Kajian Pengaruh Intensitas Suara Terhadap Bangunan Cagar Budaya Berbahan Batu Tahap I

Linus Setyo Adhidhuto, Ronny Muhammad, Jati Kurniawan, Puji Santoso, Ajar Priyanto

Balai Konservasi Borobudur

Email : Linus.setyo.a@gmail.com

Abstrak : Kegiatan konser musik atau acara lainnya yang menggunakan sound system besar sering dilaksanakan di Candi Borobudur, Candi Prambanan serta candi-candi lainnya. Hal ini menimbulkan kekhawatiran di kalangan pelestari cagar budaya akan dampak buruk suara keras yang dihasilkan oleh speaker terhadap cagar budaya. Untuk mengetahui dampak tersebut perlu dilakukan pengukuran getaran yang timbul pada candi pada saat berlangsung konser atau acara-acara lainnya yang menggunakan sound system besar. Salah satu faktor yang menentukan besarnya getaran yang timbul akibat sumber getaran secara umum adalah redaman dan frekuensi natural. Bila sumber getaran semakin mendekati frekuensi natural candi maka resonansi getaran akan semakin besar. Untuk dapat membuktikan hal tersebut maka dilakukan percobaan getaran dalam skala laboratorium dengan sumber getaran, dalam hal ini berupa suara, dengan variasi frekuensi yang mendekati dan sama dengan frekuensi natural sampel. Setelah dilakukan pengambilan data di lapangan ternyata getaran yang timbul sangat kecil. Pengukuran data getaran pada saat konser berlangsung sepanjang tahun 2017 menunjukkan getaran yang timbul mencapai kecepatan maksimal 0,085 mm/s, sekitar 4,25 % dari batas ambang yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup yaitu sebesar 2mm/s. Getaran yang kecil ini tidak dapat dijadikan acuan dalam menetapkan batas ambang kebisingan atau tingkat intensitas suara pada cagar budaya sehingga hasil dari kajian ini hanya bisa menetapkan batas ambang berdasarkan frekuensi yang diperbolehkan

Kata Kunci : Intensitas suara, getaran, bangunan cagar budaya

Abstract : Music concerts or other events that use large sound systems are often held at Borobudur Temple, Prambanan Temple and other temples. This raises concerns among cultural heritage preserver about the adverse effects of loud sounds produced by speakers on cultural heritage. To find out the sound impact, it is necessary to measure vibrations that occur in the temple during a concert or other events that use large speakers. One factor that influence the amount of vibration occur is the damping and natural frequency of the stones. When the frequency of the source gets closer to the natural frequency of the temple, the vibration resonance will be greater. To be able to prove this, vibration experiments are carried out in a laboratory with the frequency of vibration source near to the natural frequency of the sample. After collecting the vibration data can be concluded that the vibrations occur on the temple because of sound are very small. The largest vibration occur during the music concert and other events in 2017 is 0,085 mm/s, only about 4,25% from the threshold issued by the Ministry of Environment which is 2mm/s . This small vibration cannot be used as a reference to determine the noise / sound intensity threshold on the cultural heritage so the result of this study only the sound frequency allowed on cultural heritage.

Keyword : Sound intensity, vibration, cultural, heritage building

Pendahuluan

Ancaman terhadap bangunan cagar budaya semakin hari semakin banyak dan bervariasi. Candi Borobudur dan Candi Prambanan contohnya, dengan semakin populernya kedua candi tersebut maka semakin banyak ancaman yang beresiko merusak material dan struktur candi. Meningkatnya jumlah pengunjung tidak

diikuti dengan daya dukung candi yang justru semakin lama semakin melemah. Pada masa lebaran tahun 2016 misalnya, pengunjung candi Borobudur mencapai 53.792 orang dalam satu hari (PT. Taman Wisata Candi Borobudur, 2016). Padahal carrying capacity Candi Borobudur hanya 128 orang dalam sekali waktu (Wahyuningsih, 2009).

Salah satu dampak lain dari semakin populernya kedua candi tersebut adalah semakin seringnya diadakan konser musik yang menggunakan sound system dengan daya yang besar di area sekitar candi. Festival Borobudur Jazz, perayaan Waisak di Candi Borobudur, Prambanan Jazz serta Sendratari Ramayana di Prambanan adalah beberapa contoh kegiatan yang rutin tiap tahun diselenggarakan. Suara dengan energi yang besar yang dikeluarkan oleh speaker bila mengenai candi akan menimbulkan getaran pada candi, bahkan pada beberapa kasus sampai menggetarkan kaca-kaca di rumah penduduk yang lebih jauh jaraknya.

Penggunaan area sekitar candi untuk kegiatan-kegiatan tersebut tentu saja tidak bisa dilarang begitu saja sehingga harus diatur penggunaan sound system di area tersebut agar tidak memberikan dampak negatif pada bangunan candi. Besarnya taraf intensitas suara (L) dirumuskan dalam persamaan berikut (Resnics, 2007)

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

dimana I adalah intensitas suara yang terukur dan I_0 adalah intensitas suara referensi. I bergantung pada besarnya daya suara dan jarak dari sumber suara ke penerima suara (Resnics, 2007). Dari pernyataan ini untuk bisa membatasi intensitas suara yang sampai ke Candi maka perlu diatur jarak sumber suara dan besarnya daya speaker.

Kajian ini dilaksanakan dalam 2 tahap dimana pada tahap pertama (2017) difokuskan pada pengukuran getaran yang timbul pada cagar budaya batu akibat terpapar suara dengan intensitas suara keras, pengukuran intensitas suara pada saat berlangsung event bersuara keras, pengukuran intensitas suara pada saat keadaan normal dengan sumber pengunjung dan kendaraan, pengukuran frekuensi natural batu beberapa candi batu, serta simulasi getaran akibat suara pada miniatur candi Pawon di kantor Balai Konservasi Borobudur. Simulasi getaran pada miniatur candi dilakukan dengan tujuan membuktikan bahwa suara dengan frekuensi mendekati frekuensi natural miniatur candi menimbulkan fenomena resonansi getaran pada titik tersebut, serta mencoba membuat getaran sebesar mungkin yang bersumber dari suara. Pada tahap kedua yang dilaksanakan tahun 2018 difokuskan pada penentuan jarak speaker, durasi serta frekuensi suara di lingkungan cagar budaya khususnya

Candi Borobudur dengan memperhitungkan faktor kenyamanan pengunjung.

Metodologi

Peralatan yang digunakan dalam kajian ini adalah Vibration Analyzer Rion Va-12 dan Strong Motion Accelerograph Kinematics ETNA sebagai alat pengukur getaran, Sound Level Meter Extech HD600 sebagai alat pengukur tingkat intensitas suara, dan palu karet sebagai sumber getaran mekanik untuk mengukur frekuensi natural.

Spesifikasi Vibration Analyzer Rion VA-12 :

Number of measurement channel : 1

Sensor : Piezoelectric Accelerometer PV-57I

Measurement range : 0,02 – 141,4 m/s²

Measurement frequency range 1Hz – 20kHz

Spesifikasi Strong Motion Accelerograph Kinematics ETNA :

Number of measurement channel : 3

Sensor : Triaxial EpiSensor Force Balance Accelerometer

Full scale range : 0,25 g, 0,5 g, 1 g, 2g, 4g

Measurement frequency range : DC – 80 Hz

Sampling rate : 100, 200, 250 sample per second

Spesifikasi Sound Level Meter Extech HD600:

Range : 30 – 130 dB

Basic accuracy : $\pm 1,4$ dB

Weighting : A dan C

Datalogging : 20000 points

Response time : Fast (125 ms) & slow (1s)

Secara garis besar data utama yang diambil dalam kajian ini meliputi data intensitas suara pada keadaan normal, data intensitas suara dan getaran yang timbul akibat terkena suara pada saat konser, data frekuensi natural batu candi, serta data getaran pada saat simulasi suara pada miniatur candi Pawon.

1. Data intensitas suara pada keadaan normal dengan sumber dari pengunjung dan kendaraan. Dilakukan pengambilan data intensitas suara / kebisingan dalam rentang waktu 24 jam pada cagar budaya sesuai dengan petunjuk yang diberikan Kementerian Lingkungan Hidup nomor KEP-48/MENLH/11/1996 i. Data intensitas suara 24 jam (berdasarkan petunjuk dari KEP-48/MENLH/11/1996) Waktu pengukuran dilakukan

selama aktivitas 24 jam (LSM) dengan cara pada siang hari tingkat aktivitas yang paling tinggi selama 16 jam (LS) pada selang waktu 06.00 – 22.00 dan aktivitas malam hari selama 8 jam (LM) pada selang 22.00 – 06.00.

Setiap pengukuran harus dapat mewakili selang waktu tertentu dengan menetapkan paling sedikit 4 waktu pengukuran pada siang hari dan pada malam hari paling sedikit 3 waktu pengukuran

Metode pengambilan data :

- a) Sound level meter diatur pada mode Slow, 30 – 130 dB, sampling rate 5 detik
- b) Sound level meter I diletakkan pada titik pengambilan data pertama dan sound level meter II diletakkan pada titik kedua
- c) Direkam data intensitas suara selama 10 menit
- d) Setelah selesai sound level meter dipindah ke titik 3 dan 4 dan diulangi langkah diatas hingga semua titik diambil datanya
- e) Pengambilan data dilakukan pada masing-masing titik pada pukul 07:00, 10:00, 15:00, 20:00, 23:00, 01:00 dan 04:00

2. Pengukuran getaran akibat suara pada bangunan candi

Pada pengukuran ini, digunakan dua buah sound level meter dimana satu buah sound level meter diletakkan tepat di depan sumber suara untuk mengetahui intensitas suara sumber, dan satu lagi diletakkan pada candi untuk mengetahui intensitas suara yang sampai pada candi. Penggunaan 2 sound level meter di depan sumber suara dan di candi bertujuan untuk membandingkan suara yang sampai ke candi dengan suara yang dihasilkan oleh sumber suara. Suara yang sampai pada candi pasti lebih rendah intensitasnya dibandingkan dengan di depan sumber suara karena pengaruh jarak dan kondisi medium. Perbandingan intensitas di dua tempat ini bertujuan untuk menentukan jarak dan intensitas suara yang aman bagi kelestarian candi.

Perekaman data dengan menggunakan accelerograph dilakukan dengan menghubungkan alat dengan laptop. Alat ini sebenarnya bekerja secara otomatis dimana bila ada suatu getaran yang nilainya melebihi suatu batas yang telah ditentukan maka accelerograph akan langsung merekamnya. Namun pada kasus ini perekaman data akan dinyalakan secara manual dengan menggunakan laptop. Alat ini akan dipasang pada sisi

candi yang berhadapan langsung dengan sumber suara.

Vibration analyzer memiliki sensor piezoelectric accelerometer yang ditempelkan pada dinding candi untuk merekam data getaran yang timbul. Penempelan sensor ini harus dilakukan dengan hati-hati karena terkena sedikit guncangan saja maka data yang diperoleh tidak valid. Namun karena pembelian alat ini dilakukan pada semester kedua tahun 2017 maka pengukuran getaran pada saat event hanya menggunakan accelerograph.

3. Pengukuran frekuensi natural

Pengukuran ini dilakukan dengan tujuan memperoleh frekuensi natural dari suatu sistem bangunan. Pengukuran ini dilakukan pada beberapa titik dinding penahan beban pada bangunan / struktur candi. Sumber getaran pada kegiatan pengukuran ini adalah pukulan palu karet yang dipukulkan pada jarak sekitar 5 cm dari titik penempatan sensor. Dilakukan pengukuran sebanyak 3 kali pada masing-masing titik dan kemudian dapat diketahui frekuensi natural titik tersebut dengan merata-rata frekuensi puncak getaran yang timbul. Kumpulan data ini kemudian diplotkan pada peta candi dengan menggunakan Program Surfer. Pengukuran ini bersifat sampling, bertujuan untuk mengetahui rentang frekuensi natural dari bangunan candi.

4. Simulasi suara pada miniatur candi

Kegiatan eksperimen ini dilakukan dengan memberikan suara dengan intensitas hingga 120 dB pada miniatur candi dengan tujuan agar timbul getaran pada batu. Suara dihasilkan oleh sepasang speaker yang diletakkan dengan jarak sekitar 1 m dari permukaan batu sehingga diharapkan getaran yang timbul bisa cukup besar.

Pada eksperimen ini digunakan sumber suara sebagai berikut

- 2 lagu dengan genre metal
- Suara drum 220 bpm dan 100 bpm
- Suara gitar elektrik
- Suara bass elektrik
- Suara 100 Hz
- Suara dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi natural titik pengambilan data (265Hz dan 920Hz)

Pembahasan

A. Pengukuran intensitas suara dengan sumber dari pengunjung dan kendaraan

Pada pengukuran ini

1) Candi Borobudur

Pengukuran data pada candi Borobudur dilakukan pada 6 titik yang dianggap mewakili keadaan Candi Borobudur yaitu halaman selatan, halaman timur, lorong timur, lorong selatan, stupa induk dan selatan. Halaman selatan dan lorong selatan mewakili titik yang relatif sepi pengunjung, sedangkan pada halaman timur dan lorong timur mewakili titik Candi Borobudur yang ramai pengunjung.

Gambar 1.1 Lokasi pengambilan data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Borobudur

Tingkat kebisingan pada halaman timur yang merupakan jalan masuk ke area candi terukur 58,96 dB, sedikit lebih besar daripada halaman selatan yang relatif lebih sepi yaitu 56,41 dB. Dari kedua hasil ini ternyata masih lebih kecil daripada batas ambang yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup yaitu 60 dB.

Pada lorong 1 sisi timur tercatat data yang cukup besar dan melebihi batas ambang keisingan yaitu 61,24 dB. Tingkat kebisingan di lorong 1 ini lebih besar daripada di halaman karena banyaknya dinding di sekitarnya sehingga suara banyak yang terpantul yang berakibat pada meningkatnya intensitas suara, berbeda dengan halaman candi yang lebih terbuka sehingga suara akan langsung menyebar ke segala arah. Pada lorong 1 selatan juga terukur kebisingan yang lebih tinggi daripada kebisingan di halaman selatan yaitu sekitar 57,02 dB.

Hasil pengukuran pada teras selatan Candi Borobudur menunjukkan data kebisingan yang semakin mendekati batas ambang kebisingan yaitu tercatat sebesar 59,68 dB. Sedangkan pada stupa induk sisi timur telah diperoleh data yang melebihi batas ambang yaitu terukur sebesar 61,14 dB, sedikit lebih kecil dari data kebisingan yang terukur di lorong 1 sisi timur.

Dalam aturan batu tingkat kebisingan juga ditetapkan toleransi sebesar +3dB yang berarti bila data yang terukur belum melebihi 63dB maka data tersebut belum melebihi ambang. Pada pengukuran yang telah dilakukan pada Candi Borobudur nilai maksimal yang terukur yaitu 61,24 dB. Dari hasil ini ternyata tingkat kebisingan Candi Borobudur pada keadaan normal belum melebihi baku tingkat kebisingan yang diperbolehkan.

Tabel 1.1 Data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Borobudur

No	Kode	Periode	Waktu pengambilan	Lama pengambilan (jam)	Intensitas Suara (dB)					
					Halaman Timur	Halaman Selatan	Lorong 1 Timur	Lorong 1 Selatan	Stupa Teras Selatan	Stupa Induk Timur
1	L1	06.00 - 09.00	7:00	3	62.86	56.56	65.28	59.52	58.18	62.88
2	L2	09.00 - 14.00	10:00	5	61.61	60.72	64.15	61.12	64.96	64.50
3	L3	14.00 - 17.00	15:00	3	60.74	53.70	64.05	56.81	60.10	65.24
4	L4	17.00 - 22.00	20:00	5	55.43	55.19	49.83	50.91	52.06	51.13
5	L5	22.00 - 00.00	23:00	2	49.54	50.75	50.47	51.54	50.76	49.32
6	L6	00.00 - 03.00	1:00	3	49.54	50.86	48.97	50.17	49.57	48.30
7	L7	03.00 - 06.00	4:00	3	44.60	49.83	49.19	49.45	49.58	48.89
L Siang					60.59	57.79	62.90	58.45	61.29	62.81
L Malam					48.27	50.47	49.47	50.32	49.90	48.79
L total					58.96	56.41	61.24	57.02	59.68	61.14

2) Candi Mendut

Pengukuran tingkat kebisingan 24 jam pada Candi Mendut dilakukan pada 2 titik yaitu di halaman dekat tangga candi dan di dalam bilik. Kedua titik ini dipilih untuk mewakili kondisi di dalam bilik candi dan di luar candi. Hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 10 November 2017 ini dapat dilihat pada tabel 1.2.

Gambar 1.2 Lokasi pengambilan data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Mandut

Tabel 1.2 Data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Mendut

No	Kode	Periode	Waktu pengambilan	Lama pengambilan	Intensitas Suara Terukur (dB)	
					Bilik Candi	Halaman Candi
1	L1	06.00 - 09.00	7:00	3	54.24	68.35
2	L2	09.00 - 14.00	10:00	5	55.54	67.82
3	L3	14.00 - 17.00	15:00	3	62.54	71.83
4	L4	17.00 - 22.00	20:00	5	52.96	64.20
5	L5	22.00 - 00.00	23:00	2	43.19	62.00
6	L6	00.00 - 03.00	1:00	3	43.19	51.54
7	L7	03.00 - 06.00	4:00	3	44.60	54.22
L Siang					57.48	68.36
L Malam					43.77	57.40
L total					55.81	66.77

Candi Mendut terletak sangat dekat dengan jalan raya yang sering dilalui kendaraan besar seperti bus yang menuju atau pulang dari Candi Borobudur, ataupun truk bermuatan besar. Keadaan ini membuat Candi Mendut banyak menerima kebisingan dari suara kendaraan tersebut. Data yang telah diambil menunjukkan bahwa pada halaman terukur kebisingan rata-rata selama 24 jam sebesar 66,77dB yang cukup banyak melebihi baku ambang kebisingan 60dB. Adanya tanaman bambu di sepanjang pagar halaman Candi Mendut ternyata belum cukup untuk mengurangi kebisingan di Candi Mendut. Pada siang/sore hari (14:00 – 17:00) bahkan terukur kebisingan yang cukup tinggi yaitu 71,83dB dimana pada

jam ini banyak kendaraan yang lalu lalang.

Pengukuran pada bilik Candi Mendut menunjukkan hasil yang cukup rendah yaitu 55,81 dB. Hal ini disebabkan kondisi bilik yang menghadap berlawanan arah dengan jalan raya sehingga kebisingan dari jalan raya tidak langsung masuk ke dalam bilik. Selain itu pengunjung yang masuk ke dalam bilik juga relatif lebih tenang karena bilik ini masih sering digunakan untuk kegiatan doa Umat Buddha.

3) Candi Pawon

Seperti halnya Candi Mendut, pengukuran di Candi Pawon dilakukan pada 2 titik yaitu di halaman candi tepatnya sebelah utara tangga dan juga di dalam bilik candi. Kedua titik ini dianggap mewakili kondisi di dalam bilik candi dan di luar candi.

DENAH CANDI PAWON

Keterangan :
● : titik pengambilan data

Gambar 1.3 Lokasi pengambilan data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Mandut

Tabel 1.3 Data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Pawon

No	Kode	Periode	Waktu pengambilan	Lama pengambilan (jam)	Intensitas Suara (dB)	
					Bilik Candi	Halaman Candi
1	L1	06.00 - 09.00	7:00	3	53.87	60.01
2	L2	09.00 - 14.00	10:00	5	53.40	59.48
3	L3	14.00 - 17.00	15:00	3	58.10	64.13
4	L4	17.00 - 22.00	20:00	5	52.12	59.04
5	L5	22.00 - 00.00	23:00	2	47.41	52.59
6	L6	00.00 - 03.00	1:00	3	45.60	50.78
7	L7	03.00 - 06.00	4:00	3	45.80	51.50
L Siang					54.58	60.80
L Malam					48.19	51.56
L total					53.11	59.29

Posisi Candi Pawon sebenarnya juga terletak cukup dekat dengan jalan raya, namun karena posisinya yang terhalang banyak rumah dan pohon serta jaraknya yang lebih jauh menyebabkan kebisingan di Candi Pawon cenderung lebih kecil dibandingkan dengan Candi Mendut. Pengukuran di halaman candi menunjukkan kebisingan yang dibawah baku tingkat kebisingan yaitu sekitar 59,29dB. Nilai kebisingan ini lebih banyak diakibatkan aktifitas sehari-hari manusia di sekitar Candi Pawon.

Sedangkan pada bilik candi juga menunjukkan nilai yang lebih kecil yaitu sekitar 53,11 dB. Nilai ini lebih kecil daripada kebisingan di bilik Candi Mendut karena pada saat pengukuran Candi Pawon sedang dalam proses perbaikan atap sehingga pengunjung tidak diperbolehkan masuk ke dalam bilik candi. Semakin sedikit pengunjung yang masuk maka kebisingan di dalam bilik semakin kecil.

4) Candi Prambanan

Pengukuran data kebisingan 24 jam di Candi Prambanan dilakukan pada 4 titik yaitu di dalam bilik Candi

Siwa, jalur masuk kompleks utama Candi Prambanan, sisi utara dan sisi selatan. Pengukuran dilakukan pada tanggal 18 Oktober 2017.

Gambar 1.4 Lokasi pengambilan data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Prambanan

No	Kode	Periode	Waktu pengambilan	Lama pengambilan (jam)	Intensitas Suara (dB)			
					Bilik Candi Siwa	Jalur Masuk	Sisi Selatan	Sisi Utara
1	L1	06.00 - 09.00	7:00	3	69.8	67.0	70.9	69.0
2	L2	09.00 - 14.00	10:00	5	65.8	65.8	72.4	65.7
3	L3	14.00 - 17.00	15:00	3	69.2	68.0	73.4	68.7
4	L4	17.00 - 22.00	20:00	5	54.6	62.3	63.5	60.3
5	L5	22.00 - 00.00	23:00	2	61.3	55.9	58.5	59.4
6	L6	00.00 - 03.00	1:00	3	54.2	57.1	60.2	56.8
7	L7	03.00 - 06.00	4:00	3	55.7	59.5	58.2	55.3
L Siang					66.7	65.8	71.0	66.4
L Malam					57.6	58.0	59.1	57.2
L total					65.2	64.4	69.4	64.9

Tabel 1.4 Data intensitas suara dalam rentang waktu 24 jam pada Candi Prambanan

Keempat data kebisingan yang diambil di Candi Prambanan menunjukkan bahwa kebisingan di Candi Prambanan sudah melebihi baku ambang kebisingan yang ditetapkan Menteri Lingkungan Hidup di lingkungan cagar budaya. Intensitas tertinggi tercatat di sisi selatan yang paling dekat dengan jalan raya dimana diperoleh hasil sebesar 69,4 dB. Sedangkan pada jalur masuk kompleks utama candi dan sisi utara menunjukkan nilai yang hampir sama yaitu masing-masing 64,4 dB dan 64,9 dB. Tidak seperti data kebisingan yang teramati di Candi Mendut dan Candi Pawon, pada bilik candi Siwa Prambanan terukur kebisingan yang tidak kalah besar dibandingkan dengan halaman candi Prambanan yaitu 65,2 dB. Hal ini disebabkan bilik candi Siwa merupakan tempat yang cukup populer sehingga banyak pengunjung Candi Prambanan masuk ke dalam bilik Candi Siwa ini. Besarnya tingkat kebisingan ini tentu saja tidak hanya disebabkan oleh suara penunjang namun juga suara dari kendaraan di jalan Solo – Yogyakarta yang hanya berjarak sekitar 300 - 400m. Dari data pengambilan malam terlihat bahwa intensitas suara di halaman candi lebih besar daripada di dalam bilik yang menunjukkan suara dari kendaraan bermotor tetap mendominasi kebisingan di Candi Prambanan. Sisi selatan dan jalur masuk kompleks utama Candi Prambanan memiliki tingkat kebisingan yang lebih tinggi pada malam hari dari pada sisi utara yang posisinya lebih jauh dari jalan raya.

B. Pengukuran intensitas suara dan getaran pada saat berlangsung konser / event

Pengukuran intensitas suara dan getaran pada saat berlangsung konser / event dilakukan di Candi Borobudur, Candi Mendut, dan Candi Prambanan. Pada Candi Mendut dilakukan pengukuran pada saat acara Waisak dan Tipitaka, pada Candi Borobudur saat acara Waisak, Tipitaka, Borobudur Marathon dan Borobudur Internasional Festival, sedangkan pada candi Prambanan dilakukan pada saat Prambanan Jazz 2017.

1) Candi Borobudur

Data hasil pengukuran kebisingan dan getaran pada beberapa kegiatan pemanfaatan di Candi Borobudur ditampilkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 1.5 Data kebisingan dan getaran maksimal pada beberapa kegiatan di Candi Borobudur

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Dari beberapa kali pengambilan data yang dilakukan di Candi Borobudur, getaran terbesar diperoleh pada saat berlangsung acara Waisak tanggal 11 Mei 2017 yaitu mencapai 0,085 mm/s, sedangkan intensitas suara terbesar diperoleh pada saat event Borobudur Marathon yaitu sebesar 96,6 dB. Suara terkeras yang diproduksi oleh speaker yang terukur mencapai 121,4 dB yaitu pada saat Borobudur Marathon. Namun karena lokasi panggung yang jauh dari Candi Borobudur sehingga getaran yang timbul tidak sebesar pada saat Waisak.

Getaran terbesar yang timbul di Candi Borobudur pada saat berlangsung kegiatan bersuara keras dapat dilihat pada grafik di bawah ini. Getaran tersebut muncul pada saat berlangsung konser Dewa Budjana. Besar getaran ini masih tergolong kecil (0,085 mm/s) jika dibandingkan dengan batas ambang getaran kejut yang diatur Kementerian Lingkungan Hidup yaitu sebesar 2mm/s sehingga dapat disimpulkan getaran yang timbul di Candi Borobudur pada saat berlangsung kegiatan konser / perayaan doa tidak membahayakan struktur candi.

Gambar 1.5 Grafik kecepatan getaran pada acara Waisak di Candi Borobudur

2) Candi Mendut

Pengambilan data pada saat acara Waisak

dilakukan pada langkan sisi selatan Candi Mendut tepatnya pada pojok barat daya dan tenggara yang berdekatan dengan posisi speaker. Pengukuran di depan speaker menunjukkan bahwa intensitas maksimal mencapai 106,6 dB, sedangkan yang sampai pada Candi Mendut mencapai 83,1dB. Jarak antara speaker dan candi hanya sekitar 10 m, namun speaker menghadap berlawanan arah dengan candi sehingga intensitas yang sampai ke candi berkurang cukup banyak.

Tabel 1.6 Data kebisingan dan getaran pada saat acara Waisak dan Tipitaka di Candi Mendut

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Getaran terbesar yang terukur pada saat acara Waisak mencapai 0,047 mm/s yang diperoleh pada langkan selatan pojok tenggara jam 13:15. Pada saat terukur getaran dengan kecepatan ini, intensitas suara yang terdeteksi hanya sekitar 78,5dB. Getaran ini masih jauh di bawah ambang getaran yang diperbolehkan yaitu 2mm/s. Nilai ini merupakan getaran terbesar yang terukur pada Candi Mendut.

Gambar 1.6 Grafik kecepatan getaran terhadap waktu pada saat acara Waisak di Candi Mendut

Sedangkan pada acara Tipitaka tidak dilakukan pengukuran getaran maupun kebisingan di tubuh candi karena Candi Mendut harus dalam keadaan kosong pada saat acara. Pengukuran kebisingan dilakukan pada halaman sebelah barat. Hasil pengukuran menunjukkan

bahwa kebisingan maksimal mencapai 95,2 dB.

3) Candi Prambanan

Prambanan Jazz berlangsung selama 3 hari pada tanggal 18 – 20 Agustus 2017. Pengukuran kebisingan dan getaran dilakukan pada hari pertama dan ketiga di 4 candi yaitu Candi Perwara Timur Laut (Candi Perwara deret I no. 43), Perwara Timur (Candi Perwara deret I no. 39), Candi Garuda dan Candi Siwa. Data kebisingan dan getaran dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 1.7 Data kebisingan dan getaran pada acara Prambanan Jazz

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Candi Perwara deret I no 39 dan no 43 memiliki jarak yang sama dari panggung yaitu sejauh 70 m. Namun karena terdapat pohon yang menghalangi sehingga intensitas suara terbesar diperoleh di Candi Perwara deret 1 no 43 sebesar 102,4 dB. Getaran terbesar juga diperoleh pada candi ini dengan nilai kecepatan getaran maksimal mencapai 0,060 mm/s. Pengukuran getaran ini dilakukan pada lantai candi sisi tenggara. Getaran ini masih jauh di bawah ambang getaran kejutan sehingga acara Prambanan Jazz belum membahayakan struktur Candi Prambanan.

Gambar 1.7 Grafik kecepatan getaran yang timbul pada lantai Candi Perwara deret 1 no 43 pada acara Prambanan Jazz

C. Pengukuran frekuensi natural batu candi

1) Candi Borobudur

Gambar 1.8 Distribusi frekuensi natural pada Candi Borobudur

Rentang frekuensi natural yang terukur pada Candi Borobudur berada pada kisaran 70 – 1973 Hz. Data rekapitulasi rentang frekuensi natural bisa dilihat pada gambar di atas. Dari grafik tersebut terlihat bahwa rentang frekuensi natural Candi Borobudur yang paling dominan berada pada kisaran 0 – 300 Hz dimana terdapat 47 titik atau sekitar 46% dari keseluruhan titik pengambilan data. Pada rentang frekuensi lainnya hanya terukur sebanyak masing-masing kurang dari 16 titik. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa Candi Borobudur memiliki frekuensi natural dari 70 – 1973 Hz, dimana frekuensi natural terbanyak muncul pada rentang frekuensi dibawah 300 Hz.

2) Candi Mendut

Gambar 1.9 Distribusi frekuensi natural pada Candi Mendut

Pada bagian kaki dan tubuh candi sebelah barat daya didominasi oleh frekuensi natural dengan rentang 260 Hz – 420Hz, sedangkan sisi lainnya cenderung merata. Frekuensi natural yang dominan pada Candi Mendut berada pada rentang 300 – 600 Hz dimana terdapat 19 dari 30 titik data atau sekitar 63,3% yang berada pada rentang tersebut. Frekuensi natural terendah Candi Mendut yang terukur yaitu 178,12 Hz yang berada pada dinding tubuh candi sisi utara dan yang tertinggi yaitu 760,41 Hz pada dinding tubuh candi sisi selatan.

3) Candi Prambanan

- Candi Siwa

Gambar 1.10 Distribusi frekuensi natural Candi Siwa

Data yang diperoleh pada Candi Siwa menunjukkan bahwa kaki candi sisi barat laut dan utara memiliki frekuensi yang cenderung lebih rendah dibandingkan dengan sisi lainnya. Frekuensi natural rendah juga ditemukan pada keempat bilik selain bilik utama dan tangga sebelah barat. Pada bagian-bagian ini terukur frekuensi natural dengan rentang 237 Hz hingga 400 Hz. Sedangkan pada bagian lain terukur frekuensi natural yang lebih tinggi.

- Candi Garuda

Gambar 1.11 Distribusi frekuensi natural Candi Garuda

Dari data tersebut terlihat bahwa frekuensi natural Candi Garuda cenderung seragam pada rentang frekuensi 601 Hz – 1500 Hz. Hanya pada 1 titik saja yang memiliki frekuensi dibawah 300 Hz dan 1 titik yang memiliki frekuensi diatas 1501 Hz.

- Candi Wisnu

Gambar 1.12 Distribusi frekuensi natural pada Candi Wisnu

Dari data yang diperoleh, Candi Wisnu didominasi oleh frekuensi natural pada rentang dibawah 300 Hz dimana terdapat 15 data (48,4%) dan data ini banyak ditemukan pada kaki candi. Sedangkan pada bagian tubuh serta bilik candi didominasi frekuensi natural dengan rentang 700 – 1300 Hz. Pada bilik candi, frekuensi natural terukur pada 1356,25 Hz dan 1156,25 Hz. Pada tubuh candi sisi barat laut terdapat data yang keluar dari pola data lainnya yaitu terukur sebesar 2690,620 Hz. Data ini tidak dapat diabaikan karena bila ada sumber getaran yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi ini, maka ada kemungkinan bagian ini akan mengalami kerusakan meskipun bagian lain dari candi tidak terpengaruh.

D. Simulasi suara pada miniatur candi Pawon

Sebelum dilakukan simulasi getaran dengan menggunakan speaker terlebih dahulu diukur frekuensi natural dari titik pengambilan data tersebut. Dari hasil pengukuran diperoleh 2 frekuensi natural, yang pertama pada 265 Hz dan yang kedua pada 920 Hz.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan 9 variasi sumber suara. Hasil pengukuran getaran dan suara yang diperoleh dalam simulasi dapat dilihat pada tabel 1.8.

Tabel 1.8 Data intensitas dan getaran yang timbul pada miniatur candi ketika dilakukan simulasi dengan menggunakan speaker

Parameter	Musik Metal 1	Musik Metal 2	Suara Drum 220 BPM	Suara Drum 100 BPM	Suara Bass	Suara Gitar Elektrik	Suara 265 Hz	Suara 920 Hz	Suara 100 Hz
Intensitas suara maksimal	115 dB	116,2 dB	117 dB	116 dB	116,6 dB	112,40 dB	111,1 dB	99,1 dB	121 dB
Intensitas suara rata-rata	110 dB	102,23 dB	109,71 dB	102,23 dB	110,75 dB	105,67 dB	110,4 dB	97,1 dB	120,86 dB
Kecepatan getaran maksimal	0,0447 mm/s	0,053 mm/s	0,051 mm/s	0,045 mm/s	0,049 mm/s	0,049 mm/s	0,057 mm/s	0,060 mm/s	0,0624 mm/s
Kecepatan getaran maksimal accelerometer	0,064 mm/s	0,064 mm/s	0,064 mm/s	0,064 mm/s	0,080 mm/s	0,080 mm/s	0,064 mm/s	0,032 mm/s	0,112 mm/s

Dari tabel 1.8 dapat dilihat bahwa getaran terbesar diperoleh pada sumber suara 100 Hz, baik itu getaran yang terdeteksi pada dinding maupun lantai miniatur candi. Data getaran ini sebanding dengan suara yang dibunyikan karena pada frekuensi ini intensitas suara yang dihasilkan lebih tinggi jika dibanding dengan suara lainnya yaitu mencapai 120 dB sedangkan pada suara lainnya dibawah 116 dB. Getaran terbesar ini jika dibandingkan dengan baku ambang getaran yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup ternyata masih sangat kecil. Getaran terbesar pada dinding miniatur candi memiliki kecepatan sebesar 0,112 mm/s, hanya sekitar 5,6 % dari baku ambang getaran pada bangunan kuno yang memiliki nilai sejarah tinggi.

Tabel 1.9 Data puncak getaran yang timbul pada simulasi dengan menggunakan speaker di miniatur candi

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Puncak	265		920		100	
	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/s)
Puncak 1	3.125	0.002	3.125	0.021	100	0.062
Puncak 2	265.625	0.017	918.75	0.00437	3.125	0.023
Puncak 3	6.25	0.015	-	-	300	0.00619
Puncak 4	-	-	-	-	-	-

Tabel di atas menunjukkan frekuensi dari puncak getaran yang timbul pada saat dilakukan simulasi dengan menggunakan speaker pada miniatur candi. Masing-masing sumber suara memiliki 2 sampai 4 puncak getaran. Dari data-data tersebut terlihat bahwa semua variasi sumber suara memiliki getaran dengan frekuensi 3,125 Hz meskipun puncak tersebut bukan selalu puncak tertinggi. Sedangkan pada frekuensi natural batu yang terukur dari percobaan pukul palu yaitu 265 Hz hanya diperoleh 1 puncak dengan sumber suara 265 Hz juga. Hal ini menunjukkan bahwa batu tersebut memiliki beberapa frekuensi natural diantaranya yang berhasil terdeteksi yaitu 3,125 Hz dan 265 Hz

Gambar 1.13 Perbandingan frekuensi getaran yang muncul pada simulasi di miniatur candi

Percobaan dengan menggunakan sumber suara sinus dengan frekuensi tunggal yaitu pada frekuensi 100, 265 dan 920 Hz menimbulkan getaran pada batu dengan frekuensi yang sama seperti sumber suara. Hal ini menunjukkan bahwa selain bergetar pada frekuensi natural, batu juga bergetar pada frekuensi sumber getaran dalam hal ini suara.

Data yang diperoleh dari simulasi ini tidak akan mempunyai dampak yang sama bila dilakukan pada objek candi sesungguhnya mengingat banyak sekali faktor yang mempengaruhi getaran yang timbul pada material padat akibat suara. Salah satu tujuan dari simulasi ini adalah mencoba membuat getaran sebesar mungkin yang bersumber dari suara. Bila suara dengan intensitas mencapai 120 dB tidak mampu menimbulkan getaran yang cukup besar pada miniatur candi Pawon (mendekati batas ambang 2mm/s) maka suara dengan intensitas sebesar itu juga tidak akan menimbulkan getaran yang besar pada candi sesungguhnya.

Kesimpulan

1. Kebisingan dalam keadaan normal dengan sumber suara dari pengunjung dan kendaraan pada beberapa candi telah melebihi ambang batas untuk cagar budaya berdasarkan KEP-48/MENLH/11/1996. Kebisingan pada pukul 09:00-12:00 di Candi Borobudur mencapai nilai 61,24 dB, Candi Mendut mencapai 66,77 dB dan Candi Prambanan mencapai 69,4 dB. Kondisi ini tidak terlihat pada Candi Pawon dimana kebisingan hanya mencapai 59,29 dB.

2. Hasil pengukuran getaran dan suara maksimal di lingkungan cagar budaya pada saat berlangsung konser atau event bersuara keras lainnya :

a) Candi Borobudur

Intensitas suara maksimal 96,6 dB pada saat Borobudur Marathon

Getaran maksimal 0,085 mm/s pada acara Waisak

b) Candi Mendut

Intensitas suara maksimal 83,1 dB pada saat Waisak

Getaran maksimal 0,047 mm/s pada saat Waisak

c) Candi Prambanan

Intensitas suara maksimal 102,4dB (Perwara Timur) pada saat Prambanan Jazz

Getaran maksimal 0,0593 mm/s (Perwara Timur) pada saat Prambanan Jazz

3. Berdasarkan percobaan simulasi getaran dengan speaker di miniatur candi ternyata suara dengan intensitas 121 dB (100Hz) hanya mampu menimbulkan getaran dengan kecepatan maksimal 0,112 mm/s dimana nilai ini hanya 5,6 % dari batas ambang getaran 2 mm/s yang diperbolehkan di lingkungan cagar budaya oleh Menteri Lingkungan Hidup melalui KEP-49/MENLH/11/1996. Dari data tersebut bisa disimpulkan getaran yang timbul dari suara dengan intensitas mencapai 121 dB tidak menimbulkan efek berbahaya secara langsung dan jangka pendek terhadap candi batu. Namun perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai efek jangka panjang, misalnya akan mempercepat proses kimiawi di batu candi, dan lain sebagainya.

4. Percobaan simulasi getaran dengan speaker belum menunjukkan fenomena resonansi getaran pada frekuensi natural. Oleh karena itu perlu dilaksanakan percobaan dengan sistem yang lebih baik lagi pada kajian tahap II yang dilaksanakan pada tahun 2018

5. Batas ambang suara yang bisa ditentukan dari hasil

kajian ini baru sebatas frekuensi suara saja yang diperoleh dari pengukuran frekuensi natural beberapa candi batu. Suara yang keluar dari speaker dengan frekuensi yang berada pada rentang frekuensi natural batu harus dibatasi agar tidak terjadi resonansi getaran. Berikut ini adalah frekuensi natural dari beberapa candi batu.

Keterangan :

					**
:	Konsentrasi	Persentase penetrasi rayap tanah dari <i>cross section</i> (%)	Kelas mutu	Berpengaruh sangat nyata	
					*
:	Berpengaruh nyata				
tn	: tidak berpengaruh nyata/tidak berbeda nyata				

Tabel 1.10 Batas ambang frekuensi pada beberapa candi batu

Getaran. Jakarta : Kementerian Lingkungan Hidup.

Resnics, Robert. Halliday, David. Walker, Jearl. 2007. Fundamental of Physics : Tenth Edition, John Willey & Sons.

Steffens, R. J. 1974. Structural Vibration and Damage, Departement of the Environment, Building Research Station.

Kozuh, Kevin Anthony. How Does Sound Volume Decrease As A Function of Distance?. <https://www.quora.com/How-does-sound-volume-decrease-as-a-function-of-distance>. Diakses tanggal 4 Mei 2017.

Taman Wisata Candi Borobudur. 2017. Data Pengunjung Lebaran 2016 - 2017.

Wahyuningsih, Isni. Puspitasari, Dian Eka. Prasetyoko, Yuli Harry. 2009. Kajian Carrying Capacity Candi Borobudur. Balai Konservasi Borobudur

DAFTAR PUSTAKA

Bachmann, Hugo. Ammann, Walter. 1987. Vibration In Structures Induced by Man and Machines, International Association for Bridge and Structural Engineering.

Balendra, T. 1993. Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads, Springer-Verlag.

British Standard. 1990. Evaluation and Measurement For Vibration in Buildings : Part 1 Guide For Measurement Of Vibrations and Evaluation of Their Effect On Buildings. British Standard Institution.

Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No KEP-48/MENLH/11/1996 Tentang Baku Tingkat Kebisingan. Jakarta : Kementerian Lingkungan Hidup.

Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No KEP-49/MENLH/11/1996 Tentang Baku Tingkat