candi dan bangunan cagar budaya lainnya di Indonesia.

Untuk dapat menjawab kekhawatiran ini tentu saja harus dilakukan kajian terhadap dampak getaran yang ditimbulkan oleh kendaraan bermotor terhadap bangunan dan struktur cagar budaya. Dari hasil pengukuran ini kemudian akan dianalisis dampaknya terhadap cagar budaya dalam jangka waktu panjang serta pendek. Dengan adanya kajian ini diharapkan dapat diperoleh rekomendasi mengenai aturan jarak jalan raya yang diperbolehkan di dekat lingkungan cagar budaya serta jenis kendaraan, berat kendaraan, kondisi jalan, dan kecepatan kendaraan yang melewati jalan raya di dekat cagar budaya.

Kegiatan ini dilakukan untuk mendukung fungsi Balai Konservasi Borobudur dalam hal pelaksanaan kajian konservasi terhadap aspek teknik sipil, arsitektur, geologi, biologi, kimia, dan arkeologi Candi Borobudur dan cagar budaya lainnya. Manfaat dari kajian ini adalah diperolehnya batas ambang kendaraan yang diperbolehkan melintas pada jalan di dekat bangunan atau struktur cagar budaya.

## **Maksud dan Tujuan**

Tujuan dari dilaksanakannya kajian ini adalah mengukur besarnya respon struktur Candi Mendut akibat getaran lalu lintas, serta menganalisa respon tersebut. Maksud dari kajian ini yaitu menentukan tindakan preventif yang harus dilakukan untuk dapat mengurangi getaran yang timbul pada Candi Mendut.

## **Landasan Teori**

Getaran adalah perulangan dari suatu sistem mekanik atau struktur terhadap titik kesetimbangannya (Graham, 2000). Getaran yang merambat disebut dengan gelombang. Gelombang terbagi menjadi 2 jenis yaitu gelombang elektromagnetik yang tidak membutuhkan medium untuk merambat dan gelombang mekanik yang membutuhkan medium untuk merambat.

Faktor yang mempengaruhi dampak dari getaran kendaraan terhadap bangunan dapat dibagi menjadi 3 komponen yaitu sumber getaran, jalur rambat gelombang dan penerima getaran (Rainer, 1982).

1. Sumber getaran  
Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya getaran akibat kendaraan yaitu kecepatan dan massa kendaraan, tingkah laku getaran dari kendaraan, jenis suspensi kendaraan, kondisi jalan, serta jenis ban. (Bachmann & Ammann, 1987)
2. Jalur rambat gelombang  
Gelombang yang dihasilkan oleh kendaraan menjalar melalui tanah dan akan menurun intensitasnya bila semakin jauh dari sumbernya dan setelah melalui proses peredaman oleh tanah itu sendiri. Tanah yang lembut dan padat mampu menyalurkan gelombang lebih baik daripada tanah yang kering dan berpasir. Sementara itu batu menghantarkan gelombang dengan baik bahkan mampu sedikit menguatkan gelombang dengan frekuensi tinggi, hanya saja gelombang dengan frekuensi tinggi cenderung tidak berbahaya terhadap bangunan.
3. Penerima getaran  
Penerima getaran dalam hal ini adalah bangunan cagar budaya. Gelombang pada awalnya akan mengenai pondasi bangunan, kemudian setelah itu menjalar naik ke atas. Semakin tinggi tingkat bangunan maka akan terjadi penguatan getaran yang mencapai sebanyak 2 sampai 5 kali. Hal ini bergantung pada getaran itu sendiri, kerentanan komponen bangunan (dinding, lantai, jendela, balok) terhadap getaran yang tergantung pada frekuensi natural dan redaman. Getaran juga mampu menimbulkan dampak sekunder seperti getaran pada perabot rumah.

Getaran dapat dikurangi dengan dengan cara memberikan perlakuan pada salah satu atau beberapa komponen di atas. Pada komponen sumber getaran dapat dilakukan pengaturan lalu lintas pada jalan di dekat situs misalnya pelarangan kendaraan berat, pembatasan kecepatan kendaraan yang melintas, perbaikan kondisi jalan dan sebagainya.

Pada tahun 1996, Menteri Lingkungan Hidup menetapkan Baku Tingkat Getaran untuk kenyamanan dan kesehatan, getaran berdasarkan dampak kerusakan, serta getaran berdasarkan jenis bangunan yang tertuang pada KEP - 49/MENLH/11/1996. Pada peraturan tersebut getaran terbagi menjadi 2 yaitu getaran mekanik dan getaran kejut. Yang dimaksud getaran mekanik adalah getaran yang ditimbulkan oleh sarana dan peralatan kegiatan manusia. Getaran jenis ini berlangsung secara terus-menerus hampir setiap harinya. Beberapa contoh getaran mekanik yaitu getaran dari kendaraan bermotor dan getaran dari

**Tabel 1.** Baku tingkat getaran mekanik berdasarkan jenis bangunan menurut Kementerian Lingkungan Hidup no KEP – 49/MENLH/11/1996 Lampiran III

Kelas	Tipe Bangunan	Kecepatan Getaran (mm/detik)			
		Pada Fondasi			Pada Bidang Datar di Lantai Paling Atas
		Frekuensi			
<10 Hz	10 – 50 Hz	50 – 100Hz			
1	Bangunan untuk keperluan niaga, bangunan industri, dan bangunan sejenis	10	20 – 40	40 - 50	40
2	Perumahan dan bangunan dengan rancangan dan kegunaan sejenis	5	5 - 15	15 - 20	15
3	Struktur yang karena sifatnya peka terhadap getaran, tidak seperti tersebut pada no 1 dan 2, dan mempunyai nilai budaya tinggi, seperti bangunan yang dilestarikan	3	3 – 8	8 – 10	8,5

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup, 1996

aktifitas pembangunan. Getaran kejut adalah getaran yang terjadi secara tiba-tiba dan sesaat. Contoh dari getaran jenis ini yaitu gempa bumi, ledakan bom, kecelakaan, dan sebagainya.

Baku tingkat getaran mekanik berdasarkan jenis bangunan dibagi menjadi 3 yaitu bangunan untuk niaga dan industri, bangunan perumahan, dan bangunan yang sifatnya peka terhadap getaran dan memiliki nilai budaya tinggi (Tabel 1). Pengukuran getaran dilakukan pada pondasi bangunan dan bidang datar pada lantai paling atas. Pada pondasi dibagi menjadi 3 range frekuensi yaitu kurang dari 10 Hz, 10 - 50 Hz dan 50 - 100 Hz, sedangkan pada lantai teratas pengukuran dilakukan pada seluruh frekuensi.

Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa untuk bangunan cagar budaya termasuk dalam kelas 3 dimana baku tingkat getaran yang diperbolehkan pada fondasi harus dibawah 3 mm/detik untuk frekuensi dibawah 10 Hz, 3 - 8 mm/detik untuk frekuensi 10 -50 Hz dan 8 - 10 Hz untuk frekuensi 50 - 100 Hz, sedangkan pada lantai teratas tidak lebih dari 8,5 Hz untuk semua frekuensi.

Selain batas ambang yang ditetapkan pemerintah tersebut juga terdapat beberapa versi batas ambang getaran pada bangunan yang ditimbulkan oleh lalu lintas. Bata dalam penelitiannya tahun 1971 menyebutkan terdapat 5 kategori dampak dari getaran lalu lintas terhadap bangunan yang dapat dilihat pada Tabel 2. (Bata, 1971).

Namun berbeda dengan standar pemerintah, dalam hasil penelitian ini batas ambang ditentukan dalam percepatan bukan kecepatan. Batas ambang ini sudah memperhitungkan jumlah kendaraan. Jumlah kendaraan ini berkaitan dengan kondisi *fatigue* bangunan.

Batas ambang getaran tersebut kebanyakan ditujukan untuk bangunan modern, hanya sedikit yang secara spesifik mengatur untuk bangunan cagar budaya. Dampak getaran pada bangunan cagar budaya sebenarnya mirip dengan bangunan modern pada umumnya meskipun beberapa ketidakpastian dan kasus khusus dapat terjadi. Hal tersebut disebabkan oleh : (Rainer, 1982).

1. Bangunan cagar budaya berumur cukup tua dan tidak kokoh
2. Material bangunan dan konfigurasi strukturnya berbeda dengan yang digunakan pada masa ini sehingga batas ambang getaran tidak selamanya bisa dipakai
3. Tingginya nilai yang terkandung di dalam bangunan cagar budaya memerlukan jaminan yang lebih terhadap kerusakan
4. Harus memperhatikan kemungkinan terjadinya peristiwa yang terjadi di masa lalu yang membawa dampak buruk dalam jangka panjang

**Tabel 2.** Potensi Kerusakan yang ditimbulkan oleh lalu lintas berdasarkan percepatan getaran

Kategori	Percepatan rata-rata (g)	Lokasi bangunan	Kepadatan lalu lintas	Potensi kerusakan
A	<0,005	Pada jalan sekunder	-	Tidak ada
B	0,005 – 0,010	>10m dari jalan utama	<2000	Tidak ada dalam beberapa dekade
C	0,005 – 0,010	Di dekat jalan utama	>2000	Mungkin ada dalam beberapa dekade ke depan
D	0,010 – 0,020	Di dekat jalan utama	>2000	Kemungkinan dalam 1 atau 2 dekade ke depan
E	>0,020	Di dekat jalan utama	>2000	Rusak dalam beberapa tahun ke depan

Sumber: Miroslav Bata, 1971

## METODE

### Alat

Alat pengukur getaran yang dipergunakan dalam kajian ini adalah accelerograph Kinematics ETNA. Alat ini mengukur percepatan getaran pada 3 arah (3 sumbu) yaitu 2 arah horizontal dan 1 arah vertikal. Pengoperasian dan pengolahan data dari alat ini



**Gambar 1.** Accelerograph Kinematic ETNA  
(Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2019)

dilakukan melalui komputer / laptop. Getaran yang dapat terukur oleh alat ini berkisar pada rentang frekuensi DC hingga 80 Hz, serta rentang percepatan 0,25g hingga 4g. Penggunaan alat ini hanya dapat dilakukan pada bidang datar horizontal. Terdapat lubang untuk pemasangan ankur pada bagian bawah alat, namun karena tidak boleh memasang ankur pada bangunan kolonial maka alat ini hanya diletakkan saja di atas lantai.

### Rancangan Pengambilan Data

Kajian ini pada dasarnya terdiri dari 2 tahapan yaitu pengukuran getaran di lapangan, dan analisa hasil getaran yang diperoleh. Pengambilan data respon getaran dilakukan pada Candi Mendut.

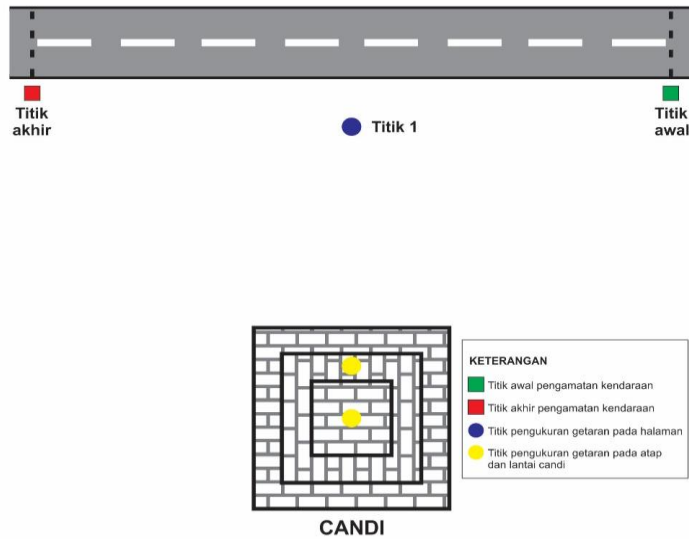
#### *Pengukuran respon bangunan akibat getaran pada situs Candi Mendut*

Ada 2 jenis kegiatan yang dilakukan yaitu pengamatan hubungan antara kecepatan kendaraan dan beban kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan, serta pengamatan respon struktur Candi Mendut akibat getaran kendaraan.

Skema kegiatan pengambilan data ini dapat dilihat pada Gambar 2. Pengambilan data dilakukan pada 3 titik yaitu di halaman, di lantai bilik dan atap candi. Untuk pengamatan hubungan antara kecepatan dan beban kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan dilakukan pada titik 1, sedangkan pengamatan respon struktur Candi Mendut akibat getaran kendaraan pada lantai bilik dan atap. Jarak dari titik 1 ke jalan raya adalah 3,51 m, jarak dari titik pengambilan data lantai bilik ke jalan raya adalah 38,42 m dan jarak dari titik pengambilan data atap ke jalan raya adalah 31,13 m. Pengukuran ini sesuai dengan petunjuk dari baku ambang getaran yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup Nomor KEP - 49/MENLH/11/1996 dimana pengambilan data getaran dilakukan di bidang datar dan juga atap bangunan.

Jumlah pengambilan data dapat dilihat pada Tabel 3. Pengamatan respon struktur Candi Mendut terhadap getaran truk besar di lantai bilik hanya dilakukan 1 kali karena sangat jarang truk besar yang lewat ketika dilakukan pengukuran.

Sebelum dilakukan pengukuran, terlebih dahulu ditentukan titik awal dan titik akhir pengamatan kendaraan. Titik-titik ini dipilih dengan pertimbangan bahwa titik tersebut merupakan titik terjauh dimana getaran yang ditimbulkan kendaraan masih terasa sampai ke candi. Ketika kendaraan berada pada titik awal, pengamat kendaraan menginformasikan kepada operator vibration meter dan accelerograph untuk mulai merekam data getaran. Pengukuran data tetap dilakukan hingga kendaraan melewati titik akhir. Setelah kendaraan



**Gambar 2.** Skema kegiatan pengambilan data pada bangunan dan struktur candi  
(Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2019)

melewati titik akhir, pengamat kendaraan menginformasikan kepada operator untuk menghentikan perekaman data.

Accelerograph memiliki 3 sumbu pengukuran yaitu sumbu X, sumbu Y dan sumbu Z. Sumbu X diatur pada arah yang tegak lurus dengan arah jalan raya, sumbu Y diatur sejajar dengan arah jalan raya dan sumbu Z merupakan sumbu vertikal.

Tim kajian membagi jenis kendaraan menjadi 3 jenis yaitu truk kecil-sedang, truk besar dan bus. Pembagian ini didasarkan pada jenis kendaraan yang sering melewati jalan Candi Mendut. Truk kecil - sedang termasuk dalam kendaraan berat menengah dengan beban maksimal 16 ton. Truk jenis ini memiliki konfigurasi 2 sumbu yaitu 1.1 dan 1.2. Truk besar termasuk dalam kendaraan berat dengan beban mencapai 21 - 50 ton (Direktur Jendral Perhubungan, 2008). Kendaraan jenis ini memiliki sumbu lebih dari 3. Bus besar memiliki beban maksimal 16 ton dengan konfigurasi sumbu 1.1, 1.11 dan 1.2.

**Tabel 3.** Jumlah pengambilan data berdasarkan jenis kendaraan dan titik pengambilan data

No	Variasi pengambilan data	Titik pengambilan data	Jumlah pengambilan data		
			Truk besar	Truk kecil - sedang	Bus besar
1	Pengamatan hubungan kecepatan kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan	Titik 1	-	6	-
2	Pengamatan hubungan beban kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan	Titik 1	-	5	-
3	Pengamatan respon struktur Candi Mendut akibat getaran kendaraan	Lantai Bilik	1	3	3
		Atap Candi	3	3	3

Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019

**Analisa data getaran pada bangunan dan struktur candi**

Data yang diperoleh pada kegiatan sebelumnya akan diolah dan dianalisa sehingga dapat diketahui dampaknya terhadap keutuhan bangunan dan struktur cagar budaya. Untuk dapat mengetahui apakah getaran tersebut berbahaya atau tidak, maka perlu dibandingkan dengan batas ambang getaran dari Kementerian Lingkungan Hidup No KEP-49/MENLH/11/1996. Getaran lalu lintas tergolong dalam getaran mekanik, dimana getaran ini berlangsung terus menerus. Oleh karena itu digunakan Tabel Lampiran III sebagai batas ambang getaran yang diperbolehkan.

**Tabel 4.** Variasi kecepatan dan beban kendaran pada pengamatan hubungan kecepatan kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan

Kecepatan	20 km/jam	25 km/jam	30 km/jam	35 km/jam	40 km/jam	45 km/jam
Beban kendaraan	12 ton					

Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019

**Tabel 5.** Variasi kecepatan dan beban kendaraan pada pengamatan hubungan beban kendaraan terhadap getaran yang dihasilkan

Kecepatan	40 km/jam				
Beban kendaraan	2,3 ton	5,5 ton	8,7 ton	12 ton	13,5 ton

Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019

**HASIL PENELITIAN**

**Respon Getaran Terhadap Variasi Kecepatan Kendaraan**

Truk yang digunakan adalah Mitsubishi Fuso sumbu 2 dengan konfigurasi 1-2. Dalam percobaan ini, muatan truk tidak diisi maksimal 7 m<sup>3</sup> karena kesulitan supir dalam mengendarai truk. Beban yang terlalu berat menyebabkan pengereman dan belok yang sulit sehingga hanya diisi 6m<sup>3</sup>. Total berat kendaraan beserta muatan ini adalah sekitar 11.942 kg atau sekitar 12 ton. Truk menggunakan sumbu 1:2 dimana perbandingan beratnya adalah 6:10 (Direktur Jendral Perhubungan, 2008). Dengan perhitungan maka diperoleh bahwa sumbu depan menahan beban 4,5 ton dan sumbu belakang menahan 7,5 ton. 1 roda depan masing-masing menahan 2,25 ton dan 1 roda belakang menahan 1,875 ton. Dari hasil perhitungan ini diperoleh bahwa roda depan menahan beban lebih banyak daripada roda belakang.

Rute truk melintas adalah dari arah selatan - utara. Rute ini dipilih karena ruas yang digunakan paling dekat dengan bangunan candi. Data respon getaran pada titik 1 dengan variasi kecepatan kendaraan dapat dilihat pada Gambar 3.

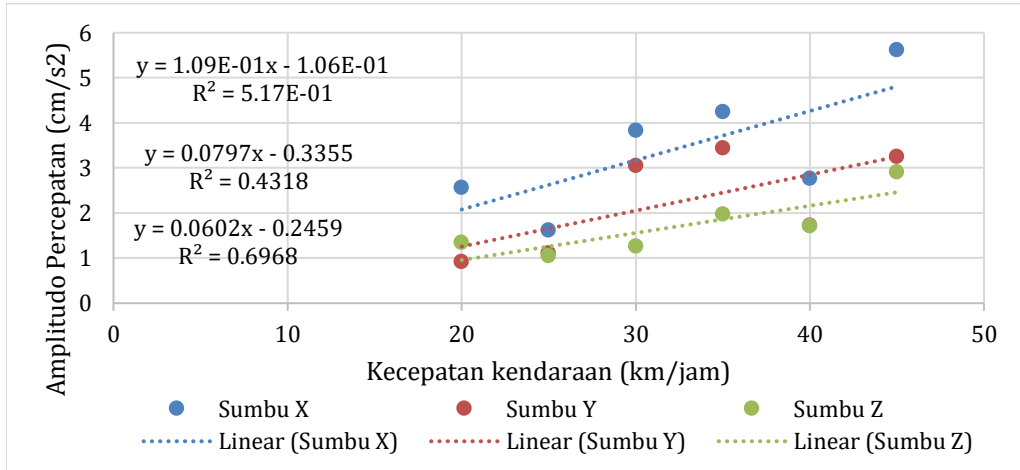
Pola data yang terlihat pada grafik tersebut adalah terjadinya peningkatan respon getaran jika terjadi peningkatan kecepatan kendaraan. Namun demikian terdapat 2 data yang keluar dari pola yaitu data pada kecepatan 25 km/jam dan pada 40 km/jam. Kedua data ini nilainya lebih kecil dari data sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa getaran yang timbul sangat dipengaruhi oleh banyak faktor.

Bahkan untuk kondisi yang dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki berat kendaraan yang sama, sopir yang sama, serta lintasan yang sama masih menunjukkan adanya perbedaan respon getaran.

Amplitudo getaran terbesar selalu muncul pada sumbu X sehingga getaran terbesar yang timbul memiliki arah tegak lurus dari arah kendaraan. Amplitudo getaran pada sumbu Z hampir selalu paling kecil jika dibandingkan dengan kedua sumbu lainnya, hal ini

menunjukkan bahwa lalu lintas lebih banyak menimbulkan respon getaran horizontal dibandingkan dengan getaran vertikal.

Percobaan ini membuktikan bahwa kecepatan sangat berpengaruh terhadap respon getaran yang muncul. Semakin cepat kendaraan maka akan semakin besar getaran yang ditimbulkan. Sehingga untuk dapat mengurangi getaran yang timbul pada bangunan atau struktur cagar budaya dapat direkomendasikan untuk dilakukan pembatasan kecepatan kendaraan.

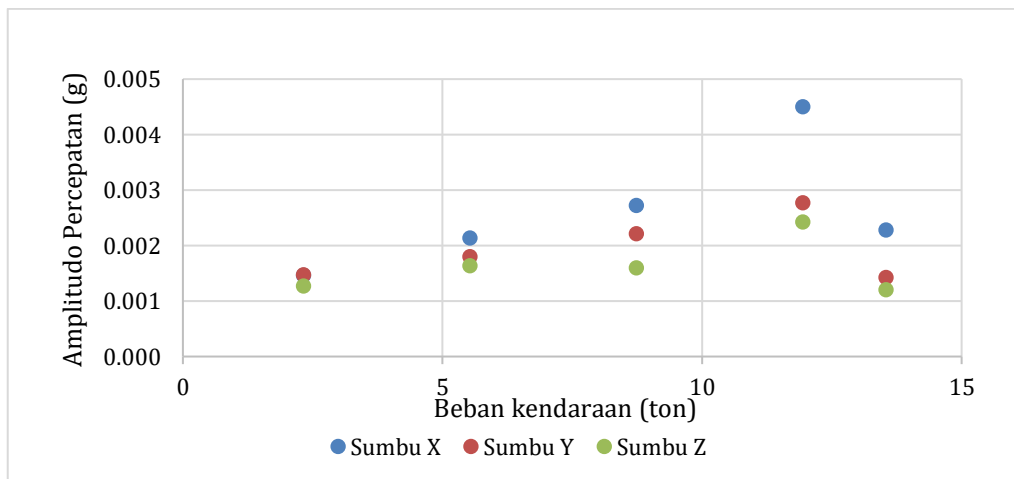


**Gambar 3.** Grafik pengaruh kecepatan kendaraan terhadap getaran yang timbul pada titik 1 (Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2019)

### Respon Getaran Terhadap Variasi Beban Kendaraan

Variasi muatan truk yang digunakan dalam percobaan ini adalah muatan kosong, 2, 4, 6 dan 7 m<sup>3</sup>. Dengan mengasumsikan pasir memiliki massa jenis 1.602 kg/m<sup>3</sup>, maka berat truk setelah diberi muatan dapat dihitung. Perhitungan beban masing-masing roda masih menggunakan metode yang sama seperti pada percobaan dengan variasi kecepatan. Data berat kendaraan dan beban masing-masing roda dapat dilihat pada Tabel 3.

Percobaan ini hanya memvariasikan berat kendaraan sehingga titik pengambilan data tidak berubah-ubah hanya pada titik 1 dengan jarak sekitar 3,51 m dari tepi jalan.



**Gambar 4.** Grafik pengaruh berat kendaraan terhadap getaran yang timbul pada titik 1 Candi Mendut (Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2019)

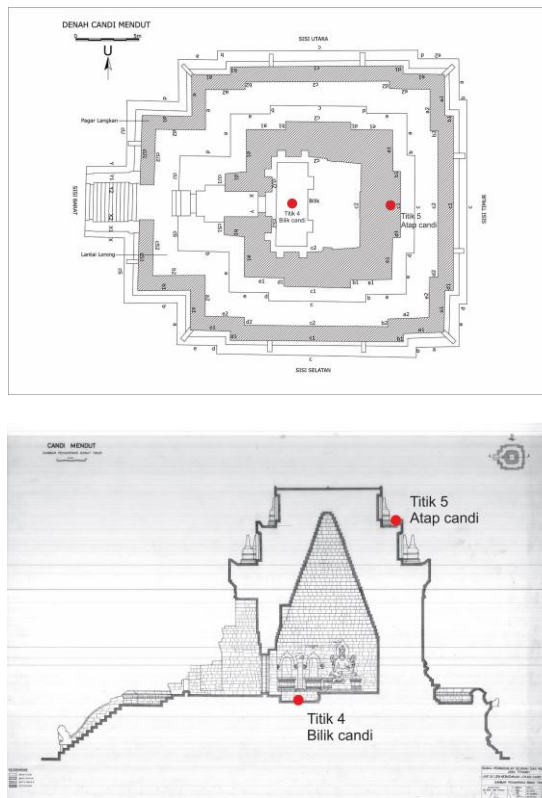


Kecepatan kendaraan juga demikian, diatur agar sebisa mungkin melaju pada kecepatan tetap 40 km/jam. Hasil dari percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.

Data pada berat kendaraan 2.000 kg hingga 12.000 kg membentuk pola yang cukup baik. Pada rentang ini semakin berat kendaraan maka semakin besar getaran yang tertangkap pada titik 1. Peningkatan ini bersifat eksponensial yang dapat terlihat dengan jelas pada data berat 12.000 kg, dimana perbedaan dengan data sebelumnya cukup jauh. Namun demikian terdapat anomali pada data dengan berat kendaraan 13,5 ton. Pada data ini malah menunjukkan penurunan percepatan getaran yang bahkan lebih kecil daripada data dengan berat 8,7 ton. Hal ini semakin memperkuat pernyataan bahwa banyak faktor yang mempengaruhi getaran yang timbul. Bahkan untuk kondisi yang dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki kecepatan kendaraan yang sama, sopir yang sama, serta lintasan yang sama masih menunjukkan adanya perbedaan respon getaran.

Amplitudo getaran terbesar dominan muncul pada sumbu X sehingga getaran terbesar yang timbul memiliki arah tegak lurus dari arah kendaraan. Amplitudo getaran pada sumbu Z selalu paling kecil jika dibandingkan dengan kedua sumbu lainnya, hal ini menunjukkan bahwa lalu lintas lebih banyak menimbulkan respon getaran horizontal dibandingkan dengan getaran vertikal.

Percobaan ini membuktikan bahwa berat sangat berpengaruh terhadap respon getaran yang muncul. Semakin berat kendaraan maka akan semakin besar getaran yang ditimbulkan. Sehingga untuk dapat mengurangi getaran yang timbul pada bangunan atau struktur cagar budaya dapat direkomendasikan untuk dilakukan pembatasan berat kendaraan.



**Gambar 5.** Lokasi pengambilan data getaran di struktur Candi Mendut  
(sumber : peta BPCB Jawa Tengah, 1992, dan data primer Balai Konservasi Borobudur, 2019)

## Data Respon Bangunan Pada Candi Mendut

Diambil dari data Kajian Stabilitas Struktur Candi Mendut (2018) diperoleh data tanah di halaman Candi Mendut adalah sebagai berikut (Ekarini, 2018)

- Pada kedalaman 0 - 1,3 m merupakan lapisan tanah pasir halus hingga sedang berlanau, berwarna coklat kehitaman dengan kepadatan sedang, sedangkan kedalaman 1,3 - 4,5 m berupa lanau berpasir halus, warna coklat, konsistensi sedang hingga kaku, dengan nilai SPT (Standard Penetrating Test) berkisar antara 9 - 28.
- Tanah di bawah Candi Mendut memiliki tingkat kepadatan sedang, hal ini dapat dilihat dari hasil uji SPT pada tiga titik dengan nilai SPT pada kedalaman 4 meter dengan rata-rata 17 (tanah dengan kepadatan sedang memiliki nilai SPT berkisar antara 10 - 30).

Terdapat 2 titik pengambilan data di Candi Mendut yang berada di struktur candi. Peta lokasi titik pengambilan data dapat dilihat pada bagian gambar 5. Jarak masing-masing titik terhadap jalan dapat dilihat pada Tabel 6. Candi Mendut terletak sekitar 27 meter dari jalan Mayor Kusen. Jalan ini merupakan jalan nasional kelas I sehingga memiliki kapasitas untuk menahan beban 10 ton untuk tiap sumbu roda kendaraan.

Batas ambang getaran untuk bangunan yang ditetapkan oleh Miroslav Bata mempertimbangkan 2 hal yaitu besarnya percepatan getaran tersebut serta jumlah kendaraan yang melintas tiap harinya. Jumlah kendaraan yang melintas tiap harinya diperoleh dari Data Lalu Lintas Harian (LLH) yang dikeluarkan oleh Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional VII Semarang.

**Tabel 6.** Jarak titik pengambilan data dari jalan

Lokasi Pengambilan Data	Jarak dari jalan
Bilik	38,42 m
Atap	31,13 m

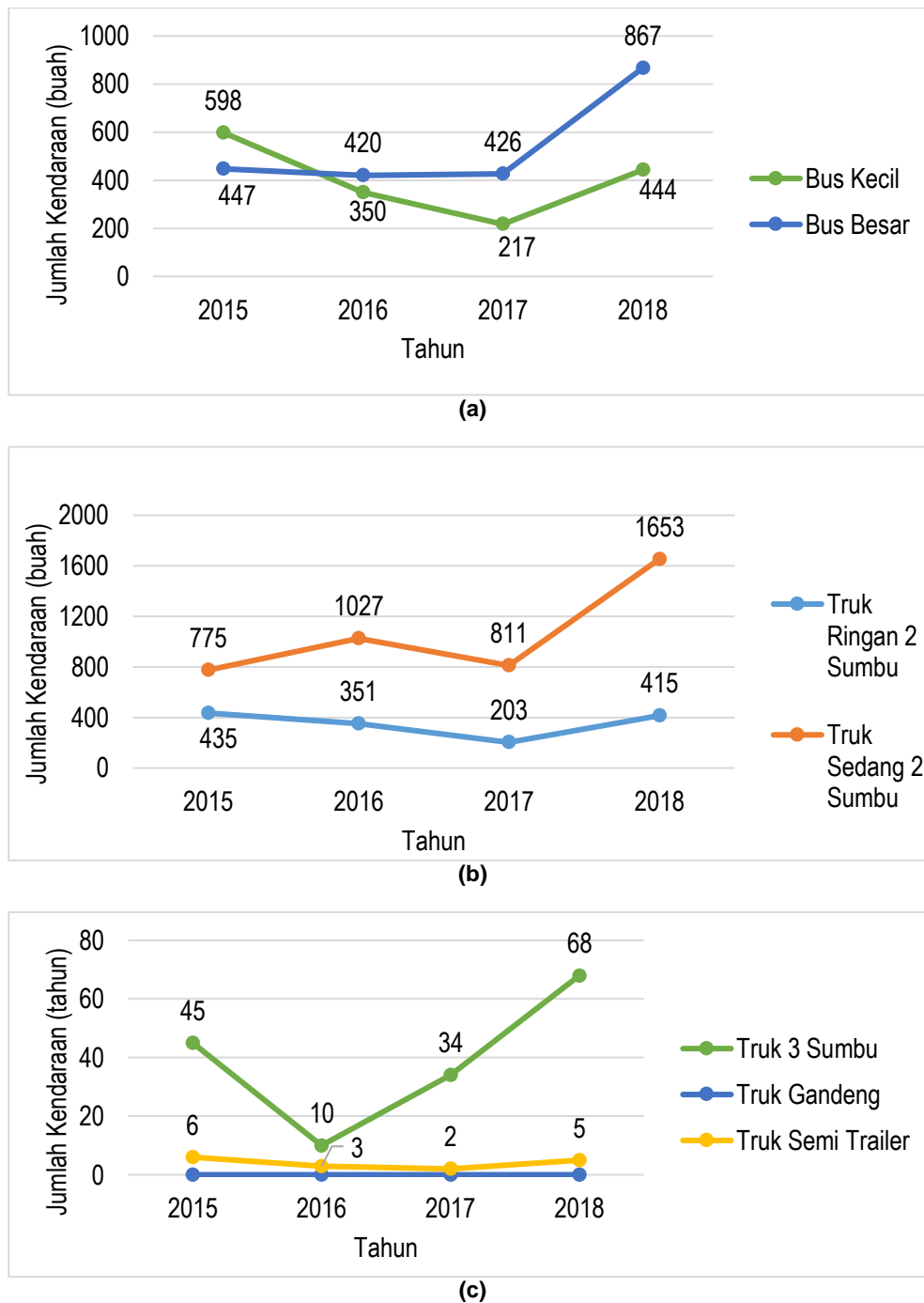
Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019

Grafik data lalu lintas harian kendaraan dari tahun 2015 - 2018 dengan kategori kendaraan bus dapat dilihat pada Gambar 6. Dari grafik ini terlihat bahwa tidak terdapat pola yang teratur pada tahun 2015 hingga 2017. Namun pada tahun 2017 - 2018 terdapat peningkatan yang cukup tajam. Bus besar mengalami peningkatan hingga mencapai 2 kali lipat, sedangkan bus kecil meskipun mengalami penurunan dari tahun-tahun sebelumnya namun pada tahun 2017 - 2018 mengalami peningkatan hingga 2 kali lipat. Meskipun demikian pada tahun 2018 jumlah bus kecil yang melintas tidak sebanyak pada tahun 2015 yang mencapai 598 buah. Hal ini menunjukkan adanya potensi peningkatan jumlah kendaraan di masa yang akan datang.

Grafik peningkatan jumlah kendaraan truk ringan - sedang dengan sumbu 2 dapat dilihat pada Gambar 6 b. Pada jenis kendaraan ini juga terdapat peningkatan jumlah kendaraan dari tahun 2017 - 2018. Jumlah truk sedang 2 sumbu maupun truk ringan 2 sumbu mengalami peningkatan sebanyak 2 kali lipat dari tahun 2017. Hal ini juga menunjukkan potensi peningkatan jumlah kendaraan di masa yang akan datang.

Hal yang sama juga terjadi pada kendaraan berat (truk 3 sumbu dan truk semi trailer). Dari tahun 2017 - 2018 terdapat peningkatan sebanyak 2 kali lipat pada truk 3 sumbu, sedangkan pada truk semi trailer terdapat peningkatan sebanyak 2,5 kali lipat. Peningkatan ini juga menunjukkan potensi penambahan kendaraan yang cukup signifikan pada tahun-tahun mendatang. Kendaraan jenis truk gandeng tidak melintas di jalan ini.

Kendaraan yang melintas di jalan Mayor Kusen didominasi oleh sepeda motor yang mencapai 54,55 % dari jumlah kendaraan harian yang melintas. Kendaraan ringan seperti mobil, mikro bus, dan pick up menempati urutan kedua dengan persentase mencapai 36 %.



**Gambar 6.** Grafik pengaruh berat kendaraan terhadap getaran yang timbul pada titik 1 Candi Mendut (Sumber: Balai Konservasi Borobudur, 2019)

Kendaraan berat seperti bus dan truk hanya menyumbang kurang dari 10 % dengan rincian bus 3,58 %, truk kecil - sedang 5,65 % dan truk besar 0,2 %.

Sesuai dengan percobaan yang dilakukan sebelumnya, maka semakin berat kendaraan akan menimbulkan getaran yang lebih besar. Oleh karena itu pengukuran respon getaran pada struktur Candi Mendut difokuskan pada kendaraan berat yaitu bus dan truk saja. Data yang diperoleh berupa percepatan dengan satuan  $g$ , kecepatan dengan satuan

*mm/s*. Pada kajian ini dianalisa getaran yang timbul menurut batas ambang yang dikeluarkan oleh Miroslav Bata dan Kementerian Lingkungan Hidup. Batas ambang oleh Miroslav Bata diatur dalam besaran percepatan, sedangkan batas ambang oleh Kementerian Lingkungan Hidup diatur dalam besaran kecepatan.

### ***Percepatan Getaran***

Pengambilan data dilakukan sebanyak 3 kali untuk masing-masing jenis kendaraan. Hanya saja karena sedikitnya truk besar yang melintas maka hanya diperoleh 1 data truk besar ketika pengukuran di dalam bilik candi. Hasil pengambilan data dalam bentuk grafik dan tabel yang dapat dilihat pada Gambar 7 dan Tabel 8.

Dari ketiga grafik tersebut dapat terlihat bahwa getaran terbesar terukur pada arah tegak lurus maupun sejajar arah kendaraan. Getaran vertikal cenderung lebih kecil daripada getaran lainnya. Fenomena yang sama juga terjadi pada percobaan getaran dengan variasi kecepatan dan berat kendaraan. Hal ini menunjukkan bahwa lalu lintas menimbulkan getaran yang lebih besar pada arah horizontal daripada arah vertikal.

Akselerasi getaran pada bilik candi mencapai nilai maksimal  $2,5 \times 10^{-4} g$  yang ditimbulkan oleh truk kecil, sedangkan pada atap mencapai nilai maksimal 4 kali lebih besar yaitu  $1,02 \times 10^{-3} g$  yang ditimbulkan oleh truk besar. Perbandingan kedua nilai ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan respon getaran di atap atau bagian candi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan di bilik atau bagian candi yang lebih rendah.

**Tabel 9.** Data amplitudo percepatan getaran respon Candi Mendut terhadap lalu lintas

Jenis Kendaraan	Titik pengambilan data	Percepatan Getaran ( $\times 10^{-3} G$ )					
		Sumbu X		Sumbu Y		Sumbu Z	
		Rata-rata	Maksimal	Rata-rata	Maksimal	Rata-rata	Maksimal
Truk Kecil	Atap	0.599	0.751	0.414	0.699	0.172	0.249
	Bilik	0.145	0.243	0.171	0.250	0.084	0.123
Truk Besar	Atap	0.601	0.693	0.335	0.395	0.177	0.227
	Bilik	0.148	0.222	0.092	0.193	0.084	0.133
Bus Besar	Atap	0.742	0.930	0.707	1.020	0.279	0.361
	Bilik	0.027	0.027	0.025	0.025	0.014	0.014

*Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019*

Dari data yang diperoleh ini kemudian dibandingkan dengan batas ambang getaran yang dikeluarkan oleh Miroslav Bata (Tabel 2). Menurut data lalu lintas harian yang dikeluarkan oleh Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional VII, total jumlah kendaraan tipe bus, kendaraan berat menengah dan kendaraan berat pada tahun 2018 mencapai 3.452 kendaraan perhari dengan rincian pada Tabel 7.

Kendaraan dengan tipe truk kecil - sedang (kendaraan berat menengah) melintas sebanyak 2.068 perhari, dengan percepatan getaran rata-rata  $0,000599 g$  maka getaran dari kendaraan ini masuk dalam kategori A dimana pada kategori ini tidak terjadi kerusakan pada masa mendatang. Kendaraan dengan tipe bus melintas sebanyak 1.311 kendaraan perhari dengan percepatan getaran rata-rata mencapai  $0,000601 g$ . Getaran yang dihasilkan dari kendaraan jenis ini juga masuk dalam kategori A. Untuk tipe ketiga yaitu truk besar melintas sebanyak 73 kendaraan perhari. Percepatan getaran rata-rata yang terukur dari kendaraan jenis ini adalah sebesar  $0,000742 g$ . Getaran jenis ini juga masuk dalam kategori A. Dari hasil

tersebut, maka jika ditinjau dari percepatan respon getaran yang terjadi di Candi Mendut, maka lalu lintas belum menimbulkan getaran yang berbahaya terhadap kelestarian dan keutuhan struktur Candi Mendut. Meskipun demikian, terdapat beberapa getaran yang mencapai 20% dari batas ambang tersebut, sehingga hal ini menunjukkan terdapat potensi nilai ini akan naik dan bukan tidak mungkin melebihi batas ambang. Perlu dilakukan monitoring secara periodik sehingga ketika nilai respon getaran yang terukur mendekati batas ambang dapat dilakukan tindakan preventif.

### Kecepatan Getaran

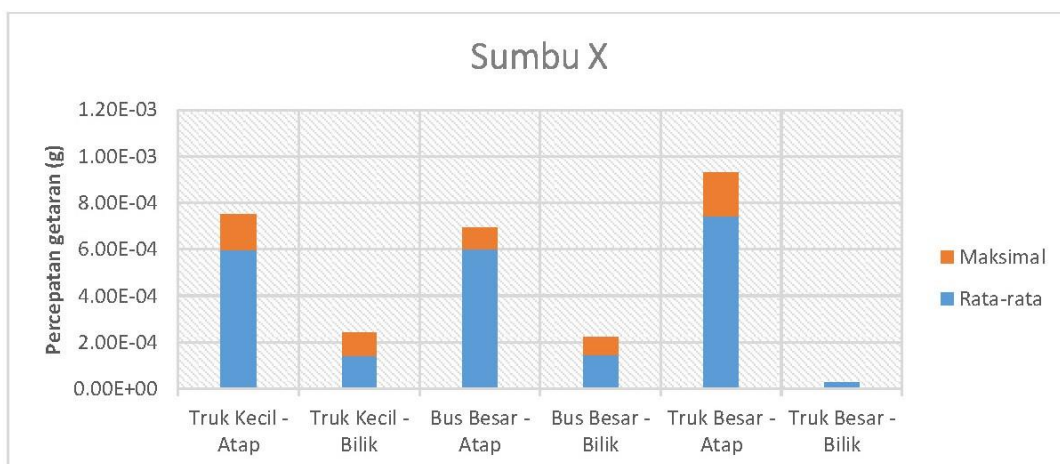
Data percepatan getaran yang telah diperoleh dikonversi menjadi data kecepatan getaran menggunakan program ViewWave versi 2.24. Hasil konversi tersebut kemudian dicatat amplitudonya dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan tabel pada Gambar 8 dan Tabel 9.

Kecepatan getaran pada bilik candi mencapai nilai maksimal 0,0514 mm/s yang ditimbulkan oleh bus besar, sedangkan pada atap mencapai nilai maksimal 2 kali lebih besar yaitu 0,107 mm/s yang ditimbulkan oleh truk kecil-sedang. Dari data yang diperoleh ini kemudian dibandingkan dengan batas ambang getaran yang dikeluarkan Kementerian Lingkungan Hidup untuk getaran mekanik pada kelas 3 (Tabel 2.2). Untuk getaran pada bidang datar di lantai paling atas memiliki batas ambang hingga 8,5 mm/s. Jika hasil pengukuran dibandingkan dengan batas ambang ini maka terdapat selisih yang sangat jauh. Amplitudo getaran yang terukur hanya mencapai 0,107 mm/s atau hanya sekitar 1,26% dari batas ambang. Hal ini menunjukkan bahwa ditinjau dari kecepatan respon getaran Candi Mendut, maka lalu lintas yang berada di dekat Candi Mendut tidak berbahaya terhadap kelestarian dan keutuhan struktur Candi Mendut.

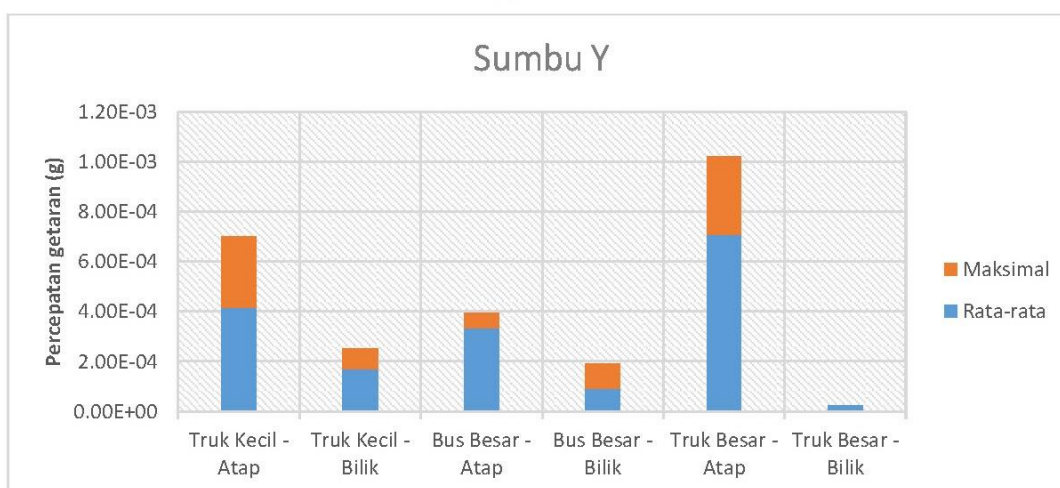
**Tabel 9.** Data amplitudo kecepatan getaran respon Candi Mendut terhadap lalu lintas

Jenis Kendaraan	Titik pengambilan data	Kecepatan Getaran (mm/s)					
		Sumbu X		Sumbu Y		Sumbu Z	
		Rata-rata	Maksimal	Rata-rata	Maksimal	Rata-rata	Maksimal
Truk kecil	Atap	0.0696	0.0823	0.0802	0.1070	0.0333	0.0401
	Bilik	0.0344	0.0374	0.0340	0.0443	0.0283	0.0297
Bus besar	Atap	0.0751	0.1000	0.0685	0.0711	0.0410	0.0463
	Bilik	0.0416	0.0514	0.0326	0.0418	0.0339	0.0448
Truk besar	Atap	0.0780	0.0843	0.0625	0.0738	0.0419	0.0451
	Bilik	0.0324	0.0324	0.0287	0.0287	0.0283	0.0283

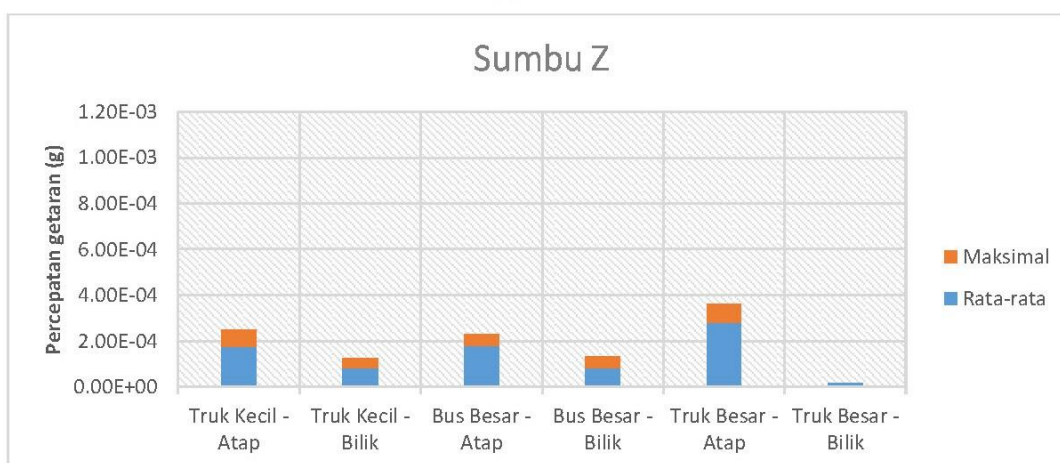
Sumber : Balai Konservasi Borobudur, 2019



(a)

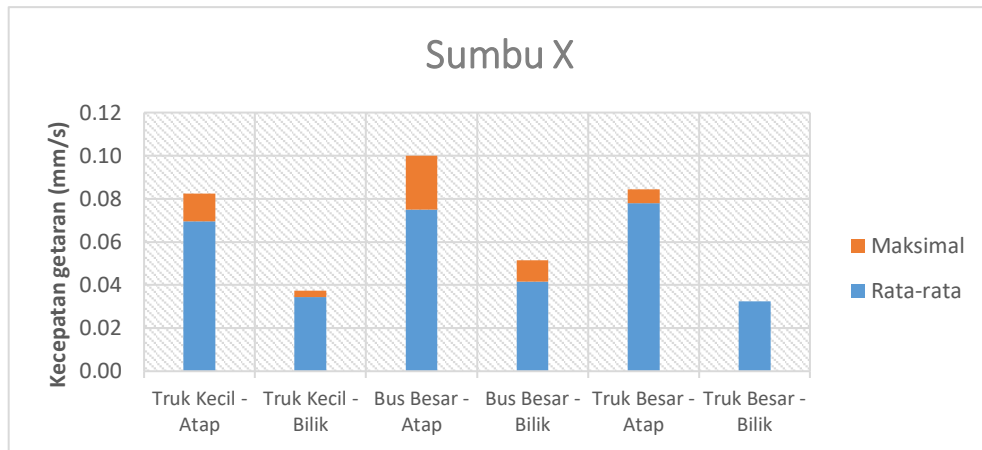


(b)

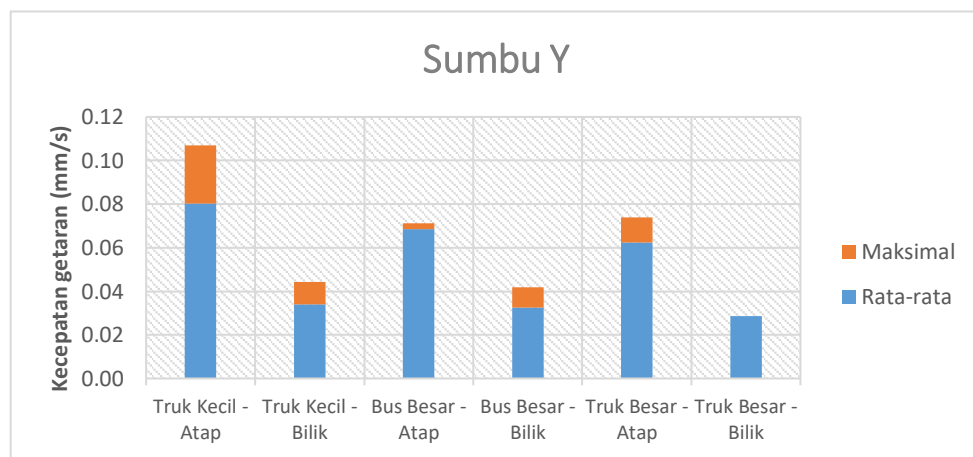


(c)

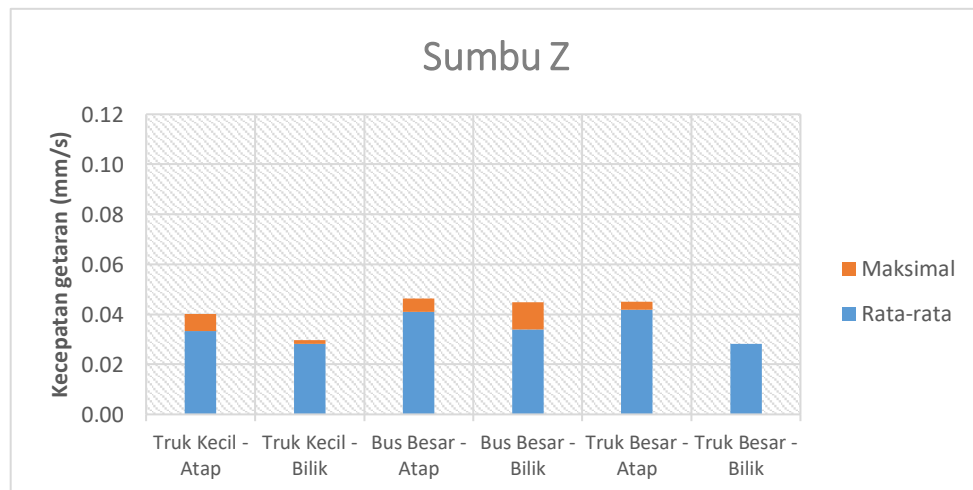
**Gambar 7.** Perbandingan percepatan respon getaran yang muncul pada Candi Mendut pada arah (a) tegak lurus - sumbu X, (b) sejajar - sumbu Y, dan (c) vertikal - sumbu Z



(a)



(b)



(c)

**Gambar 8.** Perbandingan kecepatan respon getaran yang muncul pada Candi Mendut pada arah (a) tegak lurus - sumbu X, (b) sejajar - sumbu Y, dan (c) vertikal - sumbu Z

## KESIMPULAN

- Pengukuran respon bangunan terhadap getaran lalu lintas di atap Candi Mendut mencapai 0,107 mm/s, belum melebihi batas ambang getaran mekanik di atap bangunan sebesar 8,5 mm/s. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat ini lalu lintas belum berbahaya terhadap kelestarian struktur candi tersebut. Namun dengan adanya peningkatan lalu lintas yang cukup signifikan pada 2 tahun terakhir di Candi Mendut maka tindakan preventif perlu dilakukan.
- Perlunya dilakukan monitoring respon getaran rutin untuk dapat mengetahui apakah pada saat itu timbul getaran yang nilainya melebihi batas ambang yang ditetapkan. Permintaan data lalu lintas kepada Dinas Perhubungan perlu dilakukan secara berkala untuk dapat mengetahui peningkatan jumlah sumber getaran dalam hal ini kendaraan. Dalam hal belum tersedianya data dari instansi terkait maka dapat dilakukan pengamatan secara mandiri dengan menggunakan metode pengamatan manual.
- Dari hasil percobaan, beberapa faktor yang mempengaruhi respon suatu bangunan terhadap getaran adalah :
  - Kecepatan kendaraan, semakin cepat kendaraan yang melintas, maka semakin besar getaran yang muncul
  - Berat kendaraan, semakin berat kendaraan yang melintas, maka semakin besar getaran yang muncul
  - Arah getaran, sebagian besar getaran yang muncul pada berbagai titik pengamatan di beberapa candi menunjukkan bahwa getaran dengan arah horizontal lebih besar amplitudonya daripada getaran arah vertikal.

Meskipun demikian, masih banyak faktor-faktor lain yang berpengaruh yang belum dapat teramati pada kajian ini.

## SARAN

- Dengan semakin padatnya lalu lintas saat ini, maka perlu dilakukan monitoring lalu lintas harian dan respon getaran pada bangunan dan struktur cagar budaya yang terletak di dekat jalan raya. Meskipun saat ini data getaran yang terukur masih jauh dari batas ambang namun bila suatu saat jumlah kendaraan semakin banyak dan getaran yang ditimbulkan semakin besar maka dapat dilakukan tindakan pencegahan dan penanganan. Metode monitoring lalu lintas harian dapat dilakukan dengan menghitung jumlah kendaraan selama 24 jam pada saat kondisi normal dan peak season. Metode monitoring respon getaran dapat dilakukan seperti metode kajian ini dan dilakukan pada atap dan bilik candi.
- Perlu dilakukan pengamatan dan pengukuran respon bangunan pada kondisi tanah yang berbeda sehingga dapat diketahui pengaruh tanah terhadap respon getaran bangunan.
- Tindakan penanganan yang dapat dilakukan bergantung pada besar tidaknya getaran yang timbul dan jumlah kendaraan yang melintas. Berikut ini adalah tindakan penanganan yang dapat dilakukan.
  - Pembatasan kecepatan.  
Dapat dilakukan dengan memberikan rambu batas kecepatan beberapa ratus meter sebelum lokasi situs cagar budaya.
  - Pembatasan berat kendaraan.  
Dapat dilakukan dengan mengalihkan jalur untuk kendaraan berat seperti truk besar, truk gandeng dan truk *semi trailer*.



- Perawatan kondisi jalan secara berkala.  
Adanya lubang pada jalan akan mengakibatkan getaran kejut pada bangunan cagar budaya. Oleh karena itu sebisa mungkin bila sudah muncul tanda-tanda jalan mulai berlubang agar segera ditangani.
- Pembuatan parit di dekat jalan raya.  
Hal ini merupakan pilihan terakhir yang dilakukan bila langkah-langkah sebelumnya sudah tidak mungkin dilakukan. Dapat dibuat parit dengan tipe dinding tunggal dan parit terbuka. Dinding parit terbuat dari beton, dan parit dapat diisi air atau dibiarkan terbuka tergantung pada besarnya getaran yang timbul (Orehov, Moghanlou, Negahdar, & Varagh, 2012)

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada narasumber kajian Ir. Suprpto Siswosukarto, Ph.D selaku dosen Departemen Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, yang telah membimbing tim kajian dari tahap penyusunan proposal hingga selesainya kajian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Bachmann, H., & Ammann, W. (1987). *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Bata, M. (1971). Effects on buildings of vibrations caused by traffic. *Building Science*, 6(4), 221–246. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(71\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0007-3628(71)90014-4)
- Direktur Jendral Perhubungan. *Surat Edaran Direktur Jenderal Perhubungan Darat Nomor 02 Tahun 2008*. , (2008).
- Ekarini, F. D. (2018). *Kajian Stabilitas Struktur Candi Mendut*. Balai Konservasi Borobudur.
- Graham, K. S. (2000). *Fundamentals of Mechanical Vibration 2nd Editon* (Second). Singapore: McGraw-Hill Inc.
- Kementerian Lingkungan Hidup. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: Kep - 49/MENLH/11/1996 tentang Baku Tingkat Getaran*. , (1996).
- Orehov, V. V, Moghanlou, R. N., Negahdar, H., & Varagh, A. M. (2012). Investigation Effects of Trench Barrier on the Reducing Energy of Surface Waves in Soils. *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon Portugal*.
- Rainer, J. H. (1982). Effect of Vibrations on Historic Buildings: An Overview. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 14(1), 2. <https://doi.org/10.2307/1494019>