

## **BAB IV**

### **HASIL PENELITIAN**

#### **4.1 Identifikasi Masalah**

##### **4.1.1 Pengamatan dan Penilaian Awal**

###### **4.1.1.1 Hasil Pengamatan**

Gedung konser museum musik dunia di Kota Batu menampilkan koleksi yang kaya dan beragam, tersebar di tiga lantai yang masing-masing memiliki fokus unik. Di lantai pertama, pengunjung disambut dengan pengenalan berbagai alat musik dari seluruh dunia, mencakup instrumen-instrumen khas dari berbagai benua dan negara. Lantai ini dirancang untuk memberikan pemahaman mendalam tentang bagaimana alat musik beragam ini mencerminkan kekayaan budaya dan tradisi musik dari berbagai belahan dunia.

Lantai kedua mengajak pengunjung untuk menjelajahi berbagai genre musik yang mendunia, mulai dari jazz yang kaya akan improvisasi, rock yang energik, hingga K-pop yang populer di kalangan generasi muda. Selain itu, lantai ini juga memperkenalkan genre musik tradisional Dunia seperti dangdut dan kerongcong, serta genre reggae yang dikenal dengan irama santainya. Sebagai tambahan, patung-patung tokoh musik dunia yang terkenal juga dipajang di lantai ini, memberikan penghargaan visual kepada para legenda musik yang telah menginspirasi banyak orang.

Lantai ketiga dari museum ini menawarkan pengalaman yang lebih mendalam dengan sebuah gedung konser yang digunakan untuk pertunjukan musik

langsung. Di lantai ini juga terdapat koleksi alat-alat musik dari masa lalu, menampilkan evolusi instrumen musik dari berbagai era. Koleksi ini tidak hanya berfungsi sebagai sarana edukasi, tetapi juga sebagai penghormatan terhadap warisan musik yang telah berkembang selama berabad-abad, memberikan wawasan kepada pengunjung tentang bagaimana alat-alat musik kuno telah mempengaruhi musik modern.

Pada gedung konser museum musik Dunia di Kota Batu, fenomena getaran yang terdeteksi pada balok gantung telah menjadi perhatian utama. Getaran ini pertama kali terdeteksi oleh tim teknis saat melakukan pemeriksaan rutin terhadap struktur bangunan. Meskipun balok gantung dirancang untuk menambah keindahan dan fleksibilitas ruang, munculnya getaran yang tidak diinginkan menunjukkan adanya potensi masalah struktural yang memerlukan perhatian serius. Getaran ini bisa disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk perubahan beban pada bangunan, pergeseran material, atau resonansi dari aktivitas di sekitar museum.

Berdasarkan panduan desain struktural (Steel Design Guide Series, 2003), respon manusia terhadap getaran pada lantai tergantung pada aktivitas yang mereka lakukan. Individu yang berada di kantor atau di rumah mereka umumnya tidak menyukai getaran yang "terasa jelas," yang tercapai pada percepatan puncak sekitar 0,5% dari percepatan gravitasi (g). Namun, individu yang terlibat dalam aktivitas fisik, seperti berolahraga atau menari, dapat menoleransi getaran yang sekitar 10 kali lebih tinggi, atau sekitar 5% g atau lebih.

Di tempat-tempat seperti lantai dansa, pusat kebugaran, atau pusat perbelanjaan, orang biasanya menerima tingkat getaran sekitar 1,5% g. Tingkat kenyamanan terhadap getaran dapat bervariasi tergantung durasi dan jarak sumber

getaran. Frekuensi getaran yang nyaman bagi kebanyakan orang berada dalam rentang 4 Hz hingga 8 Hz; di luar rentang ini, percepatan getaran yang lebih tinggi mungkin dapat diterima.

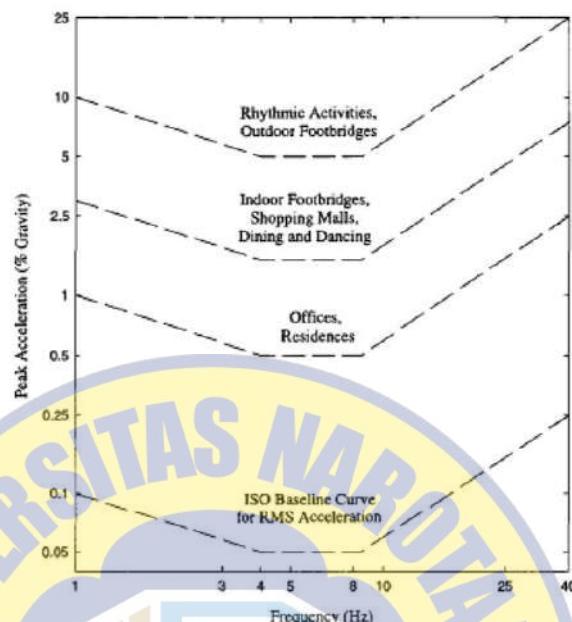
Untuk gedung konser, standar kenyamanan terkait getaran perlu lebih ketat dibandingkan pusat kebugaran atau pusat perbelanjaan, mengingat pengunjung biasanya berada dalam kondisi diam atau mendengarkan dengan tenang. Mereka lebih peka terhadap getaran yang mungkin mengganggu kualitas pengalaman mendengarkan musik atau mengalihkan perhatian dari pertunjukan. Dalam konteks ini:



**Gambar 4. 1 Desain Gedung Konser Museum Musik Dunia Di Kota Batu**

- 1) Percepatan Getaran: Percepatan maksimum pada gedung konser sebaiknya dijaga di bawah 0,5% g, karena ini adalah batas di mana getaran menjadi "terasa jelas" bagi orang-orang yang dalam keadaan diam. Hal ini serupa dengan lingkungan kantor atau tempat tinggal, di mana kenyamanan menjadi prioritas utama.
- 2) Frekuensi Getaran: Frekuensi getaran juga harus dijaga antara 4 Hz hingga 8 Hz, batas yang paling nyaman bagi manusia. Getaran di luar rentang ini

mungkin memerlukan penanganan khusus, seperti penambahan peredam atau perubahan desain struktur untuk mengurangi transmisi getaran.



**Gambar 4. 2 Kurva puncak percepatan yang disarankan untuk kenyamanan manusia terhadap vibrasi menurut Allen dan Murray , 1993; ISO 2631-2, 1989**

- 3) Desain Struktur: Gedung konser mungkin perlu menggunakan struktur **PRO PATRIA** dengan rasio redaman yang lebih tinggi atau bahan yang dapat menyerap getaran untuk mencegah gangguan pada pengalaman pendengar. Partisi dan komponen non-struktural yang digunakan dalam gedung konser juga sebaiknya didesain agar tidak memperkuat getaran.
  - 4) Pengendalian Getaran Eksternal: Sumber getaran eksternal, seperti lalu lintas atau kegiatan di sekitar gedung, harus dikendalikan atau diisolasi dari gedung konser. Ini dapat dilakukan melalui teknik desain seperti fondasi dengan redaman getaran atau menggunakan material isolasi khusus.
- Dengan demikian, desain gedung konser harus mempertimbangkan faktor-faktor tersebut untuk menciptakan lingkungan yang bebas dari gangguan getaran

yang dapat mengurangi kenyamanan dan kualitas pengalaman akustik.

**Tabel 4. 1 Nilai parameter Po,  $\beta$ , dan limit  $a_0/g$  (Steel Design Guide Series, 2003)**

Jenis	Gaya Tetap (Po) (KN)	Getaran (Hz)	Rasio Redaman ( $\beta$ )	Limit Percepatan ( $a_0/g \times 100\%$ )
Kantor, tempat tinggal, tempat ibadah	0,29	1	0,02 - 0,05	0,5 %
Pusat perbelanjaan	0,29	4	0,02	1,5 %
Jembatan penyeberangan (dalam ruangan), gedung konser, restoran, dan tempat aerobik	0,41	4	0,01	1,5 %
Jembatan penyeberangan (luar ruangan)	0,41	10	0,01	5,0 %

#### 4.1.1.2 Hasil Penilaian Awal

Identifikasi awal terhadap getaran yang terjadi pada balok gantung di lantai ketiga museum, khususnya di gedung konser yang digunakan untuk pertunjukan musik langsung, telah menyoroti potensi masalah struktural dan kenyamanan pengunjung. Getaran ini pertama kali terdeteksi oleh tim teknis selama pemeriksaan rutin, tepat pada saat konser berlangsung. Mengingat gedung konser dirancang untuk mempertahankan kualitas akustik dan kenyamanan tinggi, adanya getaran ini menjadi perhatian serius karena dapat mengganggu pengalaman pengunjung dan berpotensi menurunkan stabilitas struktur.

**Tabel 4. 2 Hasil Identifikasi Awal Gedung**

No.	Aspek Identifikasi	Deskripsi
1	Lokasi Getaran	Getaran terdeteksi pada balok gantung yang berada di lantai ketiga museum, tepatnya di gedung konser yang digunakan untuk pertunjukan musik langsung.
2	Waktu Deteksi Getaran	Getaran pertama kali terdeteksi oleh tim teknis saat melakukan pemeriksaan rutin terhadap struktur bangunan ketika konser musik sedang berlangsung.
3	Jenis Getaran	Getaran yang teramat bersifat tidak diinginkan, mengganggu kenyamanan, menimbulkan kekhawatiran, dan berpotensi mengganggu stabilitas

No.	Aspek Identifikasi	Deskripsi
		struktur balok gantung.
4	Sumber Potensial Getaran	Potensi penyebab getaran meliputi: perubahan beban pada bangunan (seperti fluktuasi jumlah pengunjung atau peralatan tambahan), pergeseran material struktur, dan resonansi yang diakibatkan oleh aktivitas di sekitar museum.
5	Kondisi Balok Gantung	Balok gantung didesain dengan tujuan meningkatkan estetika dan fleksibilitas ruang, namun adanya getaran menimbulkan kekhawatiran mengenai potensi masalah struktural.
6	Dampak Getaran	Getaran dikhawatirkan dapat memengaruhi stabilitas keseluruhan struktur balok, mempengaruhi kenyamanan pengunjung serta berpotensi membahayakan keselamatan pengunjung serta merusak keindahan interior museum.
7	Tindakan Pengamatan Awal	Pengamatan awal melibatkan pemeriksaan fisik oleh tim teknis untuk mengevaluasi kondisi balok gantung serta mengidentifikasi titik-titik kritis yang rentan terhadap getaran lebih lanjut.
8	Riwayat Pemeliharaan	Catatan menunjukkan bahwa balok gantung telah menjalani pemeriksaan rutin, namun belum ada upaya khusus untuk menangani fenomena getaran ini sebelum ditemukan.

Getaran yang terdeteksi pada balok gantung di gedung konser memerlukan analisis yang mendalam untuk memahami sumber, dampak, dan solusi potensial yang diperlukan. Sumber getaran diperkirakan berasal dari beberapa faktor, termasuk perubahan beban pada bangunan akibat fluktuasi jumlah pengunjung atau peralatan tambahan, pergeseran material struktur, dan resonansi dari aktivitas di sekitar museum. Resonansi ini mungkin terjadi karena getaran yang dihasilkan oleh aktivitas konser atau lingkungan sekitar dapat memperbesar getaran alami struktur, sehingga menghasilkan getaran yang terasa di balok gantung. Kondisi ini sangat mungkin diperburuk oleh desain balok yang fleksibel, yang meskipun dimaksudkan untuk meningkatkan estetika dan fleksibilitas ruang, ternyata lebih rentan terhadap getaran.

Getaran yang berkelanjutan dapat menyebabkan kelelahan material pada balok gantung dan berpotensi melemahkan integritas strukturnya seiring waktu. Dampak langsungnya adalah menurunnya stabilitas bangunan dan terganggunya kenyamanan pengunjung, yang mungkin merasa cemas dengan adanya getaran tersebut. Lebih jauh lagi, apabila tidak segera ditangani, getaran ini dapat menimbulkan risiko keamanan bagi pengunjung serta merusak keindahan dan estetika interior museum. Pengamatan awal yang dilakukan tim teknis mencakup pemeriksaan fisik dan identifikasi titik-titik kritis yang rentan terhadap getaran lebih lanjut, sebagai langkah preventif untuk memahami sifat dan tingkat keparahan masalah ini. Meskipun catatan pemeliharaan menunjukkan bahwa balok gantung telah menjalani pemeriksaan rutin, belum ada tindakan khusus yang difokuskan pada fenomena getaran ini sebelumnya, menunjukkan perlunya strategi pemeliharaan yang lebih intensif. Langkah-langkah tambahan, seperti analisis frekuensi getaran, pemasangan peredam, atau penguatan struktur, mungkin perlu dipertimbangkan untuk menjaga keamanan dan kenyamanan gedung konser.

#### **4.1.2 Pengumpulan Data Lapangan**

Pengumpulan data Lapangan dalam investigasi getaran pada balok gantung gedung konser Museum Musik Dunia di Kota Batu bertujuan untuk memahami kondisi awal struktur dan potensi sumber masalah. Langkah ini melibatkan inspeksi visual dan teknis untuk mengidentifikasi gejala-gejala yang mengindikasikan adanya ketidakstabilan atau masalah struktural yang dapat menyebabkan atau memperburuk getaran pada balok gantung. Berikut beberapa aspek penting yang diperhatikan:

#### 4.1.1.3 Pengukuran Getaran Langsung pada Balok Gantung

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sensor getaran untuk mendapatkan data terkait frekuensi, amplitudo, dan durasi getaran yang terjadi pada balok gantung. Pengukuran ini dilakukan selama jam operasional museum serta pada waktu-waktu puncak, seperti selama konser atau aktivitas yang melibatkan banyak pengunjung. Data frekuensi dan amplitudo getaran memberikan indikasi tentang seberapa kuat dan sering getaran terjadi, yang menjadi dasar untuk menilai potensi dampak resonansi serta kerentanan struktural balok gantung.

Berikut adalah tabel data pengamatan untuk 12 kali konser di Gedung Konser Museum Musik Dunia di Kota Batu pada tahun 2023, dengan nilai-nilai parameter gaya tetap ( $P_o$ ), getaran (Hz), rasio redaman ( $\beta$ ), dan limit percepatan ( $a_o/g \times 100\%$ ) yang melebihi standar. Adapun hasil pengamatan menunjukkan data sebagai berikut:

**Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Getaran Gedung Konser Museum Musik Dunia**

No.	Tanggal Konser	Gaya Tetap ( $P_o$ ) (KN)	Getaran (Hz)	Rasio Redaman ( $\beta$ )	Limit Percepatan ( $a_o/g \times 100\%$ )
1	15 Jan 2023	0,45	7.2	0,012	2.0%
2	12 Feb 2023	0,48	8.5	0,014	1.8%
3	10 Mar 2023	0,50	7.8	0,013	2.2%
4	14 Apr 2023	0,47	8.2	0,011	1.9%
5	20 May 2023	0,52	7.5	0,015	2.3%
6	18 Jun 2023	0,49	8.1	0,013	2.1%
7	15 Jul 2023	0,53	9.0	0,012	2.4%
8	12 Aug 2023	0,51	7.7	0,014	2.0%
9	10 Sep 2023	0,54	8.8	0,010	2.5%
10	15 Oct 2023	0,50	8.3	0,013	2.2%
11	12 Nov 2023	0,55	7.9	0,011	2.3%
12	17 Dec 2023	0,53	8.6	0,014	2.4%
Rata-Rata	-	0,51	8.0	0,013	2.2%

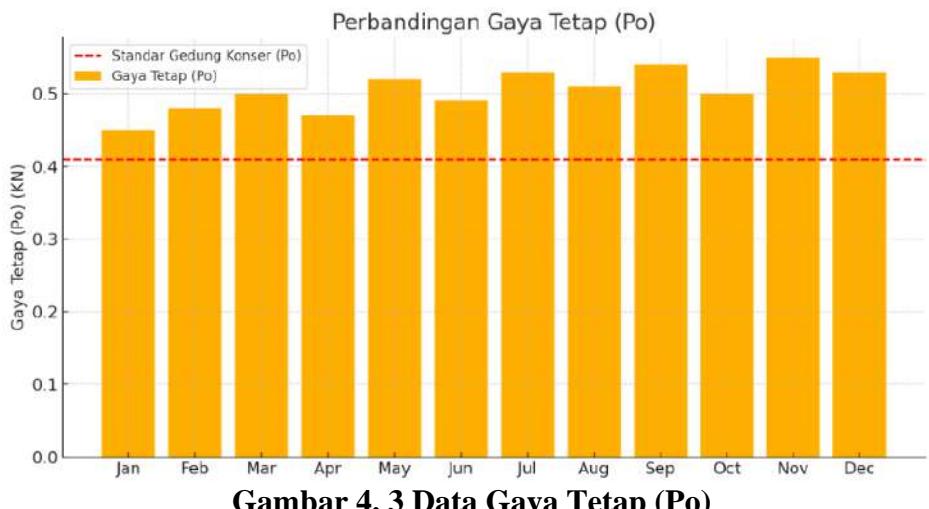
#### Keterangan Status:

- Status Gaya Tetap ( $P_o$ ): Melebihi standar 0,41 KN
- Status Getaran (Hz): Melebihi standar 4 Hz
- Status Rasio Redaman ( $\beta$ ): Sesuai dengan batasan 0,01 namun beberapa nilai melebihi batas ini

- Status Limit Percepatan ( $a_0/g \times 100\%$ ): Melebihi batas standar 1,5%

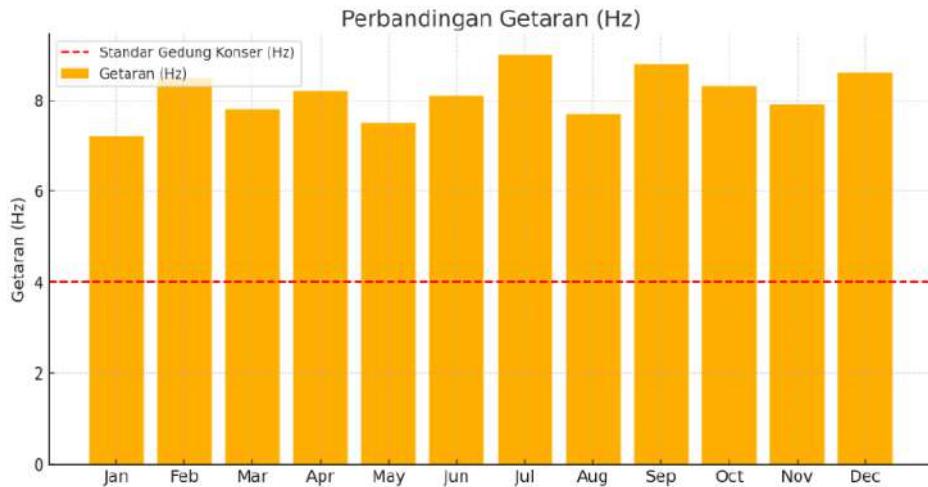
Dalam pembahasan ini, kita akan menganalisis empat parameter penting terkait stabilitas struktur di Gedung Konser Museum Musik Dunia selama konser berlangsung, yaitu Gaya Tetap (Po), frekuensi getaran, rasio redaman ( $\beta$ ), dan limit percepatan ( $a_0/g \times 100\%$ ). Setiap parameter memiliki peran krusial dalam menentukan keamanan dan kenyamanan struktur bangunan. Hasil pengukuran selama 12 kali konser pada tahun 2023 menunjukkan bahwa nilai dari keempat parameter ini cenderung melebihi standar yang telah direkomendasikan. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus untuk memastikan bahwa konser-konser di masa depan dapat berlangsung dengan aman tanpa mengorbankan kenyamanan pengunjung maupun stabilitas bangunan.

Pertama, parameter Gaya Tetap (Po) mencerminkan beban tetap yang diterima oleh struktur balok gantung di gedung konser. Selama 12 kali konser yang diadakan, nilai rata-rata Gaya Tetap tercatat sebesar 0,51 KN, yang melebihi batas standar 0,41 KN. Kelebihan ini mengindikasikan bahwa beban yang ditanggung oleh balok gantung cukup besar dan dapat menyebabkan tekanan berlebih pada struktur, terutama ketika kapasitas gedung penuh. Kondisi ini dapat disebabkan oleh kehadiran jumlah penonton yang besar serta penggunaan alat-alat tambahan seperti peralatan musik dan sistem pencahayaan. Jika dibiarkan tanpa adanya penyesuaian atau penguatan struktur, kondisi ini dapat memicu kerusakan struktural yang berpotensi membahayakan pengunjung dan meningkatkan risiko keruntuhan struktural.



**Gambar 4. 3 Data Gaya Tetap (Po)**

Kedua, frekuensi getaran rata-rata selama konser berkisar di angka 8,0 Hz, jauh di atas standar kenyamanan yang direkomendasikan yaitu 4 Hz. Frekuensi getaran yang lebih tinggi dari batas standar dapat menyebabkan ketidaknyamanan bagi pengunjung karena tubuh manusia memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap getaran dalam frekuensi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa intensitas aktivitas yang tinggi dalam gedung konser, terutama saat acara penuh, menciptakan resonansi yang menyebabkan getaran lebih kuat pada balok gantung. Dampak ini tidak hanya mengganggu kenyamanan pengunjung, tetapi juga berpotensi mengganggu struktur keseluruhan gedung, karena resonansi dapat memperkuat efek getaran dan menyebabkan kerusakan lebih cepat pada elemen-elemen struktural.



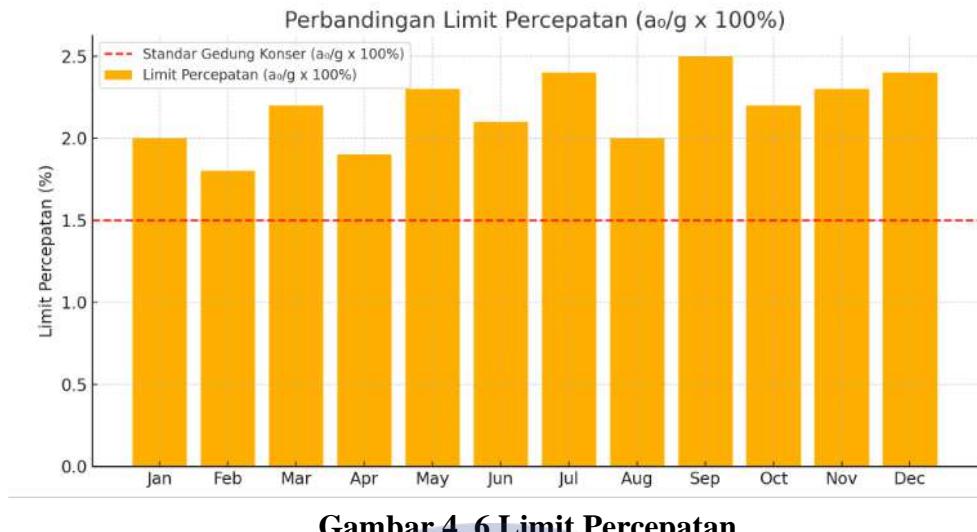
Gambar 4. 4 Frekuensi Getaran (Hz)

Ketiga, rasio redaman ( $\beta$ ) juga menunjukkan hasil yang cukup bervariasi, dengan nilai rata-rata sebesar 0,013 yang beberapa kali melebihi batas standar 0,01. Redaman merupakan kemampuan struktur untuk menyerap energi getaran dan mengurangi efeknya. Nilai redaman yang berada di atas batas standar dapat menunjukkan bahwa struktur gedung memiliki kapasitas untuk meredam getaran yang lebih tinggi, namun hal ini juga mengindikasikan bahwa energi getaran yang diterima sangat besar sehingga struktur harus bekerja ekstra untuk menyerapnya. Kinerja redaman yang melebihi batas standar menunjukkan bahwa gedung konser ini tidak cukup ideal untuk menangani getaran tinggi secara terus-menerus, dan pada akhirnya, dapat mengurangi umur pakai struktur jika tidak dilakukan penguatan tambahan pada komponen redaman.



**Gambar 4. 5 Rasio Redaman ( $\beta$ )**

Terakhir, parameter limit percepatan ( $a_0/g \times 100\%$ ) rata-rata tercatat pada angka 2,2%, yang jauh di atas batas kenyamanan sebesar 1,5%. Limit percepatan ini merupakan indikator seberapa kuat pengunjung merasakan percepatan akibat getaran di lantai gedung. Angka yang melebihi batas ini mengindikasikan bahwa percepatan akibat getaran terlalu tinggi untuk kenyamanan manusia. Pengunjung mungkin merasakan ketidakstabilan atau ketidaknyamanan yang dapat mengurangi pengalaman mereka selama berada di gedung. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus karena getaran yang terlalu kuat dalam durasi panjang dapat menyebabkan pengunjung merasa tidak nyaman atau bahkan pusing. Untuk mengatasi masalah ini, dapat dipertimbangkan penerapan metode penguatan struktur, seperti penambahan peredam getaran atau pengaturan kapasitas gedung saat konser, guna menjaga kenyamanan dan keamanan selama acara berlangsung.

**Gambar 4.6 Limit Percepatan**

#### 4.1.1.4 Pendokumentasi Riwayat Perawatan dan Pemeliharaan Gedung

Data lapangan juga mencakup riwayat pemeliharaan struktur gedung, khususnya balok gantung. Informasi ini meliputi tindakan perawatan sebelumnya, catatan inspeksi rutin, serta perbaikan yang pernah dilakukan. Pendokumentasi ini penting untuk melihat jika ada pola masalah struktural yang berulang dan untuk memastikan apakah prosedur pemeliharaan yang telah dilakukan sesuai dengan standar dan kebutuhan gedung konser.

**Tabel 4.4 Pendokumentasi Riwayat Perawatan dan Pemeliharaan Gedung Konser Museum Musik Dunia di Kota Batu**

No.	Tanggal	Jenis Perawatan/Perbaikan	Tindakan yang Dilakukan	Pihak yang Melakukan	Standar yang Diterapkan	Masalah yang Ditemukan	Status Penyelesaian
1	15 Januari 2023	Inspeksi Rutin	Pemeriksaan visual, pengecekan rutin, pembersihan	Tim Inspeksi Gedung	SNI 2847:2013, SNI 03-6722	Getaran berlebihan terdeteksi pada balok	Selesai
2	10 Maret 2023	Inspeksi Rutin	Pemeriksaan visual, pengecekan rutin, pengujian getaran	Tim Inspeksi Gedung	SNI 03-1747:2015, SNI 03-6722	Getaran berlebihan terus berlanjut	Selesai
3	20 Mei 2023	Pengujian Getaran	Pengujian getaran, analisis getaran lebih	Tim Teknik Forensik	SNI 03-3452:1994	Getaran berlebihan terdeteksi jelas pada	Selesai

No.	Tanggal	Jenis Perawatan/Perbaikan	Tindakan yang Dilakukan	Pihak yang Melakukan	Standar yang Diterapkan	Masalah yang Ditemukan	Status Penyelesaian
			lanjut			struktur utama	
4	12 Juli 2023	Pengecekan Rutin & Pembersihan	Pembersihan, pemeriksaan visual, pengecekan kondisi material	Tim Pemeliharaan Gedung	SNI 03-6822-2002	Masih terdeteksi getaran berlebihan	Selesai
5	25 September 2023	Inspeksi Rutin	Pemeriksaan visual, pengecekan rutin, pengujian getaran	Tim Inspeksi Gedung	SNI 2847:2013, SNI 03-6722	Getaran berlebihan masih ada	Selesai
6	5 Desember 2023	Perbaikan & Penguatan Struktur	Penguatan balok, penambahan elemen penguat, pengujian getaran	Tim Teknik Forensik & Pemeliharaan	SNI 03-1747:2015, SNI 03-3452	Getaran berlebihan berkangur signifikan	Selesai

Pada tahap investigasi forensic engineering, pendokumentasian riwayat perawatan dan pemeliharaan gedung sangat penting untuk memahami kondisi struktural dan material bangunan, serta mengidentifikasi masalah yang terjadi. Gedung Konser Museum Musik Dunia di Kota Batu, yang memiliki balok gantung sebagai elemen utama dalam struktur, memerlukan pemeliharaan rutin untuk memastikan kestabilan dan keamanan bangunan. Tabel berikut merangkum hasil pemeriksaan, perawatan, dan tindakan yang telah dilakukan terhadap balok gantung selama tahun 2023, dengan fokus utama pada identifikasi masalah getaran berlebihan yang ditemukan selama periode tersebut.

Tabel pendokumentasian riwayat perawatan dan pemeliharaan gedung ini menunjukkan bahwa dalam tahun 2023, terdapat enam kali pemeriksaan rutin yang dilakukan untuk memantau kondisi balok gantung di Gedung Konser Museum Musik Dunia. Pemeriksaan rutin tersebut melibatkan berbagai tindakan teknis,

seperti pemeriksaan visual, pengecekan rutin, pembersihan debu dan kotoran, serta pengujian getaran yang bertujuan untuk mendeteksi masalah struktural yang lebih dalam. Tim yang terlibat dalam setiap pemeriksaan terdiri dari inspektor gedung, tim teknik forensik, dan tim pemeliharaan gedung yang masing-masing memiliki tanggung jawab untuk melaksanakan prosedur yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, seperti SNI yang relevan dengan struktur bangunan dan material yang digunakan. Hasil dari pemeriksaan ini memberikan gambaran yang jelas tentang kondisi fisik balok gantung dan potensi masalah yang dapat mempengaruhi kestabilan struktur gedung.

Dari hasil pemeriksaan yang tercatat dalam tabel, dapat dilihat bahwa masalah getaran berlebihan menjadi masalah utama yang ditemukan pada hampir semua pemeriksaan. Sejak pemeriksaan pertama pada Januari 2023, getaran berlebihan sudah terdeteksi pada balok gantung, dan meskipun berbagai tindakan perawatan seperti pembersihan dan pengujian getaran rutin telah dilakukan, masalah ini terus berlanjut hingga pemeriksaan terakhir pada Desember 2023. Untuk mengatasi masalah ini, tim teknik forensik akhirnya melakukan penguatan struktur dengan menambahkan elemen penguat pada balok gantung, yang terbukti mampu mengurangi getaran berlebihan secara signifikan. Perawatan dan perbaikan yang dilakukan sesuai dengan standar SNI, yang memastikan bahwa setiap tindakan yang diambil berlandaskan pada prosedur yang teruji dan relevan dengan kebutuhan teknis struktur gedung konser. Dengan demikian, pendokumentasian yang teliti dan perawatan yang tepat menjadi langkah penting dalam menjaga keselamatan dan keberlanjutan fungsi gedung tersebut.

## 4.2 Penilaian Kerusakan

### 4.2.1 Analisis Penyebab Getaran

Fenomena getaran yang terdeteksi pada balok gantung di gedung konser Museum Musik Dunia di Kota Batu memerlukan analisis yang menyeluruh untuk memahami sumber dan penyebab utamanya. Berdasarkan hasil pengamatan teknis dan pengukuran selama konser berlangsung, terdapat beberapa faktor signifikan yang berkontribusi terhadap timbulnya getaran tersebut. Faktor-faktor ini meliputi perubahan beban yang tidak terduga, resonansi yang dipicu oleh aktivitas dalam gedung, desain struktural balok gantung itu sendiri, serta pengaruh dari faktor eksternal seperti lalu lintas di sekitar gedung. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana masing-masing faktor tersebut berdampak terhadap stabilitas struktur dan kenyamanan pengunjung.

**Tabel 4. 5 Hasil Analisis Penyebab Getaran Gedung Konser Museum Musik Dunia di Kota Batu**

Faktor Penyebab	Deskripsi	Dampak Utama
Perubahan Beban	Fluktuasi jumlah pengunjung, penambahan peralatan musik, dan penggunaan sistem pencahayaan menyebabkan peningkatan beban pada balok gantung.	Meningkatkan tekanan pada struktur balok, dapat memicu kerusakan material.
Resonansi Struktural	Aktivitas dalam gedung, seperti konser, dapat menghasilkan resonansi yang memperkuat getaran alami struktur.	Resonansi memperkuat getaran, mengganggu kenyamanan dan meningkatkan risiko struktural.
Desain Balok Gantung	Balok dirancang untuk estetika dan fleksibilitas, namun desain ini membuatnya lebih rentan terhadap getaran.	Kerentanan terhadap getaran menyebabkan kelelahan material lebih cepat.
Faktor Eksternal	Aktivitas di sekitar gedung seperti lalu lintas juga berpotensi memengaruhi getaran.	Sumber getaran eksternal menambah frekuensi dan amplitudo getaran dalam struktur.

Dari analisis yang dilakukan, jelas bahwa perubahan beban akibat fluktuasi

jumlah pengunjung dan penggunaan peralatan tambahan memainkan peran besar dalam memicu getaran yang tidak diinginkan. Faktor ini tidak hanya meningkatkan tekanan pada balok gantung, tetapi juga memperbesar kemungkinan terjadinya kelelahan material jika beban terus melebihi kapasitas yang dirancang. Selain itu, resonansi struktural yang dipicu oleh aktivitas konser memperkuat efek getaran, yang berdampak langsung pada kenyamanan pengunjung dan stabilitas struktur secara keseluruhan. Resonansi ini menjadi lebih parah karena balok gantung memiliki desain fleksibel yang lebih rentan terhadap amplifikasi getaran.

Faktor eksternal seperti lalu lintas dan aktivitas di sekitar gedung turut berkontribusi dengan menambah frekuensi dan amplitudo getaran, membuat tantangan menjadi lebih kompleks. Kombinasi semua faktor ini menegaskan bahwa penyelesaian masalah getaran tidak hanya memerlukan pendekatan tunggal, tetapi juga upaya terpadu untuk memperkuat struktur, meredam resonansi, dan memitigasi pengaruh eksternal. Hasil ini menjadi dasar penting untuk merancang strategi mitigasi getaran yang tepat, guna menjaga keamanan struktur sekaligus kenyamanan pengunjung di masa mendatang.

#### **4.2.2 Identifikasi Potensi Kerusakan**

Getaran yang melebihi standar pada struktur gedung konser Museum Musik Dunia di Kota Batu menimbulkan kekhawatiran serius terhadap keamanan dan stabilitas bangunan. Meskipun gedung dirancang untuk memenuhi kebutuhan akustik dan kenyamanan pengunjung, intensitas getaran yang tinggi akibat fluktuasi beban, resonansi, atau faktor eksternal dapat menimbulkan berbagai potensi kerusakan. Potensi ini meliputi kelelahan material, ketidakstabilan struktural,

dampak estetika pada interior, serta pengurangan umur pakai struktur secara keseluruhan. Memahami dampak dari getaran yang melebihi batas standar sangat penting untuk merancang strategi mitigasi yang efektif dan mencegah risiko yang lebih besar di masa mendatang. Tabel berikut merangkum potensi kerusakan serta dampaknya jika getaran pada struktur melampaui batas toleransi yang diperbolehkan.

**Tabel 4. 6 Analisis Potensi Kerusakan**

Potensi Kerusakan	Deskripsi	Dampak Jika Getaran Melebihi Standar
Kelelahan Material	Getaran berkelanjutan dapat menyebabkan kelelahan material pada balok gantung, berisiko menciptakan kerusakan mikro atau retak kecil.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerusakan mikro berkembang menjadi retakan besar.</li> <li>Risiko kegagalan material meningkat.</li> <li>Membutuhkan penguatan atau perbaikan.</li> </ul>
Ketidakstabilan Struktural	Resonansi yang tidak terkontrol dapat mempercepat penurunan kekuatan struktur utama.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformasi permanen pada elemen struktural.</li> <li>Risiko keruntuhan sebagian atau total.</li> <li>Penurunan faktor keamanan struktur.</li> </ul>
Dampak pada Interior Gedung	Getaran dapat memengaruhi estetika dan kenyamanan, misalnya retak pada partisi atau plafon.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keretakan pada plafon dan partisi.</li> <li>Penurunan estetika ruang interior.</li> <li>Potensi kerusakan pada dekorasi atau komponen interior lainnya.</li> </ul>
Pengurangan Umur Pakai Struktur	Energi getaran yang berulang dapat mempercepat degradasi material, menurunkan durabilitas struktur secara keseluruhan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umur pakai struktur berkurang signifikan.</li> <li>Kebutuhan perawatan lebih sering.</li> <li>Biaya operasional gedung meningkat.</li> </ul>

#### **Pembahasan Setelah Tabel:**

Potensi kerusakan yang disebabkan oleh kelelahan material menjadi perhatian utama, karena getaran yang melebihi standar dapat mengakibatkan retakan kecil yang terus berkembang menjadi kerusakan besar pada balok gantung.

Jika tidak ditangani, kelelahan material dapat menyebabkan pelemahan pada struktur utama, meningkatkan risiko kegagalan total material, yang berpotensi membahayakan keselamatan pengunjung. Oleh karena itu, diperlukan inspeksi berkala untuk mendeteksi kerusakan mikro sedini mungkin serta penguatan material menggunakan teknologi yang sesuai.

Ketidakstabilan struktural menjadi masalah yang lebih kompleks karena resonansi yang tidak terkendali dapat memperburuk kondisi struktur. Getaran dengan frekuensi tinggi mampu menyebabkan deformasi permanen, yang tidak hanya menurunkan faktor keamanan bangunan tetapi juga berpotensi memicu keruntuhan. Untuk mengatasi masalah ini, perlu dilakukan analisis frekuensi yang lebih mendalam, serta penambahan elemen redaman atau penguatan struktural untuk mengurangi efek resonansi.

Dampak estetika pada interior gedung juga tidak bisa diabaikan, terutama pada bagian partisi, plafon, atau dekorasi lain yang sensitif terhadap getaran. Retakan kecil pada plafon atau dinding dapat memengaruhi estetika gedung konser, yang merupakan elemen penting dalam pengalaman pengunjung. Selain itu, kerusakan pada elemen interior juga memerlukan biaya perbaikan yang tinggi dan dapat mengganggu operasional gedung. Oleh karena itu, diperlukan penguatan tambahan pada elemen non-struktural untuk mengurangi dampak getaran pada interior.

Pengurangan umur pakai struktur adalah konsekuensi jangka panjang yang paling signifikan dari getaran berlebihan. Energi getaran yang berulang kali menekan struktur dapat mempercepat degradasi material dan menurunkan durabilitas bangunan secara keseluruhan. Akibatnya, kebutuhan perawatan dan

perbaikan menjadi lebih sering, yang pada akhirnya meningkatkan biaya operasional gedung. Strategi mitigasi yang efektif harus mencakup langkah-langkah untuk meminimalkan efek getaran pada material struktural dan memastikan bahwa umur pakai gedung tetap optimal sesuai dengan perancangan awal.

#### **4.2.3 Evaluasi Dampak Terhadap Struktur**

Getaran yang melebihi standar pada struktur gedung konser Museum Musik Dunia memberikan dampak signifikan terhadap kenyamanan pengunjung, stabilitas struktur, serta estetika dan operasional gedung. Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak-dampak utama tersebut secara terstruktur, sehingga dapat menjadi dasar untuk perencanaan mitigasi yang efektif. Tabel berikut merangkum dampak utama getaran terhadap ketiga aspek tersebut.

**Tabel 4. 7 Evaluasi Dampak Getaran pada Struktur**

Aspek Dampak	Deskripsi Dampak	Detail Dampak
Dampak terhadap Pengunjung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menyebabkan ketidaknyamanan.</li> <li>• Berisiko terhadap keselamatan.</li> <li>• Menurunkan reputasi gedung.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Percepatan getaran 2,2% melebihi standar kenyamanan (1,5%).</li> <li>• Potensi cedera jika elemen interior rusak.</li> <li>• Penurunan kepuasan dan kunjungan pengunjung.</li> </ul>
Dampak terhadap Stabilitas Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risiko keretakan pada balok gantung.</li> <li>• Kapasitas redaman tidak mencukupi.</li> <li>• Penurunan faktor keamanan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frekuensi getaran rata-rata 8 Hz (di atas batas 4 Hz).</li> <li>• Kelelahan material akibat redaman rendah (0,013).</li> <li>• Potensi deformasi permanen atau keruntuhan.</li> </ul>
Kerugian Estetika dan Operasional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retak mikro pada elemen interior.</li> <li>• Penurunan kualitas akustik.</li> <li>• Biaya perawatan meningkat.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kerusakan estetika menurunkan daya tarik visual.</li> <li>• Gangguan akustik memengaruhi pengalaman konser.</li> <li>• Peningkatan biaya perbaikan dan potensi operasional</li> </ul>

Aspek Dampak	Deskripsi Dampak	Detail Dampak
		terganggu.

### a. Dampak terhadap Pengunjung

Getaran dengan percepatan rata-rata 2,2% yang melampaui batas standar kenyamanan sebesar 1,5% memiliki konsekuensi serius terhadap pengalaman pengunjung. Tingkat percepatan ini menyebabkan pengunjung merasa tidak nyaman, terutama saat berada dalam kondisi diam atau fokus menikmati konser. Perasaan tidak stabil akibat getaran dapat menimbulkan gangguan fisik seperti pusing atau mual, sehingga mengurangi kenikmatan pengunjung terhadap acara. Selain itu, ketidaknyamanan yang terus-menerus dapat merusak reputasi gedung konser sebagai tempat berkualitas untuk pertunjukan musik.

Ketidaknyamanan yang dirasakan juga berpotensi memengaruhi kehadiran pengunjung dalam jangka panjang. Pengalaman negatif dari satu konser dapat menyebabkan pengunjung enggan untuk kembali atau merekomendasikan gedung kepada orang lain. Hal ini berdampak langsung pada jumlah pengunjung dan pendapatan operasional gedung. Dalam konteks ini, memastikan kenyamanan pengunjung adalah prioritas utama, mengingat mereka adalah konsumen utama yang menentukan keberlanjutan operasional gedung konser.

Dampak terburuk dari getaran yang tidak terkendali adalah risiko keselamatan pengunjung. Jika getaran terus meningkat tanpa ada upaya mitigasi, pengunjung tidak hanya merasa tidak nyaman tetapi juga berpotensi mengalami cedera akibat pergerakan struktur yang berlebihan atau elemen interior yang rusak. Oleh karena itu, langkah mitigasi seperti pengurangan percepatan getaran dan pemasangan sistem peredam perlu segera diimplementasikan untuk menjaga

kenyamanan dan keselamatan pengunjung.

### **b. Dampak terhadap Stabilitas Struktur**

Stabilitas struktur adalah aspek fundamental yang terpengaruh oleh getaran yang melebihi standar. Balok gantung yang menerima gaya tetap tinggi dan frekuensi getaran rata-rata sebesar 8 Hz (melebihi batas 4 Hz) berisiko mengalami keretakan struktural. Jika tidak segera diperbaiki, retakan ini dapat berkembang menjadi kerusakan serius yang mengancam integritas struktur. Hal ini sangat berbahaya, mengingat balok gantung berperan sebagai elemen utama dalam mendukung stabilitas keseluruhan gedung konser.

Rasio redaman sebesar 0,013 yang lebih tinggi dari standar menunjukkan bahwa struktur gedung memiliki kapasitas redaman yang rendah. Kapasitas ini tidak cukup untuk menyerap energi getaran tinggi secara berkelanjutan, yang mengakibatkan energi tersebut terdistribusi ke elemen-elemen struktural lainnya. Kondisi ini dapat mempercepat kelelahan material pada balok dan elemen struktural lainnya, sehingga meningkatkan risiko kegagalan total struktur dalam jangka panjang.

Dalam jangka pendek, ketidakstabilan struktural dapat memengaruhi fungsi operasional gedung, termasuk pembatasan kapasitas pengunjung atau bahkan penutupan sementara untuk alasan keselamatan. Dalam jangka panjang, tanpa tindakan mitigasi yang tepat, gedung dapat memerlukan perbaikan besar yang mahal atau bahkan berisiko tidak dapat digunakan. Untuk mencegah skenario ini, diperlukan langkah penguatan struktur dan pemasangan sistem redaman tambahan untuk meningkatkan stabilitas secara keseluruhan.

### c. Kerugian Estetika dan Operasional

Getaran yang berlebihan tidak hanya berdampak pada struktur utama tetapi juga pada elemen estetika gedung konser. Retak mikro yang muncul pada plafon, dinding, atau dekorasi interior secara perlahan mengurangi daya tarik estetika gedung. Hal ini menjadi masalah serius dalam konteks gedung konser, di mana estetika dan keindahan ruang menjadi bagian integral dari pengalaman pengunjung. Kerusakan pada elemen estetika juga menciptakan kesan bahwa gedung tidak terawat, yang dapat menurunkan citra gedung secara keseluruhan.

Kerusakan estetika yang terus terjadi dapat meningkatkan biaya operasional gedung akibat kebutuhan perbaikan dan perawatan tambahan. Elemen interior yang rusak sering kali memerlukan perbaikan khusus, yang melibatkan biaya material dan tenaga kerja. Selain itu, perbaikan yang dilakukan pada elemen estetika mungkin memerlukan penghentian operasional sementara, yang akan mengganggu jadwal konser dan berdampak pada pendapatan gedung.

Selain estetika, kualitas akustik gedung juga terpengaruh oleh getaran. Getaran yang berlebihan dapat mengganggu distribusi suara, sehingga memengaruhi pengalaman mendengar pengunjung selama konser berlangsung. Akustik yang terganggu dapat menyebabkan ketidakpuasan pengunjung terhadap kualitas pertunjukan, yang berdampak langsung pada reputasi gedung sebagai tempat konser. Dengan demikian, langkah mitigasi seperti penggunaan bahan peredam suara dan penguatan elemen estetika diperlukan untuk memastikan pengalaman akustik dan visual yang optimal bagi pengunjung.

### **4.3 Penyusunan Rekomendasi**

Untuk mengatasi getaran yang melebihi standar pada struktur balok gantung di gedung konser Museum Musik Dunia, diperlukan rekomendasi perbaikan yang komprehensif dan rencana pemeliharaan jangka panjang. Langkah-langkah ini bertujuan untuk memastikan stabilitas struktur, kenyamanan pengunjung, serta kelangsungan operasional gedung. Rekomendasi utama melibatkan penambahan plat baja penyangga dan sabuk baja sebagai solusi teknis yang efektif.

#### **4.3.1 Rekomendasi Perbaikan dan Penanganan**

##### **4.3.1.1 Penambahan Plat Baja Penyangga**

###### **a. Analisis Tujuan**

Penambahan plat baja penyangga dalam struktur balok gantung pada bangunan konser bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas struktural melalui distribusi beban yang lebih merata. Dalam struktur yang menerima beban dinamis secara konstan, seperti Museum Musik Dunia di Kota Batu, tantangan utama adalah mempertahankan ketahanan balok gantung yang menahan getaran dari aktivitas akustik yang tinggi serta pergerakan banyak orang. Suara berfrekuensi tinggi yang dihasilkan selama pertunjukan musik, ditambah dengan aktivitas pengunjung, menimbulkan getaran yang signifikan. Beban ini menciptakan tekanan pada balok, yang jika tidak ditangani dengan baik, dapat menyebabkan keretakan material atau bahkan kegagalan struktural pada balok gantung. Plat baja penyangga yang dipasang pada titik-titik kritis ini akan bekerja untuk meredam beban yang berlebihan pada elemen penopang, menjaga integritas struktural bangunan dari kelelahan material.

Selain itu, pemasangan plat baja penyangga bertujuan untuk mengurangi

konsentrasi tegangan yang biasanya terpusat pada bagian tertentu dari balok gantung. Dengan mendistribusikan beban pada area yang lebih luas, risiko akumulasi tegangan yang dapat memicu retak dan deformasi menjadi lebih kecil. Plat baja ini membantu memperpanjang masa pakai balok gantung, yang berarti struktur akan lebih tahan lama dan mampu menopang beban lebih besar dalam jangka panjang. Hal ini juga meningkatkan tingkat keamanan gedung secara keseluruhan, khususnya untuk lingkungan yang dipenuhi oleh pengunjung, yang memperbesar potensi bahaya apabila terdapat kegagalan struktural. Dengan demikian, penambahan plat baja penyanga tidak hanya memperkuat elemen struktural tetapi juga berfungsi sebagai langkah preventif untuk mencegah kerusakan dan memperpanjang usia bangunan, yang sangat penting untuk kelangsungan operasional gedung konser yang intensif dalam penggunaan.

#### b. Analisis Data Teknis

Sebagai langkah penanganan untuk memperkuat struktur balok gantung dalam gedung konser, penggunaan plat baja WF (Wide Flange) menjadi solusi strategis yang didukung oleh data teknis yang terperinci. Plat baja WF dikenal karena kapasitas penopang bebananya yang tinggi serta bentuknya yang kokoh, sehingga mampu menahan beban dinamis akibat getaran dan aktivitas di dalam bangunan. Material baja jenis WF menawarkan rigiditas yang optimal dan sifat struktural yang mendukung kestabilan balok gantung. Baja dengan grade ASTM A992 atau ASTM A572 Grade 50 dipilih karena memenuhi standar kekuatan dan elastisitas yang diperlukan dalam lingkungan yang rentan terhadap frekuensi getaran tinggi, memastikan keamanan dan ketahanan struktur dalam jangka panjang. Berikut adalah tabel data teknis penggunaan plat baja WF untuk

penambahan plat baja penyangga:

**Tabel 4. 8 Data Teknis Penggunaan Plat Baja WF Untuk Penambahan Plat Baja Penyangga**

Komponen	Spesifikasi
<b>Material Baja</b>	
Jenis Baja	WF (Wide Flange)
Grade Baja	ASTM A992 atau ASTM A572 Grade 50
Kekuatan Tarik	400 - 550 MPa
Modulus Elastisitas	200 GPa
Tegangan Luluh	345 MPa
Kekuatan Lelah	240 MPa
<b>Dimensi Plat Baja WF</b>	
Lebar Sayap	150 - 300 mm
Tinggi Profil	200 - 500 mm
Tebal Sayap	10 - 25 mm
Tebal Badan	6 - 16 mm
<b>Spesifikasi Baut</b>	
Jenis Baut	Baut berdaya tinggi ASTM A325
Diameter Baut	16 - 20 mm
Jumlah Baut	Disesuaikan dengan analisis beban
Kekuatan Tarik Baut	$\geq 800$ MPa
Kekuatan Torsi	160 - 200 Nm
<b>Teknik Pengelasan</b>	
Proses Pengelasan	SMAW (Shielded Metal Arc Welding) atau FCAW (Flux Cored Arc Welding)
Material Kawat Las	AWS E7018 (SMAW) atau AWS E70T-1 (FCAW)
Kekuatan Tarik Hasil Las	$\geq 490$ MPa
Ketebalan Las	6 - 10 mm

Tabel data teknis menunjukkan rincian penting terkait pemilihan material dan metode pemasangan plat baja WF untuk memperkuat balok gantung. Material baja yang digunakan, yaitu jenis WF (Wide Flange), memiliki keunggulan dari segi kekuatan dan elastisitas. Baja WF dengan grade ASTM A992 atau ASTM A572 Grade 50 dipilih karena memiliki kekuatan tarik yang tinggi, yaitu antara 400 hingga 550 MPa, dan modulus elastisitas sebesar 200 GPa, yang memberikan daya tahan terhadap deformasi akibat beban dinamis.

Tegangan luluh sebesar 345 MPa dan kekuatan lelah sebesar 240 MPa pada baja WF ini juga penting dalam mengurangi risiko retak akibat beban berulang yang berasal dari getaran di gedung konser. Dengan spesifikasi tersebut, baja WF mampu mendistribusikan beban secara merata, menjaga kestabilan struktur, dan mencegah terjadinya konsentrasi tegangan berlebih pada titik-titik tertentu.

Dimensi plat baja WF serta spesifikasi baut dan teknik pengelasan juga memegang peran krusial dalam keberhasilan pemasangan. Lebar sayap, tinggi profil, tebal sayap, dan tebal badan pada plat baja WF disesuaikan untuk mengakomodasi beban besar serta memberikan penopang yang optimal terhadap struktur balok. Selain itu, penggunaan baut berdaya tinggi ASTM A325 dengan diameter 16-20 mm dan kekuatan tarik di atas 800 MPa memastikan sambungan yang kuat antara plat baja dan balok gantung. Pengelasan menggunakan metode SMAW atau FCAW dengan material kawat las sesuai standar AWS E7018 dan E70T-1 menghasilkan koneksi yang tahan terhadap getaran berkepanjangan, mengurangi kemungkinan pelonggaran sambungan. Dengan ketebalan las yang cukup, sekitar 6-10 mm, sambungan ini diperkuat untuk menahan gaya tarik yang dihasilkan dari beban dinamis. Melalui pendekatan teknis yang tepat ini, pemasangan plat baja WF tidak hanya memperkuat struktur tetapi juga meningkatkan keamanan gedung dari risiko kegagalan struktural.

**c. Teknis Pelaksanaan Plat Baja WF Untuk Penambahan Plat Baja Penyangga**

**1) Pemasangan Plat Baja pada Titik Kritis Balok Gantung**

Pemasangan plat baja WF dilakukan secara strategis pada titik-titik kritis

balok gantung yang sebelumnya telah dianalisis untuk mengetahui area dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Pemasangan ini bertujuan untuk memperkuat struktur di bagian yang paling rentan terhadap kegagalan akibat beban dinamis. Titik-titik kritis ini dipilih untuk memastikan plat WF dapat meredam getaran dan mendistribusikan beban secara lebih merata.



**Gambar 4. 7 Pemasangan Plat Baja Wf Pada Titik-Titik Kritis  
PRO PATRIA**

## **2) Penggunaan Baut Berdaya Tinggi dan Teknik Pengelasan**

Plat baja WF dipasang menggunakan baut berdaya tinggi atau dengan teknik pengelasan yang kuat, seperti metode SMAW (Shielded Metal Arc Welding) atau FCAW (Flux Cored Arc Welding). Kedua teknik ini memastikan bahwa koneksi antara plat baja dan balok gantung tidak mudah terlepas atau mengalami pelonggaran akibat getaran. Baut berdaya tinggi, seperti ASTM A325, memiliki kekuatan tarik tinggi dan tahan terhadap pelonggaran, sedangkan teknik pengelasan menghasilkan sambungan permanen yang tahan terhadap beban berulang. Koneksi yang kokoh ini sangat penting untuk memastikan daya tahan sambungan

jangka panjang.



Gambar 4. 8 Penggunaan Baut Berdaya Tinggi dan Teknik Pengelasan

### 3) Material Baja Berkualitas Tinggi Sesuai Standar Struktural

Plat baja yang digunakan harus memenuhi standar keamanan struktural, seperti baja karbon tinggi atau baja paduan. Material dengan spesifikasi ini memiliki daya dukung tinggi dan sifat mekanik yang memadai untuk menahan beban dinamis yang konstan, sehingga memastikan kekuatan dan ketahanan struktur balok. Penggunaan material baja berkualitas tinggi ini akan memberikan performa struktural yang stabil dan mencegah kegagalan material akibat tegangan berlebih.



**Gambar 4. 9 Penggunaan Material Baja Berkualitas Tinggi**

**d. Manfaat Plat Baja WF Untuk Penambahan Plat Baja Penyangga**

**1) Perlindungan Korosi**

Untuk meningkatkan ketahanan jangka panjang, plat baja WF diberi lapisan pelindung anti karat, baik melalui cat anti karat maupun galvanisasi (pelapisan seng). Perlindungan ini sangat penting karena plat baja yang terpapar kelembaban tinggi atau lingkungan korosif akan rentan mengalami kerusakan material, yang pada akhirnya dapat mengurangi kekuatan sambungan. Lapisan anti karat ini membantu mempertahankan kondisi fisik dan kualitas plat WF, mengurangi frekuensi perawatan, serta menekan biaya perawatan dalam jangka

panjang.

## 2) Mengurangi Risiko Keretakan Akibat Getaran

Penambahan plat baja WF memberikan rigiditas yang lebih besar pada balok gantung, sehingga membantu mengurangi risiko keretakan material yang mungkin terjadi akibat getaran yang terus-menerus. Kekuatan plat WF mampu meredam getaran dan meminimalkan dampak dari beban fluktuatif, sehingga struktur balok lebih stabil dan tidak mudah retak.

## 3) Meningkatkan Daya Dukung Balok Terhadap Fluktuasi Beban

Plat baja WF memiliki profil lebar yang efektif dalam mendistribusikan beban dengan merata, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada titik-titik tertentu balok gantung. Distribusi beban yang lebih baik ini membantu struktur untuk menahan fluktuasi beban yang terus-menerus, memperpanjang umur pakai balok gantung, serta meningkatkan keseluruhan kapasitas struktural gedung.

## 4) Rigiditas Tinggi yang Meningkatkan Stabilitas Struktur

Rigiditas yang dimiliki oleh plat baja WF membuatnya mampu menahan deformasi atau perubahan bentuk akibat beban dinamis. Hal ini memastikan bahwa balok gantung tetap dalam kondisi stabil meskipun terkena beban berat dan getaran secara berkala, sehingga memberikan perlindungan ekstra bagi struktur gedung konser yang rentan terhadap dampak aktivitas akustik dan pergerakan pengunjung.

## 5) Kemudahan dan Fleksibilitas dalam Proses Pemasangan

Plat baja WF memiliki desain yang mudah diaplikasikan menggunakan

teknik pengelasan atau baut berdaya tinggi. Selain itu, bentuk profilnya memungkinkan fleksibilitas dalam penyesuaian posisi pemasangan, sehingga dapat dipasang dengan efisien pada area yang sulit dijangkau tanpa perlu mengganggu operasional gedung. Fleksibilitas ini membuat proses pemasangan lebih cepat dan efektif, serta memberikan nilai tambah dari segi waktu dan biaya konstruksi.

#### **4.3.1.2 Penambahan Plat WF Baja Sebagai Sabuk**

##### **a. Analisis Tujuan Plat WF Baja Sebagai Sabuk**

Penambahan plat WF (Wide Flange) baja sebagai sabuk pada balok gantung bertujuan untuk meningkatkan kekakuan struktural dan menambah stabilitas lateral pada balok tersebut. Dengan adanya plat baja yang terpasang mengelilingi balok, fleksibilitas balok akan berkurang karena sabuk baja menahan gerakan lateral yang menyebabkan deformasi atau getaran berlebihan. Hal ini sangat penting dalam bangunan yang memiliki elemen struktur gantung yang rentan terhadap pergerakan atau gaya lateral. Sabuk baja berfungsi seperti penopang tambahan yang membantu mengurangi lengkungan dan defleksi, memastikan struktur tetap kokoh bahkan saat menghadapi beban dinamis, seperti angin atau gempa bumi.

Selain itu, penambahan plat baja sebagai sabuk pada balok gantung juga diharapkan dapat meningkatkan kapasitas redaman struktur. Dengan meningkatnya kapasitas redaman, amplitudo getaran akan berkurang sehingga bangunan menjadi lebih stabil dan nyaman untuk penggunanya, terutama pada bangunan yang sering mengalami getaran karena aktivitas sehari-hari atau

peralatan bergetar di sekitarnya. Dengan menurunkan tingkat getaran, potensi kelelahan material juga berkurang, sehingga masa pakai struktur menjadi lebih panjang. Pada akhirnya, tujuan utama dari pemasangan sabuk baja ini adalah untuk menjaga integritas struktural, meminimalkan risiko kerusakan, dan memberikan nilai tambah pada daya tahan bangunan secara keseluruhan.

### b. Analisis Data Teknis Plat WF Baja Sebagai Sabuk

Untuk meningkatkan rigiditas dan mengurangi fleksibilitas pada balok gantung di struktur bangunan, penambahan plat WF baja sebagai sabuk menjadi salah satu solusi efektif. Pemasangan sabuk baja ini dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai parameter teknis, seperti jenis material baja, dimensi plat, metode pemasangan, serta kapasitas redaman getaran yang dihasilkan setelah penambahan sabuk. Berikut adalah tabel yang merangkum data teknis terkait penerapan plat WF baja sebagai sabuk untuk memperkuat balok gantung:

**Tabel 2. 2 Analisis Data Teknis**

Parameter	Deskripsi	Spesifikasi	Keterangan
Jenis Plat WF Baja	Material baja tipe WF (Wide Flange)	ASTM A36, A992	Baja WF dipilih karena kekuatan tarik dan daya tahan terhadap deformasi
Dimensi Plat Baja	Ketebalan dan lebar plat baja yang digunakan	Tebal: 10-15 mm, Lebar: 200 mm	Menyesuaikan kebutuhan rigiditas serta fleksibilitas pemasangan pada balok gantung
Sistem Pemasangan	Metode pemasangan sabuk baja pada balok	Penjepit atau Pengelasan	Menyesuaikan dengan panjang dan posisi balok, serta memastikan kemudahan dan keamanan pemasangan
Kekuatan Tarik Baja	Kekuatan tarik material baja yang digunakan	$\geq 400 \text{ MPa}$	Kekuatan tarik tinggi untuk menahan gaya lateral dan mengurangi deformasi pada balok
Berat Plat Baja per Meter	Berat plat baja per satuan panjang	$\pm 30 \text{ kg/m}$	Menambah beban minimal namun memberikan efek signifikan pada peningkatan rigiditas

Parameter	Deskripsi	Spesifikasi	Keterangan
Desain Modular	Konfigurasi plat baja yang dapat dipasang secara modular	Ya	Memudahkan pemasangan dan perawatan tanpa memerlukan penyesuaian besar pada struktur gedung
Kapasitas Redaman Getaran	Kemampuan struktur untuk meredam getaran setelah penambahan sabuk baja	Peningkatan 20-30%	Mengurangi amplitudo getaran pada struktur, memberikan stabilitas lebih tinggi
Umur Pakai Struktur	Estimasi peningkatan umur pakai setelah penambahan sabuk baja	+10-15 tahun	Pemasangan plat baja mengurangi kelelahan material akibat getaran, sehingga memperpanjang usia balok
Kebutuhan Perawatan	Frekuensi dan kebutuhan perawatan sabuk baja setelah pemasangan	Minimal	Plat baja tidak memerlukan banyak perawatan, hanya pengecekan berkala pada penjepit atau pengelasan

Berdasarkan data teknis di atas, penggunaan plat WF baja sebagai sabuk bertujuan untuk memaksimalkan kekuatan tarik dankekakuan struktural balok gantung, terutama pada bangunan yang rentan terhadap getaran atau gaya lateral. Jenis baja yang digunakan, seperti ASTM A36 atau A992, memiliki karakteristik kekuatan tarik yang tinggi, sehingga sangat ideal untuk menangani tekanan struktural yang dihadapi balok gantung. Ketebalan plat baja antara 10 hingga 15 mm dan lebar sekitar 200 mm juga sudah dipertimbangkan untuk memastikan penambahan beban tetap minimal namun memberikan efek penguatan yang signifikan pada balok. Dengan konfigurasi modular, pemasangan plat dapat dilakukan secara mudah dan tidak mengganggu operasional bangunan, menjadikannya solusi yang efisien untuk penguatan struktur tanpa perlu melakukan perubahan besar pada desain asli bangunan.

Penerapan sabuk baja ini juga secara langsung meningkatkan kapasitas redaman getaran balok gantung, yang terbukti mampu mengurangi amplitudo

getaran hingga 20-30%. Hal ini penting untuk menjaga kenyamanan dan stabilitas bangunan, khususnya bagi struktur yang terpapar aktivitas dengan potensi getaran berulang atau beban dinamis. Dengan demikian, penggunaan sabuk baja tidak hanya membantu mempertahankan stabilitas struktural tetapi juga memperpanjang umur pakai struktur balok, mengurangi kelelahan material, dan meminimalkan frekuensi perawatan. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan plat WF baja sebagai sabuk adalah investasi jangka panjang yang efektif untuk meningkatkan ketahanan dan kualitas struktur bangunan secara keseluruhan.

### c. Teknis Pelaksanaan Plat WF Baja Sebagai Sabuk

#### 1) Teknik Pelaksanaan Sabuk Baja sebagai Penguatan Lateral

Pemasangan sabuk baja yang melingkari balok bertujuan untuk memberikan penguatan lateral yang signifikan pada struktur balok gantung. Dengan mengelilingi balok, sabuk baja dapat menahan tekanan lateral yang sering kali menyebabkan lengkungan atau defleksi pada balok, terutama di bangunan dengan elemen gantung yang rentan terhadap gaya-gaya lateral. Desain melingkar ini memungkinkan sabuk baja berfungsi sebagai penopang tambahan, yang membantu mendistribusikan beban dan mengurangi potensi deformasi akibat gaya-gaya eksternal. Metode ini juga memberikan manfaat dalam menahan gerakan dari berbagai arah, menjadikannya pilihan penguatan yang fleksibel dan serbaguna. Penguatan lateral yang dihasilkan dari pemasangan sabuk baja akan meningkatkan rigiditas struktural balok, sehingga bangunan memiliki stabilitas lebih tinggi dan mampu menahan tekanan tambahan.

Teknik pemasangan sabuk baja dengan melingkari balok juga penting untuk memastikan bahwa setiap sisi balok mendapatkan perlindungan dari deformasi atau kerusakan struktural. Dalam hal ini, penggunaan baja WF yang dipasang mengelilingi balok tidak hanya menambah kekuatan pada sisi atas atau bawah balok, tetapi juga pada bagian samping yang biasanya rentan terhadap tekanan horizontal. Dengan melibatkan keseluruhan struktur balok, pemasangan sabuk baja ini menjamin peningkatan kekuatan secara merata, sehingga struktur menjadi lebih tahan lama dan andal dalam jangka panjang. Pemasangan melingkar ini juga memungkinkan perlindungan lebih baik dari getaran atau dampak beban yang tidak terduga, sehingga mengurangi risiko kerusakan dini pada struktur balok gantung.



**Gambar 4. 10 Sabuk Baja sebagai Penguat Lateral**

## 2) Metode Pengikatan dengan Penjepit atau Pengelasan

Pengikatan plat baja pada balok melalui sistem penjepit atau pengelasan memberikan fleksibilitas dalam metode pemasangan sesuai dengan kebutuhan struktur. Metode penjepit lebih praktis karena tidak memerlukan proses pemanasan, sehingga dapat dilakukan tanpa mempengaruhi material lain atau mengubah sifat struktural dari balok utama. Penjepit dapat memberikan tekanan yang cukup pada plat baja sehingga sambungan tetap kuat dan aman, serta memungkinkan perawatan atau penggantian yang lebih mudah jika dibutuhkan. Metode ini cocok digunakan pada area yang memerlukan penyesuaian cepat dan tidak dapat menggunakan teknik permanen. Penjepit juga ideal untuk struktur yang memerlukan fleksibilitas lebih tinggi atau pada bagian yang mungkin perlu dilepas kembali untuk pemeliharaan secara berkala.

Di sisi lain, metode pengelasan memberikan ikatan yang lebih permanen, sehingga lebih tahan terhadap beban besar atau getaran yang konstan. Pengelasan menempelkan plat baja secara langsung ke balok, memastikan sambungan yang lebih kuat dibandingkan metode penjepit. Hal ini menjadikan pengelasan sebagai metode yang cocok untuk area dengan tekanan tinggi atau di mana struktur membutuhkan kekakuan maksimum. Namun, metode ini memerlukan peralatan khusus dan keterampilan tinggi, serta harus mempertimbangkan dampak panas pada material sekitarnya. Dengan kedua metode ini, pemasangan dapat disesuaikan dengan kebutuhan struktural dan operasional bangunan, memungkinkan fleksibilitas dalam memilih pendekatan terbaik untuk penguatan balok gantung.



Gambar 4. 11 Pengikatan dengan Penjepit atau Pengelasan

### 3) Desain Modular untuk Memudahkan Pemasangan

Penggunaan desain modular dalam pemasangan sabuk baja bertujuan untuk mempermudah proses instalasi, sekaligus meminimalkan gangguan terhadap operasional bangunan. Desain modular memungkinkan plat baja diproduksi dalam bentuk potongan-potongan yang mudah dirakit, sehingga pemasangannya lebih efisien dan cepat. Teknik ini juga memungkinkan fleksibilitas dalam menyesuaikan ukuran dan bentuk plat baja dengan spesifikasi balok yang ada di lapangan, mengurangi kebutuhan penyesuaian atau pemotongan di lokasi. Selain itu, desain modular memudahkan petugas dalam melakukan perawatan atau penggantian plat

secara bertahap tanpa harus mengganggu keseluruhan struktur. Dengan memanfaatkan desain modular, pelaksanaan proyek dapat berlangsung dengan lebih hemat waktu dan biaya. Keunggulan lain dari desain modular adalah kemampuannya untuk mengurangi dampak pemasangan terhadap aktivitas di sekitar struktur. Dalam gedung yang sudah beroperasi, minimnya gangguan sangat penting agar aktivitas di dalam gedung tetap berjalan tanpa terganggu oleh pemasangan penguatan tambahan. Desain modular yang dapat dipasang secara bertahap atau per bagian ini memberikan kemudahan bagi pekerja dan keamanan bagi pengguna gedung. Fleksibilitas ini membuat modular menjadi pilihan yang sangat praktis dan adaptif, khususnya pada proyek-proyek konstruksi yang membutuhkan kecepatan dan efisiensi tinggi tanpa mengorbankan kualitas atau kekuatan dari hasil akhir.



**Gambar 4. 12 Penggunaan Desain Modular Dalam Pemasangan Sabuk Baja**

## d. Manfaat Plat WF Baja Sebagai Sabuk

### 1) Mengurangi Amplitudo Getaran

Salah satu manfaat utama dari pemasangan sabuk baja pada balok gantung adalah kemampuannya untuk mengurangi amplitudo getaran yang terjadi pada struktur bangunan. Amplitudo getaran, atau besarnya osilasi yang dialami oleh suatu struktur, dapat berdampak negatif terhadap kenyamanan dan keamanan bangunan jika terlalu besar. Dengan adanya sabuk baja yang dipasang melingkari balok, kemampuan struktur untuk meredam getaran meningkat secara signifikan, sehingga amplitudo getaran dapat dikurangi hingga tingkat yang lebih aman. Hal ini menjadi sangat penting, terutama di bangunan yang mengalami getaran berulang, seperti pada gedung industri atau fasilitas yang dilengkapi dengan peralatan mekanis berat. Penurunan amplitudo getaran ini dapat menjaga stabilitas struktur bangunan, sehingga memberikan rasa aman dan nyaman bagi pengguna.

Mengurangi amplitudo getaran juga berarti menurunkan potensi kerusakan struktural yang bisa timbul akibat gaya berulang pada balok gantung. Getaran yang berlebihan dapat menyebabkan kelelahan material, yang pada akhirnya menimbulkan retakan atau bahkan kegagalan struktural pada balok dalam jangka panjang. Sabuk baja berfungsi sebagai peredam yang membatasi pergerakan berlebihan, sehingga menjaga kondisi fisik balok tetap stabil meskipun mengalami tekanan dari beban dinamis. Dengan demikian, manfaat pengurangan getaran ini bukan hanya tentang meningkatkan kenyamanan, tetapi juga tentang memperpanjang umur pakai

balok dan mempertahankan integritas struktural bangunan dalam waktu yang lebih lama.

## 2) Pembahasan Manfaat Memperpanjang Umur Pakai Struktur

Manfaat lain yang signifikan dari penggunaan sabuk baja pada balok gantung adalah memperpanjang umur pakai struktur. Ketika amplitudo getaran berkurang, balok mengalami lebih sedikit tekanan dan deformasi, yang pada akhirnya memperpanjang masa pakai material yang menyusun struktur. Kelelahan material akibat getaran berulang sering kali menjadi penyebab utama kerusakan dini pada komponen struktur, terutama pada elemen gantung yang rentan terhadap gaya tarik dan tekan berulang. Dengan menambah sabuk baja sebagai penguat, balok dapat menahan tekanan tambahan ini dengan lebih baik, sehingga material tetap dalam kondisi yang optimal untuk jangka waktu yang lebih panjang. Ini secara langsung mengurangi biaya pemeliharaan atau perbaikan jangka pendek, karena balok yang telah diperkuat memerlukan perawatan yang lebih minim.

Selain mengurangi kebutuhan perawatan, perpanjangan umur pakai struktur juga memberikan manfaat ekonomi bagi pemilik atau pengelola bangunan. Dengan struktur yang lebih tahan lama, biaya renovasi atau penggantian komponen dapat diminimalkan, memungkinkan alokasi anggaran untuk kebutuhan lain yang lebih produktif. Memperpanjang umur struktur juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan, karena berkurangnya kebutuhan bahan bangunan baru dan minimnya limbah konstruksi. Dalam jangka panjang, peningkatan daya tahan struktur melalui

pemasangan sabuk baja ini merupakan investasi strategis yang dapat mengurangi beban finansial, menjaga keselamatan bangunan, dan mendukung keberlanjutan dengan menekan penggunaan material yang berlebihan.

#### **4.3.1.3 Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded Untuk Penguatan Struktural**

##### **a. Analisis Tujuan Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded**

Penambahan pelat serat karbon pultruded bertujuan untuk meningkatkan kekuatan struktural balok gantung dengan memberikan tambahan daya dukung dan rigiditas pada area yang rawan terhadap tekanan dan getaran tinggi. Pelat serat karbon ini dirancang dengan kekuatan tarik yang sangat tinggi namun tetap ringan, sehingga dapat menambah daya dukung tanpa menambah beban signifikan pada struktur. Dalam konteks gedung konser yang mengalami frekuensi getaran intensif, pelat serat karbon menjadi pilihan tepat karena materialnya mampu menyerap getaran dan mengurangi risiko retak atau deformasi akibat beban dinamis. Pelat ini juga dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, membuatnya ideal untuk lingkungan dengan tingkat kelembaban tinggi atau atmosfer yang dapat menyebabkan degradasi material dalam jangka panjang.

Dari sisi teknis, pelat serat karbon pultruded yang digunakan memenuhi spesifikasi material berkekuatan tinggi dengan proses fabrikasi yang menggabungkan serat karbon dalam bentuk pultrusi. Ini menghasilkan pelat dengan kekuatan yang konsisten dan ringan, memberikan keuntungan dalam

pemasangan yang lebih mudah dan cepat tanpa memerlukan penguatan tambahan pada sambungan. Pemasangan pelat ini dilakukan melalui proses pengeleman menggunakan bahan perekat epoxy berkekuatan tinggi, yang menciptakan ikatan yang kuat dan tahan lama antara pelat serat karbon dan permukaan balok beton atau baja. Penggunaan pelat serat karbon ini membawa beberapa keunggulan, seperti peningkatan kapasitas redaman, daya dukung tinggi terhadap fluktuasi beban, dan peningkatan umur struktur, yang secara keseluruhan meningkatkan stabilitas dan keamanan gedung dalam jangka panjang.

#### **b. Analisis Spesifikasi Data Teknis Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded**

Sika CarboDur S adalah material penguatan berbasis serat karbon yang dirancang untuk aplikasi perkuatan struktural. Dengan spesifikasi teknis yang unggul, material ini menawarkan solusi yang efisien dan tahan lama untuk meningkatkan kapasitas struktural elemen bangunan seperti balok, kolom, dan pelat beton. Tabel berikut menyajikan data teknis utama, seperti modulus elastisitas dan kekuatan tarik, yang menjadi dasar evaluasi kinerja material ini dalam berbagai kondisi aplikasi.

**Tabel 4. 9 Spesifikasi Data Teknis**

Parameter	Sika CarboDur S
<b>Modulus Elastisitas</b>	
Nilai Rata-rata	165.000 N/mm <sup>2</sup>
Nilai Min. 5%	> 160.000 N/mm <sup>2</sup>
Min. Nilai Fraktil 5%	162.000 N/mm <sup>2</sup>
Nilai Fraktil 95%	180.000 N/mm <sup>2</sup>
<b>Kekuatan Tarik</b>	
Nilai Rata-rata	3.100 N/mm <sup>2</sup>
Nilai Min. 5%	> 2.800 N/mm <sup>2</sup>
Nilai Fraktil 95% Nilai	3.000 N/mm <sup>2</sup>
Fraktil Regangan saat putus	> 1,70%
Tegangan Desain	< 0,85%

Berdasarkan data teknis, Sika CarboDur S menunjukkan nilai modulus elastisitas rata-rata sebesar 165.000 N/mm<sup>2</sup>, yang mencerminkan kemampuan material untuk menahan deformasi elastis dengan sangat baik. Kekuatan tarik rata-rata mencapai 3.100 N/mm<sup>2</sup>, menegaskan daya tahan tinggi terhadap gaya tarik. Nilai fraktil 5% yang lebih tinggi dari standar minimum menunjukkan bahwa material ini memiliki konsistensi kualitas yang tinggi, memberikan keandalan dalam aplikasi desain struktural. Selain itu, nilai regangan putus yang mencapai >1,70% memberikan fleksibilitas tambahan dalam menahan tekanan sebelum kegagalan terjadi. Tegangan desain yang terjaga di bawah 0,85% memastikan material ini aman digunakan dalam kondisi operasional jangka panjang. Kombinasi dari karakteristik ini menjadikan Sika CarboDur S sebagai pilihan ideal untuk proyek perkuatan struktural modern.

#### c. Pelaksanaan Pemasangan Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded

Sika CarboDur S adalah solusi inovatif dalam perkuatan struktur yang menggunakan material berbasis serat karbon. Teknologi ini dirancang untuk meningkatkan kapasitas struktural elemen bangunan, seperti balok, kolom, atau pelat beton, tanpa menambah beban mati yang signifikan. Dengan karakteristik teknis yang unggul, Sika CarboDur S menawarkan keunggulan berupa kekuatan tarik tinggi, durabilitas, dan kemudahan pemasangan, sehingga menjadi pilihan utama dalam proyek rekayasa modern. Tulisan ini akan membahas secara mendalam pelaksanaan pemasangan dan manfaat dari material ini dalam aplikasi nyata.

**Tabel 4. 10 Pelaksanaan Pemasangan Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded**

<b>Tahapan</b>	<b>Deskripsi</b>
<b>1) Persiapan Permukaan</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membersihkan permukaan beton dari debu, minyak, dan kotoran lainnya yang dapat mengurangi daya rekat.</li> <li>- Memperbaiki retakan, kerusakan, atau ketidakteraturan pada beton untuk memastikan permukaan yang rata dan stabil.</li> <li>- Melakukan pengamplasan atau metode lain guna menciptakan kekasaran permukaan yang optimal untuk adhesi.</li> </ul>
<b>2) Pengaplikasian Perekat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menggunakan perekat epoksi yang sesuai dengan spesifikasi yang direkomendasikan oleh produsen.</li> <li>- Mencampurkan komponen perekat secara merata hingga homogen sesuai dengan petunjuk teknis.</li> <li>- Mengaplikasikan perekat pada permukaan beton dan sisi bawah pelat serat karbon secara merata.</li> </ul>
<b>3) Pemasangan Pelat Serat Karbon</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menempelkan pelat serat karbon Sika CarboDur S pada permukaan beton yang telah dilapisi perekat.</li> <li>- Menekan pelat menggunakan alat rol untuk memastikan kontak penuh antara pelat, perekat, dan beton, serta menghilangkan gelembung udara yang mungkin terbentuk.</li> </ul>
<b>4) Proses Penyelesaian dan Curing</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membersihkan sisa perekat di sekitar pelat untuk memastikan hasil estetika yang baik.</li> <li>- Membiarakan perekat mengeras sesuai waktu curing yang ditentukan dalam spesifikasi teknis, biasanya 24-48 jam, tergantung pada kondisi lingkungan.</li> <li>- Melindungi area pemasangan dari gangguan atau beban hingga perekat mencapai kekuatan maksimum.</li> </ul>
<b>5) Pemeriksaan Akhir</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melakukan inspeksi visual untuk memastikan pelat terpasang dengan benar tanpa adanya celah atau deformasi.</li> <li>- Melakukan pengujian kekuatan perekat jika diperlukan sesuai standar teknis yang berlaku.</li> </ul>

Berdasarkan data teknis, Sika CarboDur S menunjukkan nilai modulus elastisitas rata-rata sebesar  $165.000 \text{ N/mm}^2$ , yang mencerminkan kemampuan material untuk menahan deformasi elastis dengan sangat baik. Kekuatan tarik rata-rata mencapai  $3.100 \text{ N/mm}^2$ , menegaskan daya tahan tinggi terhadap gaya tarik. Nilai fraktil 5% yang lebih tinggi dari standar minimum menunjukkan bahwa material ini memiliki konsistensi kualitas yang tinggi, memberikan keandalan dalam aplikasi desain struktural. Selain itu, nilai regangan putus

yang mencapai >1,70% memberikan fleksibilitas tambahan dalam menahan tekanan sebelum kegagalan terjadi. Tegangan desain yang terjaga di bawah 0,85% memastikan material ini aman digunakan dalam kondisi operasional jangka panjang. Kombinasi dari karakteristik ini menjadikan Sika CarboDur S sebagai pilihan ideal untuk proyek perkuatan struktural modern.

#### **d. Analisa Manfaat Penambahan Pelat Serat Karbon Pultruded**

Sika CarboDur S merupakan material perkuatan struktural yang menawarkan berbagai keunggulan teknis dan fungsional. Material berbasis serat karbon ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan penguatan bangunan dengan efisiensi tinggi, daya tahan jangka panjang, dan kemampuan aplikasi yang fleksibel. Berikut adalah manfaat dan keunggulan utama dari penggunaan Sika CarboDur S dalam proyek perkuatan struktural. Adapun keunggulan adalah sebagai berikut:

##### **1) Kinerja Struktural Tinggi**

Sika CarboDur S memiliki modulus elastisitas dan kekuatan tarik yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan kapasitas beban struktur secara signifikan tanpa menambah beban mati yang besar.

##### **2) Ringan dan Mudah Dipasang**

Material berbasis serat karbon ini ringan, fleksibel, dan mudah dibentuk sesuai kebutuhan proyek, mempermudah proses pemasangan bahkan di lokasi yang sulit dijangkau.

##### **3) Durabilitas dan Ketahanan yang Baik**

Material ini tahan terhadap korosi, kelembaban, dan perubahan suhu, menjadikannya ideal untuk aplikasi jangka panjang di berbagai kondisi

lingkungan.

#### **4) Efisiensi Biaya dan Waktu**

Dengan pemasangan yang relatif cepat dan minimalnya kebutuhan peralatan berat, material ini menawarkan solusi yang hemat biaya dibandingkan dengan metode perkuatan konvensional seperti peningkatan dimensi struktur beton.

#### **5) Fleksibilitas dalam Aplikasi**

Dapat digunakan untuk memperkuat berbagai elemen struktur, seperti balok, pelat, kolom, dan dinding beton, menjadikannya pilihan serbaguna untuk berbagai proyek perbaikan dan perkuatan.

#### **6) Mempertahankan Estetika Bangunan**

Pemasangan pelat yang tipis dan tanpa penambahan volume yang signifikan tidak mengganggu tampilan struktur asli, cocok untuk bangunan yang memerlukan perhatian pada estetika.

#### **4.4 Rencana Pemeliharaan**

##### **4.4.1 Pemeriksaan Rutin**

Pemeriksaan rutin merupakan langkah esensial untuk memastikan bahwa komponen struktural seperti pelat baja penyangga dan sabuk baja tetap dalam kondisi optimal. Inspeksi berkala bertujuan untuk mendeteksi sejak dini tanda-tanda kerusakan seperti korosi, deformasi, atau retak yang dapat mengancam integritas struktural. Korosi, sebagai salah satu ancaman utama material baja, sering kali dimulai dari area kecil yang sulit terlihat dan dapat menyebar dengan cepat jika tidak segera ditangani. Oleh karena itu,

pemeriksaan visual yang cermat menjadi langkah awal yang sangat penting. Pemeriksaan ini mencakup evaluasi langsung terhadap permukaan material serta pengecekan terhadap kelurusan dan kekuatan sambungan, yang dapat menunjukkan tanda-tanda awal kegagalan material.

Selain inspeksi visual, pengukuran getaran juga menjadi bagian penting dalam pemeriksaan rutin. Getaran yang berlebihan pada komponen baja dapat menjadi indikasi adanya ketidakseimbangan beban, pelonggaran sambungan, atau kerusakan internal material. Melakukan analisis getaran secara berkala setiap tiga bulan memungkinkan tim teknis untuk mengidentifikasi perubahan yang signifikan dalam perilaku dinamis struktur. Dengan data ini, langkah perbaikan dapat dilakukan sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih serius. Kombinasi antara inspeksi visual dan analisis getaran memberikan pendekatan holistik untuk menjaga stabilitas struktur secara berkelanjutan.

Jadwal pemeriksaan yang teratur, setiap tiga bulan, memungkinkan pemantauan yang konsisten terhadap kondisi material baja. Pemeriksaan rutin ini tidak hanya membantu dalam pencegahan kerusakan lebih lanjut tetapi juga mendukung keberlanjutan fungsi struktur dalam jangka panjang. Dengan melakukan pemeliharaan secara proaktif, biaya perbaikan besar akibat kerusakan serius dapat diminimalkan, dan umur layanan struktur dapat diperpanjang. Selain itu, dokumentasi hasil inspeksi dari setiap jadwal pemeriksaan menjadi alat penting untuk melacak perkembangan kondisi struktur dari waktu ke waktu. Dengan pendekatan sistematis ini, pemeriksaan rutin menjadi elemen kunci dalam strategi manajemen perawatan struktur berbasis baja.

#### 4.4.2 Perawatan Material

Perawatan material merupakan langkah vital untuk menjaga kualitas dan daya tahan komponen baja yang digunakan dalam struktur. Salah satu langkah utama dalam perawatan adalah penerapan pelapisan anti-korosi pada pelat baja. Pelapisan ini berfungsi sebagai penghalang antara material baja dengan kelembapan, udara, dan kontaminan lingkungan yang dapat memicu korosi. Proses pelapisan biasanya melibatkan penggunaan bahan seperti cat epoksi, galvanisasi, atau pelapis berbasis seng, yang dirancang untuk memberikan perlindungan jangka panjang terhadap elemen-elemen penyebab korosi. Dengan menerapkan pelapisan secara menyeluruh, risiko korosi yang dapat melemahkan struktur baja secara perlahan dapat diminimalkan, sehingga memperpanjang umur layanan material tersebut.

Selain pelapisan, perawatan rutin juga melibatkan pembersihan permukaan baja secara berkala. Debu, kotoran, dan sisa material lain yang menumpuk pada permukaan baja dapat mempercepat proses korosi dengan menciptakan lingkungan yang lembap dan asam. Oleh karena itu, pembersihan rutin menggunakan alat yang tepat, seperti kain bersih, sikat logam, atau bahan pembersih khusus, sangat penting untuk memastikan permukaan baja tetap bersih dan bebas dari zat-zat yang merusak. Proses pembersihan juga memberikan kesempatan untuk memeriksa keberadaan goresan atau cacat pada pelapisan anti-korosi, sehingga langkah perbaikan dapat dilakukan jika ditemukan area yang memerlukan perhatian.

Perawatan material baja juga memerlukan pemantauan terhadap kondisi lingkungan di sekitar struktur. Faktor lingkungan, seperti tingkat kelembapan,

suhu, atau eksposur terhadap bahan kimia, dapat memengaruhi kecepatan korosi dan degradasi material. Oleh karena itu, instalasi struktur di lokasi dengan risiko korosi tinggi, seperti daerah pesisir atau kawasan industri, memerlukan perlindungan tambahan seperti pelapisan khusus dan perawatan lebih sering. Selain itu, memastikan bahwa lingkungan sekitar tetap bersih dan bebas dari bahan kimia yang berbahaya bagi baja, seperti asam atau alkali, dapat membantu mengurangi risiko kerusakan material secara signifikan.

Langkah-langkah perawatan ini tidak hanya membantu dalam menjaga kondisi fisik pelat baja, tetapi juga memberikan nilai ekonomi jangka panjang. Dengan mencegah kerusakan serius pada material melalui perawatan proaktif, biaya besar yang mungkin timbul akibat penggantian komponen dapat dihindari. Selain itu, pendekatan ini juga memastikan bahwa struktur tetap berfungsi secara optimal dan memenuhi standar keamanan yang telah ditetapkan. Dengan mengintegrasikan pelapisan anti-korosi, pembersihan rutin, dan pengelolaan lingkungan yang tepat, perawatan material menjadi elemen penting dalam strategi pemeliharaan struktur berbasis baja.

#### **4.4.3 Monitoring Getaran Pasca Pemasangan**

Analisis performa struktur pada periode Januari hingga Agustus 2024 memberikan gambaran mengenai parameter-parameter utama yang memengaruhi stabilitas dan keandalan struktur. Parameter yang dianalisis meliputi gaya tetap ( $P_0$ ), getaran (Hz), rasio redaman ( $\beta$ ), dan limit percepatan ( $a_0/g$ ). Data menunjukkan variasi nilai yang masih berada di bawah standar, mencerminkan adanya potensi kekurangan dalam performa struktural yang

memerlukan evaluasi lebih lanjut. Tabel berikut menyajikan detail data tersebut, yang menjadi dasar untuk analisis lebih mendalam dan identifikasi langkah perbaikan.

**Tabel 4. 11 Data Monitoring Getaran Pasca Pemasangan**

No.	Tanggal Konser	Gaya Tetap ( $P_0$ ) (kN)	Getaran (Hz)	Rasio Redaman ( $\beta$ )	Limit Percepatan ( $a_0/g \times 100\%$ )
1	15 Jan 2024	0,38	3.5	0,009	1.4%
2	12 Mar 2024	0,39	3.7	0,008	1.3%
3	10 May 2024	0,37	3.6	0,009	1.2%
4	14 Jul 2024	0,35	3.4	0,008	1.3%
5	12 Aug 2024	0,36	3.3	0,007	1.2%

### 1) Gaya Tetap ( $P_0$ )

Data gaya tetap ( $P_0$ ) menunjukkan fluktuasi di bawah standar yang ditetapkan, yaitu 0,41 kN. Nilai rata-rata  $P_0$  pada periode Januari hingga Agustus 2024 adalah 0,37 kN, dengan nilai tertinggi 0,39 kN pada Maret dan nilai terendah 0,35 kN pada Juli. Nilai ini mencerminkan ketidaksesuaian dengan standar yang dapat mengindikasikan ketidakseimbangan dalam distribusi beban tetap pada struktur. Kondisi ini berpotensi menyebabkan ketahanan struktural yang kurang optimal jika tidak segera dilakukan penyesuaian. Upaya stabilisasi gaya tetap melalui redistribusi beban atau penggunaan material yang lebih sesuai dapat menjadi solusi untuk mendekati nilai standar.

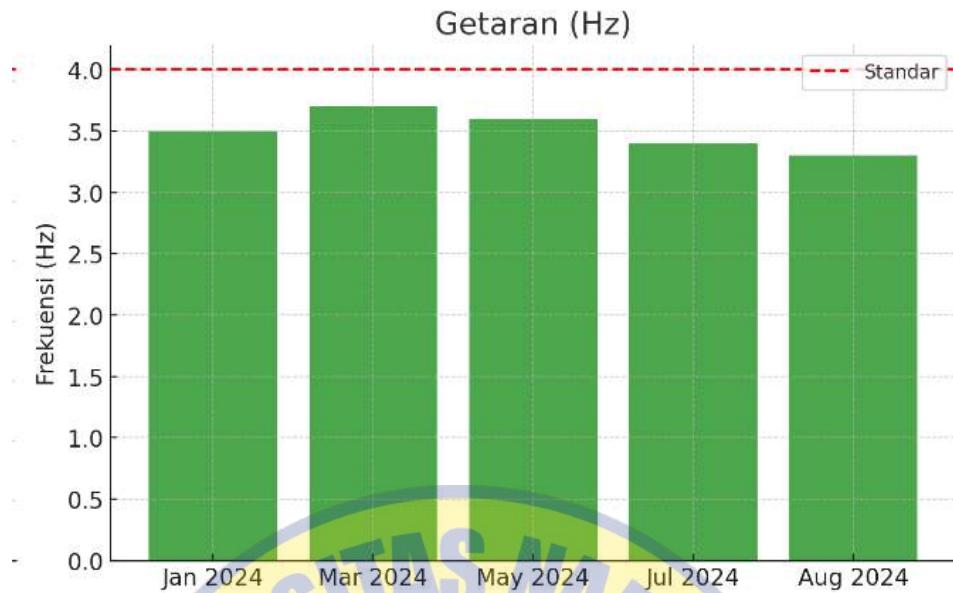


Gambar 4. 13 Gaya tetap

## 2) Getaran (Hz)

Frekuensi getaran pada periode ini juga berada di bawah standar, yaitu 4 Hz.

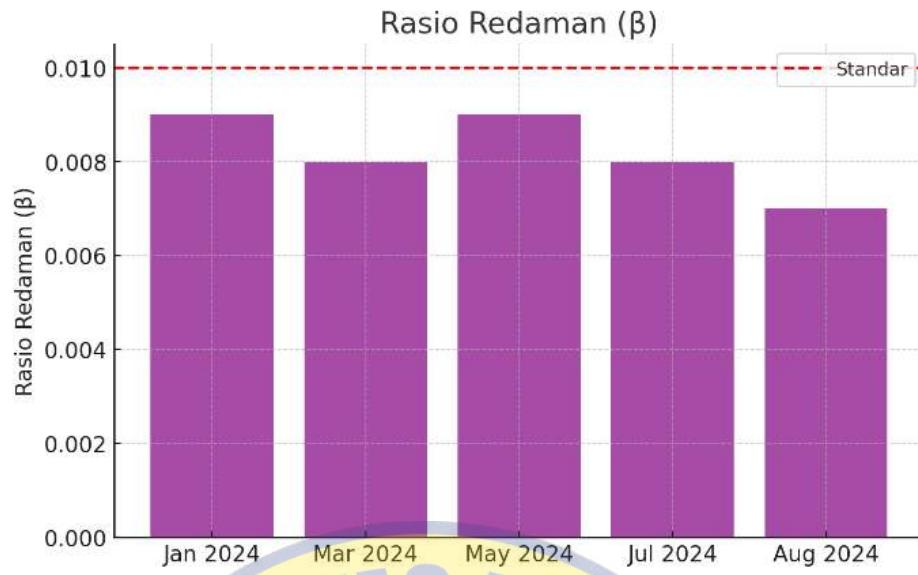
Nilai rata-rata getaran tercatat sebesar 3,5 Hz dengan variasi nilai antara 3,3 Hz hingga 3,7 Hz. Frekuensi getaran yang lebih rendah dari standar mengindikasikan bahwa struktur mungkin mengalami pengurangan performa dinamis. Hal ini dapat disebabkan oleh kelembaman material atau penyesuaian struktur yang tidak memadai terhadap gaya eksternal. Penurunan frekuensi getaran dapat berdampak pada kestabilan struktural, terutama dalam menahan beban dinamis seperti gempa. Oleh karena itu, optimasi frekuensi getaran diperlukan untuk mencapai standar yang lebih stabil.



Gambar 4. 14 Getaran

### 3) Rasio Redaman ( $\beta$ )

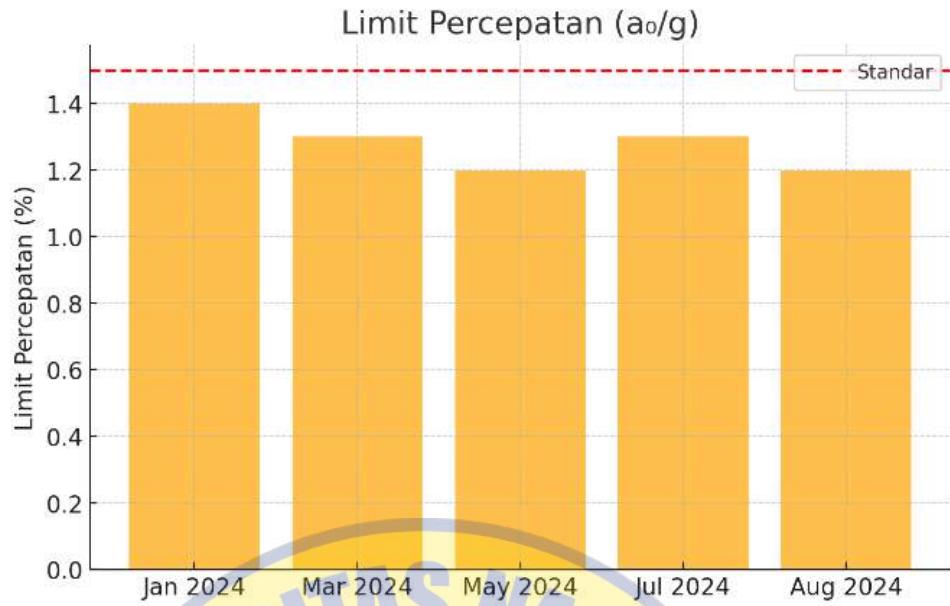
Rasio redaman ( $\beta$ ) pada data ini berkisar antara 0,007 hingga 0,009, dibawah standar yang ditetapkan sebesar 0,01. Nilai rata-rata sebesar 0,008 mencerminkan kemampuan redaman yang relatif rendah, yang dapat memengaruhi efektivitas struktur dalam mengurangi energi getaran. Rendahnya nilai redaman ini dapat menyebabkan struktur lebih rentan terhadap deformasi berulang akibat getaran. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan perbaikan pada elemen redaman atau penggunaan material dengan karakteristik peredaman yang lebih baik, sehingga struktur dapat lebih adaptif terhadap gaya dinamis.



**Gambar 4. 15 Rasio Redaman**

#### 4) Limit Percepatan ( $a_0/g$ )

Limit percepatan ( $a_0/g$ ) juga berada di bawah standar 1,5%, dengan nilai rata-rata sebesar 1,34% pada periode ini. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kemampuan terbatas untuk menahan percepatan akibat beban dinamis. Variasi nilai percepatan berkisar dari 1,2% hingga 1,4%, dengan nilai terendah tercatat pada Mei dan Agustus 2024. Rendahnya limit percepatan ini berpotensi meningkatkan risiko getaran berlebih atau kerusakan struktural saat struktur mengalami percepatan mendadak. Langkah perbaikan dapat mencakup optimasi elemen penahanan percepatan serta peningkatan material untuk menyesuaikan dengan nilai standar yang diharapkan.



**Gambar 4. 16 Limit Percepatan**

## 4.5 Pembahasan Hasil Penelitian

### 4.5.1 Identifikasi Masalah

Pada investigasi ini, identifikasi masalah dimulai dengan pengamatan terhadap fenomena getaran yang terdeteksi pada balok gantung di gedung konser Museum Musik Dunia, Kota Batu. Struktur balok gantung yang dirancang untuk memberikan fleksibilitas ruang dan estetika justru menjadi sumber perhatian utama akibat getaran yang tidak diinginkan. Getaran ini pertama kali ditemukan oleh tim teknis saat melakukan pemeriksaan rutin, khususnya ketika konser berlangsung. Faktor ini menimbulkan kekhawatiran tidak hanya terhadap kenyamanan pengunjung, tetapi juga pada aspek keamanan dan stabilitas struktur. Meskipun gedung konser ini dirancang untuk menghadirkan pengalaman akustik yang optimal, adanya getaran pada struktur balok gantung mengindikasikan potensi masalah yang memerlukan penanganan segera.

Faktor penyebab getaran tersebut dapat dibagi menjadi beberapa kategori

utama, yakni perubahan beban, resonansi struktural, desain balok gantung yang fleksibel, dan pengaruh eksternal. Perubahan beban terjadi karena fluktuasi jumlah pengunjung, penempatan peralatan berat seperti sistem pencahayaan dan audio, serta aktivitas dalam gedung yang meningkatkan tekanan pada struktur. Resonansi struktural terjadi ketika frekuensi aktivitas, seperti konser, bertepatan dengan frekuensi alami balok gantung, yang memperbesar getaran secara signifikan. Selain itu, desain balok gantung yang mengutamakan estetika memberikan fleksibilitas tinggi, namun justru menurunkan kapasitasnya untuk menahan getaran. Faktor eksternal, seperti aktivitas lalu lintas di sekitar gedung, juga turut menambah amplitudo getaran, membuat masalah ini semakin kompleks.

Dampak yang dihasilkan dari getaran ini sangat signifikan terhadap berbagai aspek. Pertama, kenyamanan pengunjung terganggu, terutama mereka yang berada di lantai tiga gedung konser. Getaran dengan amplitudo tinggi menyebabkan rasa tidak stabil yang mengurangi pengalaman menikmati konser. Kedua, getaran ini juga berpotensi memengaruhi integritas struktur bangunan. Balok gantung dapat mengalami kelelahan material akibat tekanan berulang, yang berisiko menyebabkan retakan hingga kegagalan struktural. Ketiga, getaran berdampak pada estetika dan interior gedung, seperti munculnya keretakan pada plafon atau dinding yang mengurangi daya tarik visual museum sebagai tempat wisata edukasi dan hiburan.

Identifikasi awal ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai skala dan urgensi permasalahan yang dihadapi. Dengan hasil pengamatan dan data lapangan, seperti pengukuran frekuensi getaran, amplitudo, dan rasio redaman, dapat disimpulkan bahwa getaran pada balok gantung sudah melebihi batas

toleransi kenyamanan yang direkomendasikan. Hal ini menjadi dasar bagi perencanaan strategi mitigasi dan perbaikan, seperti analisis struktur mendalam, penggunaan material peredam, dan kemungkinan penguatan struktur dengan elemen tambahan. Langkah-langkah ini diperlukan untuk memastikan keamanan, stabilitas, dan kenyamanan pengunjung tetap terjaga, sekaligus mendukung kelangsungan operasional gedung konser sebagai salah satu daya tarik utama di Museum Musik Dunia.

Hasil pengamatan yang dilakukan pada balok gantung di gedung konser Museum Musik Dunia, Kota Batu, menunjukkan adanya getaran yang signifikan selama konser berlangsung. Pengukuran langsung dilakukan menggunakan sensor getaran untuk merekam frekuensi, amplitudo, dan durasi getaran yang terjadi. Data yang diperoleh mengindikasikan bahwa rata-rata frekuensi getaran berada di angka 8 Hz, yang jauh melebihi standar kenyamanan untuk gedung konser sebesar 4 Hz. Selain itu, amplitudo getaran tercatat dalam nilai percepatan sekitar 2,2% g, yang juga melampaui batas toleransi sebesar 0,5% g untuk aktivitas di mana pengunjung dalam keadaan diam. Temuan ini menegaskan perlunya tindakan segera untuk menurunkan intensitas getaran agar kenyamanan dan keamanan gedung dapat dipertahankan.

Dalam pengamatan lebih lanjut, diketahui bahwa getaran ini tidak hanya disebabkan oleh aktivitas internal, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor eksternal. Aktivitas kendaraan berat di sekitar area museum memberikan kontribusi tambahan terhadap intensitas getaran, terutama pada jam-jam sibuk. Resonansi yang dihasilkan oleh interaksi frekuensi alami balok dengan aktivitas internal dan eksternal memperburuk situasi, sehingga menghasilkan getaran yang dirasakan

tidak nyaman oleh pengunjung. Selain itu, fluktuasi jumlah pengunjung dan penggunaan peralatan panggung berat selama konser menambah beban dinamis pada balok gantung, yang menjadi salah satu penyebab utama meningkatnya getaran.

Hasil pengamatan juga mencatat adanya dampak visual yang diakibatkan oleh getaran ini. Beberapa keretakan kecil pada plafon dan dinding gedung konser mulai terlihat, terutama di sekitar area balok gantung. Hal ini menunjukkan adanya tekanan berulang pada elemen interior yang bersifat dekoratif. Selain itu, potensi kerusakan material pada balok akibat kelelahan struktur menjadi perhatian serius, mengingat tekanan berulang dalam jangka panjang dapat menyebabkan kegagalan material. Pengamatan visual ini memberikan indikasi bahwa getaran tidak hanya berdampak pada kenyamanan, tetapi juga dapat merusak estetika dan keamanan struktural secara keseluruhan.

Temuan hasil pengamatan menjadi dasar bagi analisis lebih lanjut untuk menentukan solusi yang tepat dalam menangani masalah getaran pada balok gantung. Upaya mitigasi, seperti penambahan elemen redaman, penguatan material struktural, dan pengendalian beban dinamis, menjadi prioritas yang harus segera dilakukan. Dengan data yang telah dikumpulkan, langkah-langkah teknis dapat direncanakan secara menyeluruh untuk mengurangi dampak negatif getaran dan memastikan bahwa gedung konser dapat terus berfungsi dengan optimal tanpa mengorbankan keselamatan dan kenyamanan pengunjung.

#### **4.5.2 Penilaian Kerusakan**

Penilaian kerusakan pada balok gantung gedung konser Museum Musik

Dunia di Kota Batu memberikan gambaran yang lebih jelas tentang dampak dari getaran yang terdeteksi. Pemeriksaan visual awal menemukan adanya keretakan pada elemen interior seperti plafon dan dinding di sekitar area balok gantung. Keretakan ini mengindikasikan tekanan berulang yang disebabkan oleh amplitudo getaran yang melebihi standar toleransi struktural. Meskipun keretakan masih dalam tahap awal dan belum memengaruhi elemen utama struktur, kondisi ini perlu segera ditangani untuk mencegah kerusakan lebih lanjut yang dapat memengaruhi stabilitas gedung secara keseluruhan.

Selain dampak visual, analisis material balok gantung menunjukkan adanya tanda-tanda kelelahan material. Getaran berulang dengan intensitas tinggi menyebabkan akumulasi tekanan yang mengarah pada degradasi material secara perlahan. Fenomena ini berpotensi melemahkan integritas struktural balok, terutama jika getaran terus terjadi tanpa adanya langkah mitigasi. Penilaian ini juga menyoroti pentingnya penguatan elemen-elemen struktural yang rentan, untuk memastikan balok gantung tetap mampu menahan beban dinamis yang dihasilkan selama aktivitas konser berlangsung.

Kerusakan juga dapat berdampak pada performa akustik gedung konser. Getaran yang merambat melalui struktur dapat mengganggu distribusi suara, menghasilkan resonansi tambahan yang memengaruhi pengalaman pendengar. Selain itu, ketidakstabilan struktural dapat memperbesar risiko deformasi pada elemen interior, yang tidak hanya mengurangi estetika ruangan tetapi juga meningkatkan potensi gangguan keamanan bagi pengunjung. Dampak kombinasi antara kerusakan visual, struktural, dan performa akustik ini memerlukan pendekatan penilaian yang komprehensif untuk menentukan prioritas perbaikan.

Dengan mempertimbangkan seluruh temuan ini, penilaian kerusakan menjadi dasar penting untuk perencanaan langkah mitigasi yang efektif. Langkah-langkah yang dapat diambil meliputi penguatan struktur utama balok dengan penambahan material peredam, pemasangan elemen anti-getaran, serta perbaikan elemen interior yang rusak. Selain itu, implementasi pemeliharaan berkala yang lebih intensif diperlukan untuk mencegah kerusakan serupa di masa mendatang. Penilaian ini menegaskan pentingnya pendekatan terintegrasi untuk mengatasi kerusakan pada balok gantung demi menjaga keamanan dan kenyamanan pengunjung.

#### **4.5.3 Penyusunan Rekomendasi**

Berdasarkan penilaian kerusakan yang telah dilakukan, penyusunan rekomendasi difokuskan pada langkah-langkah strategis untuk mengurangi dampak getaran, meningkatkan stabilitas struktur, serta memastikan keamanan dan kenyamanan pengunjung. Salah satu langkah utama adalah penguatan struktur balok gantung dengan material tambahan, seperti plat baja berdaya tinggi dan sistem redaman khusus. Penambahan plat baja akan membantu meningkatkan kekakuan struktur, mendistribusikan beban secara merata, dan mengurangi risiko kelelahan material akibat tekanan berulang. Selain itu, pemasangan elemen redaman, seperti peredam viskoelastik atau peredam massa-tala, dapat mengurangi amplitudo getaran secara signifikan, sehingga struktur lebih stabil dan nyaman.

Selain penguatan struktural, modifikasi pada desain dan konfigurasi balok gantung juga menjadi bagian dari rekomendasi. Analisis desain ulang yang mencakup penyesuaian rasio redaman, penambahan komponen pendukung, serta

pengendalian frekuensi alami struktur menjadi penting untuk mengurangi efek resonansi. Desain ulang ini juga harus memperhatikan distribusi beban dinamis yang berasal dari aktivitas konser dan jumlah pengunjung. Dengan demikian, struktur balok dapat dirancang untuk menahan beban tambahan tanpa mengorbankan estetika dan fleksibilitas ruang yang menjadi karakteristik gedung konser.

Langkah mitigasi lainnya adalah pengelolaan beban operasional selama konser berlangsung. Rekomendasi ini melibatkan pembatasan kapasitas pengunjung, pengaturan ulang tata letak peralatan berat seperti pencahayaan dan sistem suara, serta penerapan sistem pemantauan getaran real-time. Dengan sistem pemantauan ini, operator gedung dapat mengidentifikasi potensi masalah secara dini dan mengambil tindakan korektif sebelum kerusakan terjadi. Selain itu, pelatihan bagi staf operasional untuk mengenali tanda-tanda awal gangguan struktural menjadi bagian penting dari implementasi rekomendasi ini.

Rekomendasi terakhir adalah implementasi program pemeliharaan rutin yang lebih intensif. Inspeksi berkala terhadap kondisi struktur balok gantung, sambungan, dan elemen interior seperti plafon dan dinding harus dilakukan untuk memastikan tidak ada kerusakan lanjut. Pemeliharaan ini meliputi pembersihan, pelapisan ulang material anti-korosi, dan pengujian ulang elemen redaman. Dengan langkah ini, gedung konser tidak hanya mampu menghadapi tekanan dari aktivitas rutin tetapi juga dapat mempertahankan kualitas dan daya tahannya dalam jangka panjang. Penyusunan rekomendasi ini memberikan arah strategis untuk menjaga keberlanjutan fungsi gedung sebagai fasilitas publik yang aman dan nyaman.

#### 4.5.4 Rencana Pemeliharaan

Rencana pemeliharaan merupakan elemen penting untuk memastikan keberlanjutan fungsi dan keamanan struktur balok gantung di gedung konser Museum Musik Dunia. Rencana ini dirancang untuk mengatasi kerusakan yang mungkin timbul akibat getaran berulang serta menjaga integritas struktural gedung dalam jangka panjang. Program pemeliharaan ini mencakup inspeksi rutin, perawatan material, serta penerapan sistem pemantauan yang berkelanjutan untuk mendeteksi masalah sejak dini. Dengan adanya rencana yang sistematis, gedung konser diharapkan dapat mempertahankan performanya sebagai fasilitas yang aman, nyaman, dan estetis bagi pengunjung.

Langkah pertama dalam rencana pemeliharaan adalah inspeksi rutin pada struktur balok gantung. Inspeksi ini dilakukan setiap tiga bulan untuk mengevaluasi kondisi sambungan, elemen redaman, serta elemen interior seperti plafon dan dinding. Fokus utama inspeksi adalah mendeteksi tanda-tanda awal kerusakan, seperti retak mikro, korosi, atau pelonggaran sambungan akibat tekanan berulang. Selain itu, pengukuran getaran secara berkala juga diperlukan untuk memastikan amplitudo dan frekuensi getaran tetap berada dalam batas toleransi. Data yang dikumpulkan dari inspeksi ini akan menjadi dasar untuk menentukan prioritas perbaikan dan penyesuaian lebih lanjut.

Selain inspeksi, perawatan material merupakan komponen penting dalam rencana pemeliharaan. Untuk struktur baja, pelapisan anti-korosi harus dilakukan secara berkala guna melindungi material dari degradasi lingkungan. Proses ini melibatkan pembersihan menyeluruh pada permukaan baja dan aplikasi ulang pelapis tahan korosi. Di sisi lain, elemen interior seperti plafon dan dinding harus

dirawat untuk mencegah kerusakan estetis dan fungsional akibat getaran. Langkah ini meliputi perbaikan retakan kecil, penggantian material yang rusak, serta pengecatan ulang untuk menjaga estetika interior gedung.

Rencana pemeliharaan juga mencakup implementasi sistem pemantauan real-time untuk mengawasi kondisi struktur selama aktivitas berlangsung. Sistem ini menggunakan sensor getaran yang dipasang pada balok gantung untuk mendeteksi perubahan dinamis secara langsung. Dengan data yang diperoleh secara real-time, operator gedung dapat merespons masalah potensial sebelum berkembang menjadi kerusakan yang lebih besar. Selain itu, pelatihan bagi tim teknis untuk memahami data pemantauan dan mengenali tanda-tanda awal gangguan struktural juga menjadi bagian integral dari rencana ini. Kombinasi antara inspeksi rutin, perawatan material, dan pemantauan real-time diharapkan dapat menjaga stabilitas dan performa struktur gedung konser secara optimal.

Dengan rencana pemeliharaan yang terstruktur dan berkelanjutan, risiko kerusakan serius dapat diminimalkan, dan umur pakai gedung dapat diperpanjang. Langkah-langkah ini juga mendukung pengalaman pengunjung dengan memastikan gedung konser tetap menjadi tempat yang aman, nyaman, dan estetis untuk menikmati berbagai pertunjukan. Pemeliharaan yang efektif tidak hanya memberikan keamanan struktural, tetapi juga mempertahankan reputasi gedung sebagai salah satu fasilitas unggulan di Museum Musik Dunia.