



Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan  
Direktorat Jenderal Kebudayaan  
Balai Konservasi Borobudur



# KAJIAN PENGARUH KENDARAAN BERMOTOR TERHADAP BANGUNAN CAGAR BUDAYA KOLONIAL

SEMINAR PRA KAJIAN – 14 Februari 2020

# Tim Kajian

Anggota :

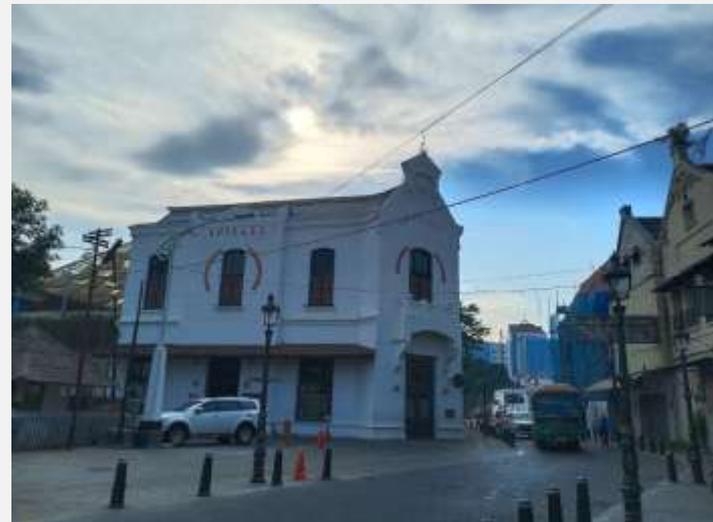
- Linus Setyo Adhidhuto
- Rony Muhammad
- Bambang Kasatriyanto
- Ajar Priyanto

Narasumber :

Ir. Ali Awaludin, Ph.D., IPM

# LATAR BELAKANG

- Letak bangunan & struktur cagar budaya yang mudah diakses serta berada di dekat jalan raya sangat menguntungkan dari segi pariwisata
- Namun demikian kendaraan yang melewati jalan tersebut menimbulkan getaran yang sampai pada bangunan / struktur
- Kondisi ini memunculkan kekhawatiran di kalangan pelestari cagar budaya
- Bila getaran tersebut memiliki frekuensi tertentu dan intensitas yang besar maka berpotensi merusak bangunan / struktur
- Selain itu juga berbahaya jika berlangsung terus menerus dan dalam waktu lama
- Untuk itu dilaksanakan kajian terhadap dampak getaran yang ditimbulkan oleh kendaraan bermotor terhadap bangunan dan struktur cagar budaya



Sumber : [ikutilangkahkaki.com](http://ikutilangkahkaki.com)

# Kajian Getaran

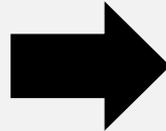
- Sumber getaran berupa suara → dikerjakan tahun 2017 – 2018, diperoleh rekomendasi intensitas suara pada lingkungan cagar budaya candi berbahan batu → getaran yang ditimbulkan kecil, tidak berbahaya untuk kelestarian struktur candi
- Sumber getaran berupa kendaraan bermotor dilaksanakan tahun 2019 – 2021 untuk cagar budaya batu, bangunan kolonial, dan kayu

# TUJUAN, OUTCOME DAN BENEFIT

## TUJUAN

Mengukur dan menganalisa respon getaran beserta dampaknya yang timbul pada bangunan cagar budaya candi akibat lalu lintas

Menyusun rekomendasi batas ambang lalu lintas di lingkungan bangunan cagar budaya kolonial

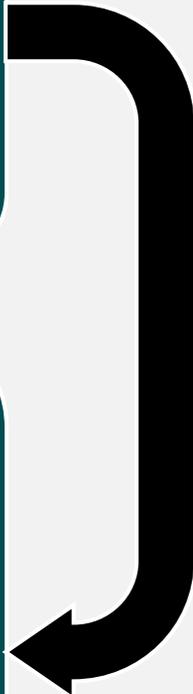


## Outcome

Diperoleh rekomendasi batas ambang lalu lintas di lingkungan bangunan cagar budaya kolonial.

## Benefit

terjaganya kelestarian bangunan cagar budaya kolonial yang berada dekat dengan jalur lalu lintas dengan cara mengurangi dampak yang timbul dari kendaraan bermotor yang melintas.



# RUANG LINGKUP

- Faktor yang diperhitungkan dalam kajian ini adalah getaran yang bersumber dari lalu lintas (kendaraan berat dan kereta api)
- Analisis respon getaran pada struktur bangunan dilakukan pada bangunan cagar budaya kolonial yaitu bangunan di Kota Lama, Semarang; dan Kota Tua, Jakarta.
- Batas ambang getaran yang dipergunakan adalah batas ambang getaran kejut dan mekanik yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No KEP-49/MENLH/11/1996 tentang Baku Tingkat Getaran



# LANDASAN TEORI

# Getaran dan Gelombang

Getaran → gerakan bolak balik yang berlangsung secara periodik dari suatu benda / sistem terhadap titik kesetimbangannya

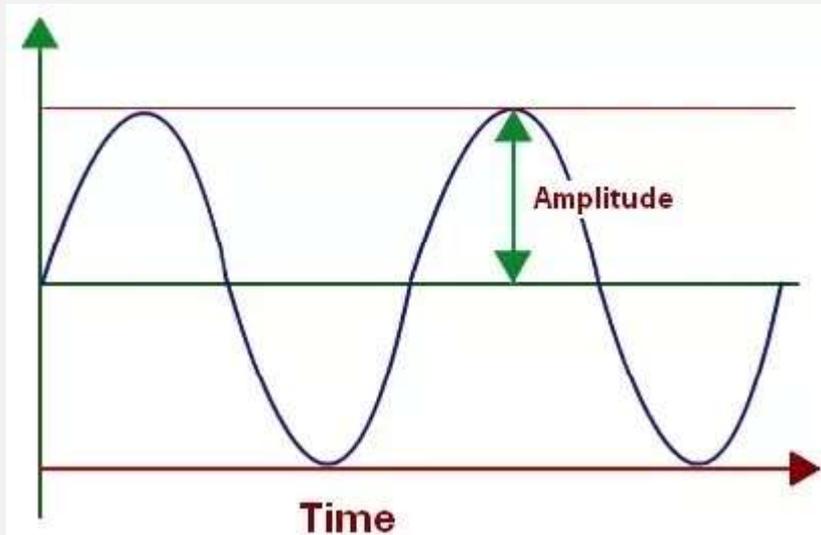
Gelombang → getaran yang merambat

Berdasarkan media rambatnya :

- Gelombang mekanik → membutuhkan media rambat
- Gelombang elektromagnetik → tidak membutuhkan media rambat

# Parameter Getaran

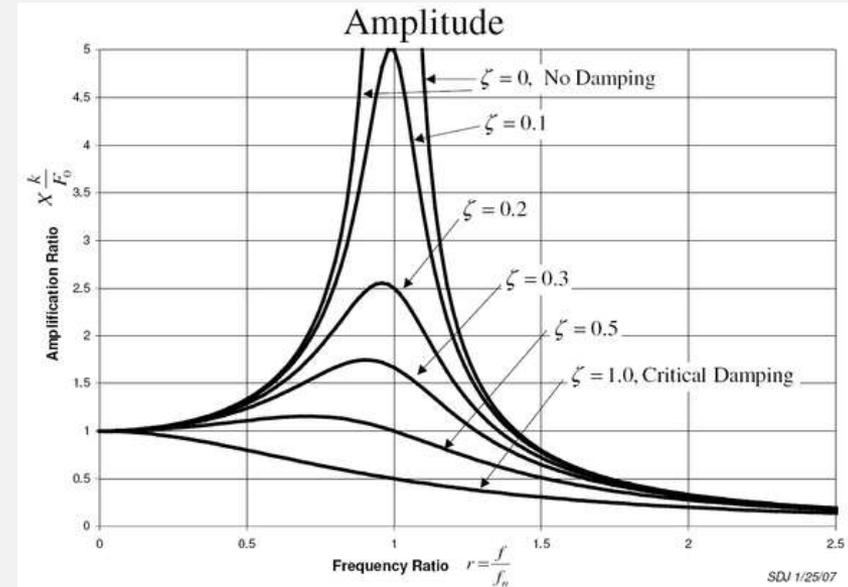
- Frekuensi adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam 1 detik dan dinyatakan dalam satuan Hz
- Amplitudo (A) adalah simpangan tertinggi dari suatu getaran dan dinyatakan dalam satuan milimeter.



- Getaran dapat dinyatakan dalam percepatan, kecepatan, dan perpindahan
  - Percepatan getaran menunjukkan perubahan kecepatan getaran
  - Kecepatan getaran menunjukkan seberapa cepat suatu material bergetar
  - Perpindahan menunjukkan seberapa jauh terjadi perpindahan material selama terjadi getaran

# Frekuensi Natural

- Getaran bebas (free vibration) → suatu getaran yang terjadi pada suatu benda / sistem meskipun benda / sistem tersebut tidak diberikan gaya dari luar
- Getaran bebas ini memiliki frekuensi yang disebut frekuensi natural
- Bila suatu gaya diberikan kepada sistem, dan gaya tersebut menghasilkan getaran dengan frekuensi mendekati atau sama dengan frekuensi natural maka akan terjadi resonansi
- Resonansi mengakibatkan amplitudo getaran yang muncul menjadi berlipat ganda



# Faktor yang berpengaruh terhadap getaran yang timbul pada bangunan

(Rainer, J.H,  
1982)

## 1. Sumber getaran

Kecepatan dan berat kendaraan, jenis getaran kendaraan, suspensi kendaraan, kondisi jalan, karakteristik ban (Ammann, W, 1987)

## 2. Jalur rambat getaran

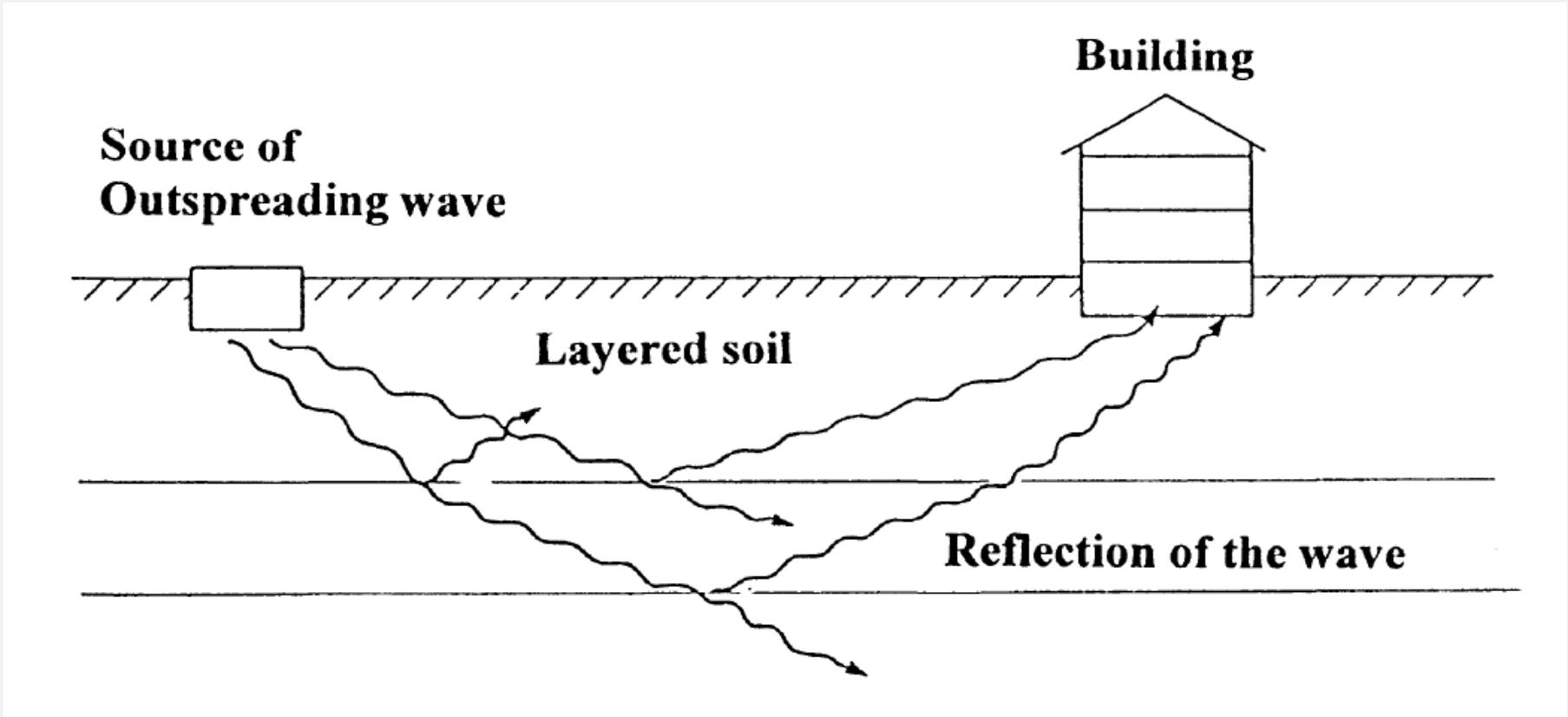
Semakin jauh → semakin kecil getarannya

Getaran pada tanah yang lembut dan padat > tanah lembut dan berpasir

## 3. Penerima getaran (bangunan cagar budaya)

Semakin tinggi → semakin kuat getaran, bahkan mencapai 2 – 5 kalinya

Bergantung pada sumber getaran, kerentanan komponen bangunan terhadap getaran (frekuensi natural dan redaman)



Sumber getaran

Jalur rambat getaran

Penerima getaran

Sumber : Niederwanger, 1999

# SUMBER GETARAN

## Disebabkan Manusia :

- **Kendaraan (truk, bus, pesawat, kereta api)**
- Pekerjaan konstruksi
- Industri, pabrik
- Suara (konser, lonceng)
- Ledakan (tambang)

## Disebabkan Alam :

- Gempa bumi
- Getaran mikrotremor
- Angin

# Jenis Getaran

## ➤ Continuous vibration

Getaran yang berlangsung terus menerus dalam waktu tertentu (getaran mesin, lalu lintas yang stabil, pekerjaan konstruksi yang terus menerus : pengeboran terowongan)



## ➤ Impulsive vibration

Getaran yang meningkat dan menurun dengan cepat, bisa dalam 1 atau beberapa siklus getaran (tumbukan oleh benda yang berat, ledakan)



## ➤ Intermittent vibration

Getaran kontinu yang berlangsung terputus-putus, atau getaran impulsive yang berlangsung berulang-ulang atau getaran kontinu yang mengalami perubahan amplitudo secara signifikan (kereta api, iringan kendaraan berat, pemasangan paku bumi)



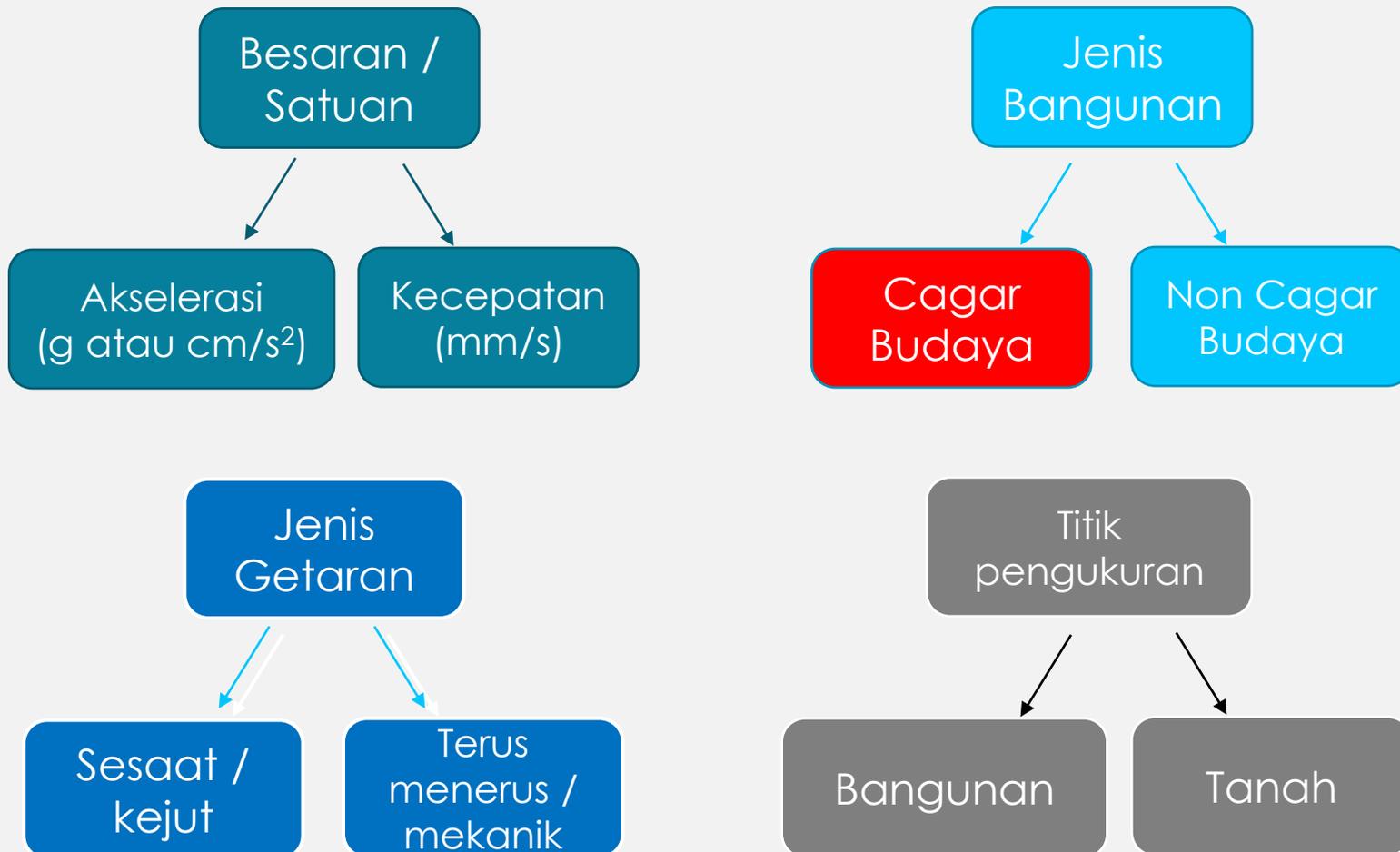
# MEDIUM GETARAN

- Amplitudo getaran akan berkurang bila semakin jauh dari sumbernya
- Faktor lain yang mempengaruhi adalah redaman dari medium getaran, dalam kasus ini adalah tanah
- Kecetapan getaran di suatu titik pada kasus gelombang permukaan dirumuskan sebagai berikut

$$v(r) = v(r_1) \sqrt{\frac{r_1}{r}} e^{-\alpha(r-r_1)} \quad \text{sumber : Niederwanger, 1999}$$

- Dimana  $v(r)$  adalah kecepatan getaran di titik yang ingin diukur  
 $v(r_1)$  adalah kecepatan getaran di titik awal yang diketahui nilainya  
 $r$  dan  $r_1$  adalah jarak titik dengan sumber getaran dan  $\alpha$  adalah koefisien redaman

# Batas Ambang Getaran



# Akselerasi (g atau mm/s<sup>2</sup>)

Bata, M,  
1971

Potensi kerusakan bangunan oleh lalu lintas pada bangunan kolonial

**TABLE 1**  
**Suggested Effect of Traffic Vibrations on Masonry Buildings**  
(Adapted from Bata<sup>5</sup>)

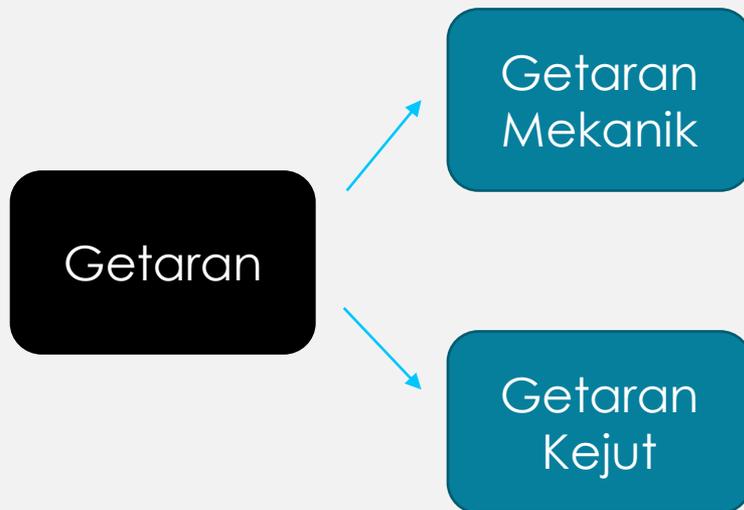
Category	Average Acceleration, g (mm/s <sup>2</sup> )	Location of Building	Traffic Density (veh/day)	Danger of Crack Origin
a	<0.005	on secondary road	—	none
b	0.005-0.010	>10m from main road	<2000	none in next few decades
c	0.005-0.010	near main road	>2000	probable in next few decades
d	0.010-0.020	near main road	>2000	probable in next 1 or 2 decades
e	>0.020	near main road	>2000	certain within next few years

# KECEPATAN (mm/s atau inci /s)

## Baku Tingkat Getaran di Indonesia

(Kementerian  
Lingkungan Hidup  
KEP-49/MENLH/11/1996)

Mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup



- Berasal dari sarana dan peralatan kegiatan manusia
- Berlangsung secara terus menerus
- Terjadi secara tiba-tiba dan sesaat

# Baku Tingkat Getaran **Mekanik** Berdasarkan Jenis Kerusakannya

(Kementerian  
Lingkungan Hidup  
KEP-49/MENLH/11/1996)

Kategori A : tidak menimbulkan kerusakan

Kategori B : kemungkinan kerusakan plesteran

Kategori C : kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban

Kategori D : rusak dinding pemikul beban

Getaran		Frekuensi (Hz)	Batas Getaran, Peak, mm/detik			
Parameter	Satuan		Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
Kecepatan Getaran	mm/detik	4	<2	2 – 27	>27 – 140	>140
Frekuensi	Hz	5	<7.5	<7.5 – 25	>25 – 130	>130
		6.3	<7	<7 – 21	>21 – 110	>110
		8	<6	<6 – 19	>19 – 100	>100
		10	<5.2	<5.2 – 16	>16 – 90	>90
		12.5	<4.8	<4.8 – 15	>15 – 80	>80
		16	<4	<4 – 14	>14 – 70	>70
		20	<3.8	<3.8 – 12	>12 – 67	>67
		25	<3.2	<3.2 – 10	>10 – 60	>60
		31.5	<3	<3 – 9	>9 – 53	>53
		40	<2	<2 – 8	>8 – 50	>50
		50	<1	<1 – 7	>7 – 42	>42

# Baku Tingkat Getaran **Mekanik** Berdasarkan Jenis Bangunan

(Kementerian  
Lingkungan Hidup  
KEP-49/MENLH/11/1996)

Kelas	Tipe Bangunan	Kecepatan Getaran (mm/detik)			
		Pada Fondasi			Pada Bidang Datar di lantai Paling Atas
		Frekuensi			
		<10 Hz	10 – 50 Hz	50 – 100 Hz*	Campuran Frekuensi
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

\* Untuk frekuensi > 100 Hz, sekurang-kurangnya nilai yang tersebut dalam kolom harus dipakai

# Baku Tingkat Getaran **Kejut** Berdasarkan Jenis Bangunan

(Kementerian  
Lingkungan Hidup  
KEP-49/MENLH/11/1996)

Kelas	Jenis Bangunan	Kecepatan Getaran Maksimum (mm/detik)
1	Peruntukan dan bangunan kuno yang mempunyai nilai sejarah yang tinggi	2
2	Bangunan dan kerusakan yang sudah ada, tampak keretakan-keretakan pada tembok	5
3	Bangunan untuk dalam kondisi teknis yang baik, ada kerusakan-kerusakan kecil seperti : plesteran yang retak	10
4	Bangunan "kuat" (misalnya : bangunan industri terbuat dari beton atau baja)	10 - 40

# DAMPAK

DIN 4150

- Jika **getaran < batas ambang** : tidak akan timbul kerusakan. Namun jika tetap terjadi kerusakan besar maka bisa diasumsikan bahwa hal tersebut disebabkan oleh faktor lain selain getaran
- Jika **getaran > batas ambang** : tidak serta merta langsung terjadi kerusakan parah, namun akan mengurangi *serviceability* bangunan  
Gejala berkurangnya *serviceability* bangunan :
  1. Muncul retakan/crack pada plester
  2. Retakan yang sudah ada sebelumnya akan melebar
  3. Partisi dari dinding pemikul beban akan lepasGejala tersebut masuk dalam kategori kerusakan kecil / *minor damage*
- Jika **getaran >> batas ambang** : terjadi kerusakan secara langsung (dibutuhkan investigasi lebih lanjut)

# Batas Ambang Getaran Pada Cagar Budaya Lainnya

Johnson,  
A.P,  
2015)

## Modern Wing, Art Institute of Chicago

- Dibangun tahun 1893
- Batas ambang getaran bangunan 12,7 mm/detik
- Batas ambang getaran untuk bagian yang terdapat koleksi 2,54 mm/s



## Sullivan Arch, Art Institute of Chicago

- Dibangun tahun 1893
- Batas ambang getaran 5,08 mm/detik

# Batas Ambang Getaran Pada Cagar Budaya Lainnya

Johnson,  
A.P,  
2015)

## Saint Louis Art Museum

- Dibangun tahun 1904
- Batas ambang getaran bangunan 12,7 mm/detik
- Batas ambang getaran untuk bagian yang terdapat koleksi 3,048 mm/s



## Taft Museum of Art

- Dibangun tahun 1820
- Batas ambang getaran 3,048 mm/detik

# Prediksi getaran pada jalan berlubang

- PPV adalah kecepatan partikel puncak ( $mm/s$ )
- $a$  adalah ketinggian atau kedalaman maksimum lubang pada jalan ( $mm$ )
- $v$  adalah kecepatan kendaraan ( $km/jam$ )
- $t$  adalah faktor skala tanah
- $p$  adalah indeks roda kendaraan (bernilai 0,75 bila gundukan/lubang hanya dilewati satu sisi kendaraan, dan bernilai 1 bila dilewati kedua sisi)
- $r$  adalah jarak antara lubang jalan dan pondasi bangunan,
- $x$  adalah eksponen kekuatan yang menunjukkan redaman getaran oleh jarak

$$PPV = 0,028a(v/48)tp(r/6)^x$$

Koefisien  $x$  dan  $t$  untuk pemodelan Watts

Jenis tanah	Eksponen kekuatan $x$		$t$
	Interval	Rata-rata	
Gambut	-	1,19	3,84
Aluvial	0,79 – 0,80	0,79	7,07
Tanah liat	0,99 – 1,13	1,06	3,10
Kerikil dan pasir	0,69 – 0,82	0,74	0,94
Tanah liat besar	0,71 – 1,18	0,93	0,43
Batu kapur	-	1,08	0,10

- Semakin cepat kendaraan, semakin dalam/tinggi gundukan maka akan semakin besar getaran yang timbul pada pondasi
- Bergantung dari jenis tanah



# Metode Kajian

# Alat Pengukur Getaran

## Strong Motion Accelerograph Kinometrics ETNA

Spesifikasi :

Sumbu : 3 (X,Y,Z)

Sensor : Triaxial EpiSensor Force Balance  
Accelerometer

Frequency range : DC – 80 Hz

## Vibration Analyzer Rion VA-12

Spesifikasi :

Sumbu : 1

Sensor : Piezoelectric accelerometer  
Frequency range : 3 Hz – 20.000 Hz



# Sumber Data

## 1. Data primer

- Data kecepatan kendaraan yang melintas, data getaran yang terukur pada lantai, dinding dan bidang datar paling atas bangunan kolonial, serta data jenis tanah di sekitar bangunan.

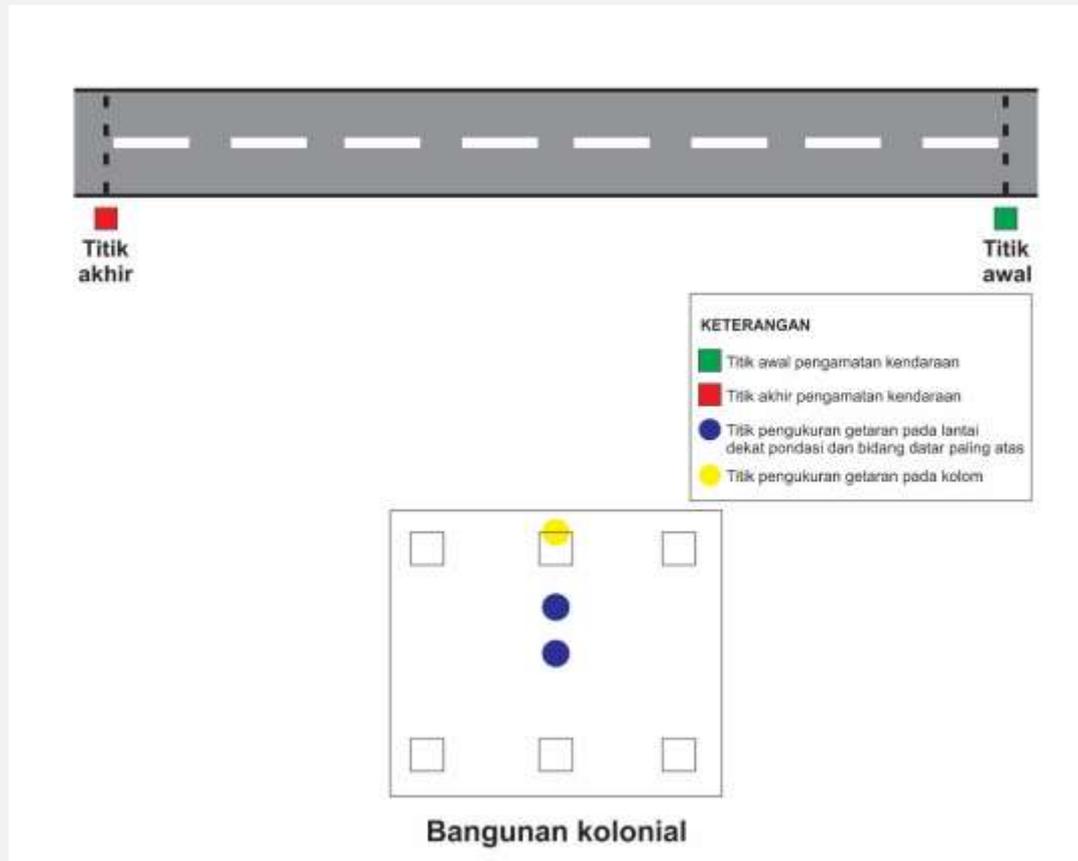
## 2. Data sekunder

- Data lalu lintas harian yang diterbitkan oleh dinas perhubungan setempat, faktor skala tanah, serta koefisien redaman getaran oleh jarak.

# TAHAPAN

- A. Pengukuran respon getaran yang terjadi pada bangunan cagar budaya kolonial
- B. Eksperimen pembuktian pemodelan Watts
- C. Menentukan Batas Ambang Lalu Lintas di Lingkungan Bangunan Cagar Budaya Kolonial

# Pengukuran respon getaran yang terjadi pada bangunan cagar budaya kolonial



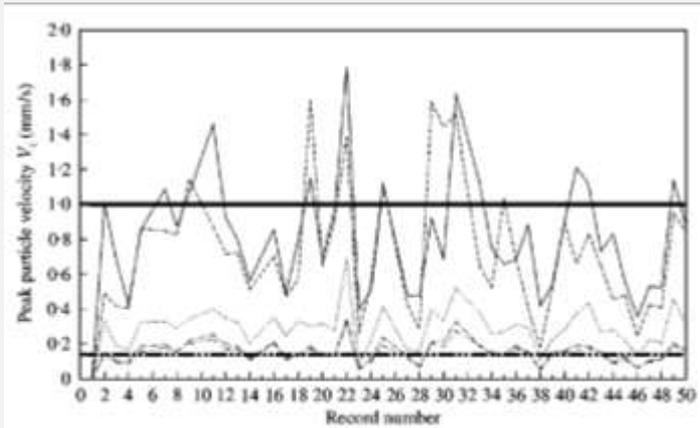
- Lantai
- Dinding pemikul beban
- Komponen lain seperti kaca, pintu

# Data yang diamati di bangunan cagar budaya kolonial

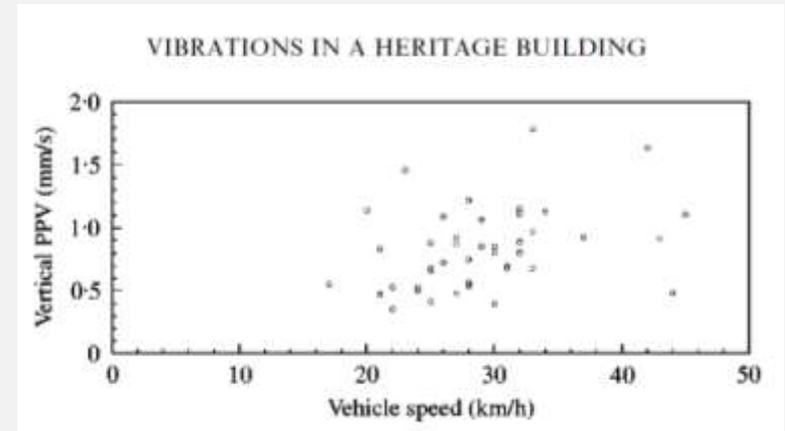
- Jenis tanah
- Kondisi jalan
- Jenis kendaraan, data lalu lintas harian
- Kondisi bangunan : material penyusun, kondisi struktural (retakan, kondisi plester, komponen struktur dinding pemikul beban), kondisi arsitektural, frekuensi natural
  - Kategori **A** : tidak menimbulkan kerusakan
  - Kategori **B** : kemungkinan kerusakan plesteran
  - Kategori **C** : kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban
  - Kategori **D** : rusak dinding pemikul beban

Batas ambang getaran mekanik  
(Kementerian Lingkungan Hidup  
KEP-49/MENLH/11/1996)

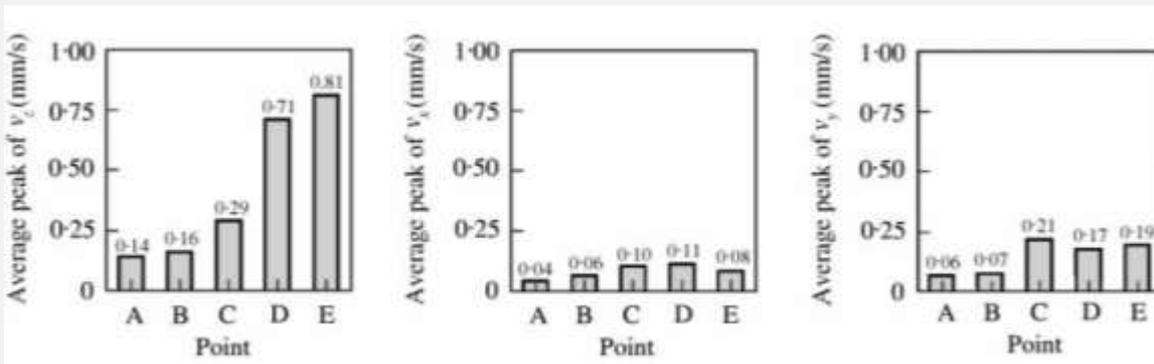
- Grafik kecepatan getaran berdasarkan jenis kendaraan



- Grafik kecepatan getaran berdasarkan kecepatan kendaraan



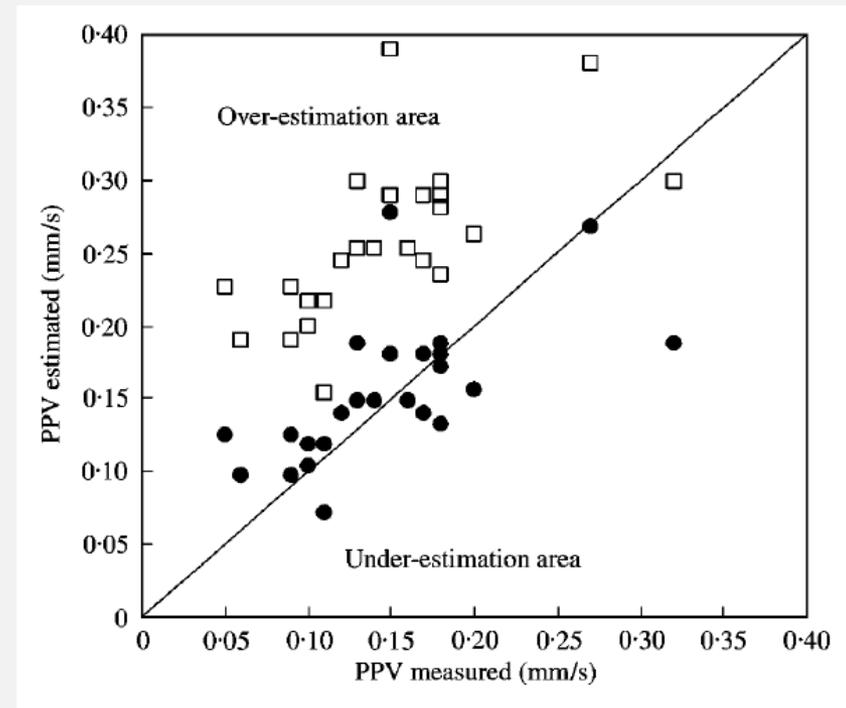
- Grafik kecepatan getaran berdasarkan lokasi pengambilan data



# Eksperimen pembuktian pemodelan Watts

- Sumber data : pengambilan data di kota lama dan kota tua (dengan memperhitungkan kondisi banyak kendaraan dalam satu waktu) dan pengambilan data secara ideal (hanya 1 kendaraan yang melintas)
- Kedalaman lubang diukur terlebih dahulu
- Pengamat mencatat apakah lubang/gundukan dilintasi oleh kendaraan
- Hasil yang terukur dari percobaan kemudian dibandingkan dengan hasil dari rumus Watts

$$PPV = 0,028a(v/48)tp(r/6)^x$$



# Variasi gundukan & lubang jalan, serta jarak sumber getaran

- Variasi gundukan dan lubang jalan

Jarak sumber getaran : 2 meter

Kecepatan kendaraan 40 km/jam

Ketinggian gundukan 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm

Kedalaman lubang 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm

- Variasi jarak sumber getaran

Jarak sumber getaran : 2, 4, 6, 8, 10 meter

Kecepatan kendaraan 40 km/jam

Ketinggian gundukan 5 cm

Kedalaman lubang 5 cm



Kendaraan yang digunakan :  
Estimasi berat  $\pm$  13 ton (pasir 7m<sup>3</sup>)  
Sumbu 1-2

# Menentukan Batas Ambang Getaran di Lingkungan Bangunan Cagar Budaya Kolonial

Pengukuran respon getaran yang terjadi pada bangunan cagar budaya kolonial

Eksperimen pembuktian pemodelan Watts

Menentukan batas ambang lalu lintas di lingkungan bangunan cagar budaya kolonial

# Lokasi Pengambilan Data

## Kota Lama Semarang



- Sumber getaran : kendaraan bermotor (mobil, pickup, bus, truk?)
- Material jalan : konblok
- Jarak dengan jalan : < 5 meter

## Kota Tua Jakarta



- Sumber getaran : kendaraan bermotor (mobil, pickup, bus, truk?), kereta api
- Material jalan : aspal, rel kereta api

# HASIL YANG DIHARAPKAN

- Rekomendasi lalu lintas
- Rekomendasi kriteria jalan / kondisi jalan
- Metode untuk menentukan batas ambang lalu lintas pada bangunan / struktur cagar budaya kolonial lainnya (selain Kota Lama Semarang, dan Kota Tua Jakarta)

# 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)
- Crispino, M., & D'Apuzzo, M. (2001). Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building. *Journal of Sound and Vibration*, 246(2), 319–335. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3648>
- Johnson, A. P., Hannen, W. R., & Zuccari, F. (2015). Vibration Limits for Historic Buildings and Art Collections. *Journal of Preservation Technology*, 46(1), 66–74. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4908-3>
- Kementerian Lingkungan Hidup. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: Kep - 49 / MENLH / 11 / 1996 tentang Baku Tingkat Getaran.*, (1996).
- Pemerintah Daerah Kota Semarang. Peraturan Daerah Kota Semarang Nomor 8 Tahun 2003. , Lembaran Daerah Kota Semarang Nomor 4 Seri E § (2003).
- Pemerintah Indonesia. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya. , Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2010 Tentang Cagar Budaya § (2010).
- 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>
- Solopos. (2017). Kota Lama Semarang Terlarang Bagi Kendaraan Besar. Retrieved February 10, 2020, from Solopos website: <https://www.solopos.com/kota-lama-semarang-terlarang-bagi-kendaraan-besar-801535>
- Watts, G. R. (1990). Traffic induced vibrations in buildings. *Transport and Road Research Laboratory (Crowthorne)*, (R246).