



Analisis Pelonggaran Sambungan Baut Akibat Adanya Getaran Struktur Melalui Perubahan Karakteristik Dinamik

Rahmatsyah Maksam Ramsi^{1*}, Meifal Rusli², Mulyadi Bur³
^{1,2,3}Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
¹rahmatsyahmaksam@gmail.com

Abstract

Bolted joints are generally used to connect two or more mechanical structures due to their ease of assembly and disassembly for maintenance. However, the problem of vibration is one of the main challenges when the tightness of the bolted joints is insufficient, causing failures such as looseness and resulting in disconnection. Looseness is the most common cause of dynamically loaded bolted joint structure failure. This study tested a simple bolt joint structure to observe the looseness indication of the bolt joint after it was vibrated using a shaker in a single-frequency excitation. A freely fixed beam consisting of two beams connected by a bolt and subjected to varying bolt tightening torques. Then the response measurement is carried out by recording the FRF graph obtained from loosening and tightening bolt torque effects. Modal parameters such as personal frequency and damping ratio were collected through experimental modal analysis (EMA). It was found that the structure's vibration could change the conditions of loosening or lower tightening torque indicated by shifting the structure's natural frequency. In this case, the structure with the bolted joint experienced a natural frequency shifting to the lower frequency, especially at the higher mode and showed symptoms of loosening of the bolted join.

Keywords: bolt/nut assembly, dynamic characteristic, EMA, self-loosening.

Abstrak

Sambungan baut umumnya digunakan untuk menghubungkan dua atau lebih struktur mekanis karena kemudahannya untuk dirakit dan dibongkar dalam pemeliharaan. Namun, masalah vibrasi merupakan salah satu tantangan utama, ketika keketatan sambungan baut tidak cukup yang menyebabkan kegagalan seperti kelonggaran dan mengakibatkan lepasnya sambungan. Kelonggaran adalah penyebab yang paling sering terjadi dari kegagalan struktur sambungan baut yang dimuat secara dinamis. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap struktur untuk mengamati apakah getaran pada struktur dapat sebabkan kelonggaran atau berkurang keketatan sambungan baut yang digetarkan menggunakan shaker. Balok bebas-tetap yang terdiri dari dua balok yang dihubungkan oleh sebuah baut dan diberikan variasi torsi pengencangan baut. Kemudian dilakukan pengukuran respon dengan mencatat grafik FRF yang diperoleh dari efek kelonggaran dan pengencangan torsi baut. Parameter modal seperti frekuensi pribadi dan rasio redaman dikumpulkan melalui analisis modal eksperimental (EMA). Ditemukan bahwa kondisi pelonggaran atau torsi pengencangan yang lebih rendah menggeser frekuensi pribadi struktur khususnya pada modus getar yang lebih tinggi. Pada kasus ini ditemukan bahwa struktur dengan sambungan baut mengalami penurunan frekuensi pribadi khususnya pada modus yang lebih tinggi dan menunjukkan adanya gejala pelonggaran pada sambungan baut.

Kata kunci: sambungan baut, karakteristik dinamik, EMA, kelonggaran.

1. Pendahuluan

Sambungan baut umumnya digunakan pada penggabungan dua atau lebih komponen struktur mekanik karena mudah untuk dirakit dan dibongkar

dalam perawatan. Kelonggaran adalah penyebab paling sering dijumpai dari kegagalan sambungan baut yang mengalami pembebanan statis maupun dinamis. Pengetahuan tentang bagaimana kinerja baut di bawah kondisi pembebanan statis cukup dipahami

dengan baik, sementara perilaku baut di bawah beban dinamis, belum banyak diketahui. Metode pengujian Gerhard H. Junker merancang tentang mesin pengujian yang baru untuk menghasilkan data kuantitatif dalam mengevaluasi sifat penguncian dan menyimpulkan bahwa getaran transversal memiliki efek yang lebih merugikan daripada getaran aksial [1]. Analisis teoritis mekanisme pelonggaran baut pada sambungan baut yang mengalami beban transversal juga telah dilakukan Sakai. Percobaan sederhana dilakukan untuk mengukur koefisien gesek baut pada kondisi slip transversal dari bagian yang dijepit. Hasil teoritis dan empiris kemudian dapat dibandingkan [2]. Tsai dan Chou meneliti sifat sambungan yang diidentifikasi dari rentang frekuensi yang berbeda akan memiliki nilai yang berbeda pula. Jika wilayah kontak pada permukaan sambungan kecil, maka cukup untuk menggunakan dua derajat kebebasan untuk menggambarkan sambungan. Ketika menganalisis struktur kompleks, biasanya seluruh struktur dibagi menjadi beberapa komponen dan memanfaatkan metode umum yang disebut sintesis substruktur untuk memprediksi hasil struktur secara keseluruhan [3]. Identifikasi parameter struktur sambungan menggunakan *Dynamic Data System* (DDS) dan *Finite Element Method* (FEM) juga dapat dilakukan sebagai proses identifikasi karakteristik dalam kondisi dinamis [4].

Peralatan pengukuran yang mahal menyebabkan sebagian besar hasil hanya dapat digunakan pada kondisi beban statis saja. Sifat sambungan dijelaskan dengan model elemen hingga di mana hubungan antara tekanan normal dan pendekatan permukaan diwakili dengan persamaan matematika berdasarkan data eksperimental [5]. Burdekin menyajikan metode umum untuk menghitung distribusi tekanan dan deformasi pada sambungan sebuah mesin dengan asumsi bahwa komponen sambungan terhubung melalui elemen hingga yang didefinisikan sebagai fungsi dari permukaan, bahan, dan tekanan pada area sambungan. Kerugian dalam metode ini adalah bahwa ukuran memori komputer yang besar, waktu komputasi yang lama, dan sifat sambungan dapat diterapkan untuk kondisi statis saja [6]. Kenny dan Patterson memodifikasi bentuk ulir mur untuk mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi selama siklus pembebanan dan telah menjelaskan teknik untuk menentukan distribusi beban secara eksperimental. Penyebab utama melonggarnya adalah akibat slip di antara permukaan kontak baut [7]. Ramey dan Jenkins melakukan identifikasi parameter desain utama yang berkontribusi terhadap pelonggaran baut akibat getaran dan identifikasi hubungan relatif serta tingkat pengaruhnya terhadap pelonggaran baut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat pengunci mur, konfigurasi sambungan, ukuran pengencangan, dan konfigurasi massa berpengaruh signifikan terhadap pelonggaran baut akibat getaran [8]. Model elemen hingga tiga dimensi

non-linier yang mencakup gesekan dan kontak telah dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak yang tersedia secara komersial, ANSYS, untuk menentukan beban yang bekerja pada sambungan dalam batang kantilever yang diberi beban terpusat pada bagian ujung spesimen [9]. Ibrahim dan Pettit meninjau dan memberikan gambaran umum tentang masalah yang berkaitan dengan dinamika struktural dengan sambungan baut. Mereka melihat masalah bersifat kompleks karena setiap sambungan melibatkan sumber ketidakpastian yang berbeda dan karakteristik non-linear yang tidak pasti [10]. Adapun cara sederhana untuk mengamati karakteristik dinamis yang terdiri dari dua pelat yang dihubungkan oleh baut tunggal dan baut ganda sudah dilakukan. Karakteristik dinamis dari pelat diperoleh dengan metode modal *impact testing*. Fungsi respon frekuensi pelat diamati dalam menganalisis efek kelonggaran. Variasi pengetatan pada torsi baut juga diberikan dalam mengamati karakteristik dinamis pelat tersebut [11].

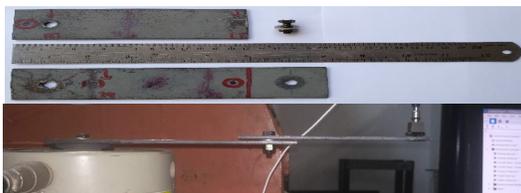
Dalam beberapa dekade terakhir, beberapa metode *Structural Health Monitoring* (SHM), khususnya metode akustik / ultrasonik, telah digunakan untuk mengidentifikasi status kondisi sambungan yang dibuat. Metode Vibro-Acoustic Modulation (VAM) yang didasarkan pada fitur ultrasonik non-linier telah membuktikan efisiensinya dalam pemantauan kelonggaran baut awal. Namun, beberapa kelemahan menghambat penggunaan praktisnya, VAM dimodifikasi agar dapat menghindari masalah yang ada dengan implementasi praktis dan juga memberikan sensitifitas yang lebih tinggi [12]. Huynh mengusulkan metode deteksi baru berbasis quasi-autonomus untuk mendeteksi baut yang longgar pada sambungan kritis. Dengan mengintegrasikan teknologi pembelajaran secara rinci dari teknik pemrosesan gambar [13]. Banyak teori telah dikembangkan dalam upaya untuk menggambarkan cara baut dan mur berinteraksi di bawah beban getaran. Untuk memprediksi pelonggaran baut, penting untuk terlebih dahulu mengidentifikasi pengaruh getaran terhadap kekuatan sambungan pada baut. Kelonggaran dilihat dari karakteristik dinamik yang terjadi pada struktur dan baut. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap struktur untuk mengamati apakah getaran pada struktur dapat menyebabkan kelonggaran atau berkurangnya keketatan sambungan baut. Pengujian dilakukan pada balok bebas-tetap yang terdiri dari dua balok yang dihubungkan oleh sebuah baut dan diberikan variasi torsi pengencangan baut. Kemudian dilakukan pengukuran respon dengan mencatat grafik FRF yang diperoleh dari efek kelonggaran dan pengencangan torsi baut. Parameter modal berupa frekuensi pribadi dan amplitudo spektrum getaran yang dikumpulkan melalui analisis modal eksperimental (EMA).

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan Metode *Experimental Modal Analysis (EMA)* menggunakan alat uji getaran *impact hammer* dan *shaker* di Laboratorium Dinamika struktur Universitas Andalas. Analisis modal secara teori menghasilkan model fisik dari sistem dinamik yang terdiri dari massa, kekakuan, dan faktor peredam. Alat eksitasi yang populer, yaitu *impulse hammer*, yang terdiri dari *hammer* dengan *transducer* gaya yang terpasang pada kepalanya. *Hammer* merupakan mekanisme eksitasi yang digunakan untuk memberikan pengaruh pada struktur sehingga bereksitasi dengan *range* frekuensi yang besar. Banyak variasi dari alat tersebut, dan biasanya yang digunakan pada *experimental modal analysis* adalah *piezoelectric transducer* baik untuk mengukur gaya eksitasi (*force transducers*) atau untuk mengukur respon getaran (akselerometer). Mekanisme akuisisi data dan pengolahan dilakukan untuk mengukur sinyal yang terbaca dari *transducer*, memastikan besaran, dan fase dari eksitasi serta respon. Analisis modal digunakan untuk menggali dan memperoleh parameter modal (frekuensi pribadi, rasio redaman dan modus getar) dari struktur. Adapun model struktur yang digunakan adalah dua buah balok baja yang disambung menggunakan baut dan mur dengan ukuran M10 yang di kunci dengan variasi torsi pengetatan. Pengujian *impact testing* dan *exciter test* dilakukan pada struktur dengan kondisi dan torsi pengetatan yang berbeda bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik struktur sambungan baut yang mengalami kelonggaran.

2.1. Pemodelan Sambungan Baut

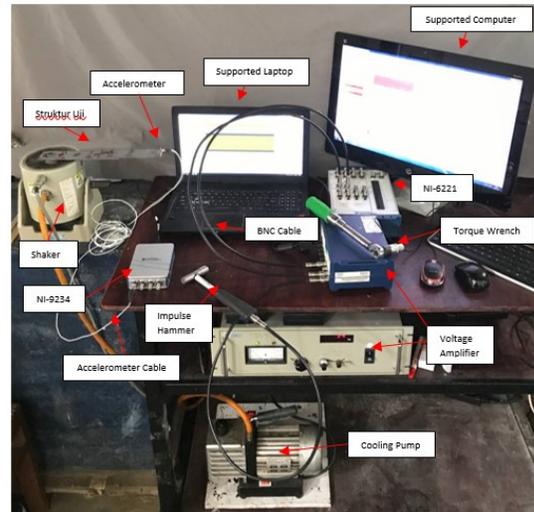
Sistem keseluruhan yang akan dimodelkan adalah dua balok baja tipis yang dihubungkan oleh baut, ring, dan mur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Model ini adalah modifikasi dari balok dengan tumpuan bebas-tetap (kantilever). Dua model sederhana dari balok bebas tetap dengan sambungan baut digunakan dalam penelitian ini. Balok yang ditunjukkan pada Gambar 1 terbuat dari baja yang dihubungkan oleh baut M10. Dimensi balok adalah lebar 50 mm, ketebalan 6 mm, dan total panjang balok yang terhubung adalah 450 mm.



Gambar 1. Balok sederhana yang disambung dengan baut

2.2. Instrumen Pengujian

Jenis Penelitian yang dilakukan adalah eksperimen deteksi kelonggaran baut dengan menggunakan metode eksperimental modal analisis, dapat dilihat pada Gambar 2.



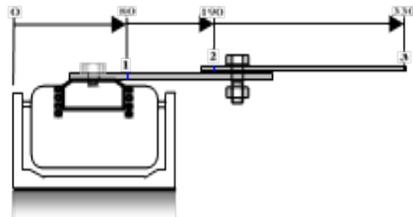
Gambar 2. Instrumen pengujian

Instrumen yang digunakan pada kaji eksperimental ini adalah *Shaker/Vibration Generator* (EMIC 512-A) untuk menggetarkan struktur dan *Power Amplifier* (EMIC Model 372-A/G) sebagai penguat sinyal *vibration generator*, *Impact hammer* (Omega IH-101) untuk pengujian karakteristik dinamik struktur dan *Voltage amplifier* (PCB-Piezotronics Type 482C05) sebagai penguat sinyal *Impact hammer*. Akselerometer (B&K Type 4508) untuk pengukuran percepatan dari getaran. Data dicuplik dengan menggunakan *Daq-Pad* (National Instrument type NI-6221 dan NI-9234). Sedangkan torsi kekencangan baut diukur menggunakan torsimeter (Tekiro-TR100).

2.3. Proses Pengambilan Data

Pengujian modal *impact* dan *exciter* dilakukan pada setiap tingkat torsi pengetatan. Fungsi respons frekuensi (*accelerance FRF*) kemudian diperoleh dengan pengukuran *single input-single output* (SISO). Posisi gaya *impact* dan akselerometer ditunjukkan pada Gambar 3. Model eksperimental dalam sambungan baut tunggal diilustrasikan pada Gambar 4. Pada sambungan baut tunggal, posisi baut berada di tengah balok, dikencangkan oleh berbagai torsi pengetatan; kondisi pelonggaran 1,5 Nm, 2,5 Nm, 5 Nm, dan 10 Nm. Torsi pengencangan diterapkan oleh kunci torsi mekanis untuk berbagai torsi dan kondisi pelonggaran. Setelah dikencangkan pada torsi tertentu, dilakukan pengujian getaran dengan menggunakan *exciter*. Struktur digetarkan pada frekuensi 20-21 Hz yang merupakan frekuensi pribadi kedua dari struktur dengan tujuan agar getaran yang besar mempercepat terjadinya proses pelonggaran.

Eksitasi dilakukan selama 30 menit dan data getaran yang terjadi dicuplik setiap 5 menit.

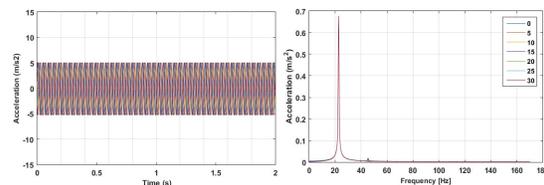


Gambar 3. Posisi *impact* (1 dan 2) pada struktur uji dan posisi akselerometer (3) pada struktur uji sambungan baut (satuan mm)

Untuk pengukuran karakteristik dinamik dari struktur, uji *Experimental Modal Analysis* (EMA) dilakukan dengan menggunakan *impact hammer*. Pemukulan struktur ditinjau pada dua titik dan dua kondisi. Kondisi Pertama, sebelum digetarkan pada setiap variasi torsi pengetatan untuk mendapatkan kondisi awal dari struktur sebelum mengalami getaran. Kondisi kedua, pencuplikan data pada saat sesudah digetarkan menggunakan exciter selama 30 menit pada dua titik posisi pemukulan. Rasio redaman dihitung dengan metode pengambilan puncak di setiap puncak respons frekuensi.

2.4. Fast Fourier Transform

Fast Fourier Transform merupakan suatu metode untuk mentransformasikan sinyal dalam bentuk domain waktu menjadi bentuk domain frekuensi, dimana domain waktu memandang getaran sebagai amplitudo terhadap waktu, yang memberikan fenomena getaran secara fisik. Oleh karena itu perlu untuk dikonversi ke dalam bentuk Domain Frekuensi agar didapat informasi berapa banyak sinyal terletak di dalam setiap pita frekuensi yang diberikan pada rentang frekuensi, sehingga didapatkan nilai frekuensi pribadi. Metode yang dapat digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi salah satunya dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Contoh domain waktu dan domain frekuensi dapat dilihat pada Gambar 4. Pada penelitian ini, getaran dari struktur pada saat digetarkan diukur dengan akselerometer dan amplitudo getaran diambil dari puncak spektrum pada frekuensi eksitasi yang diberikan.

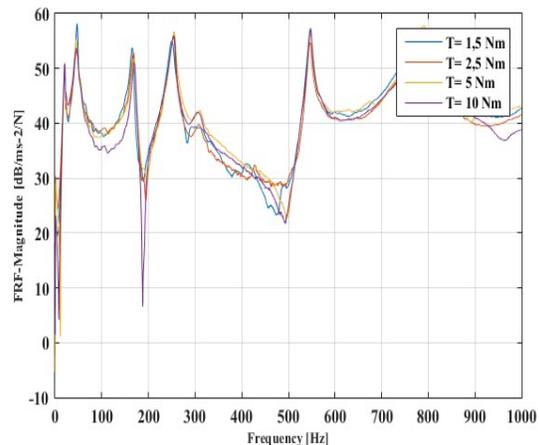


Gambar 4. Domain Waktu dan Domain Frekuensi

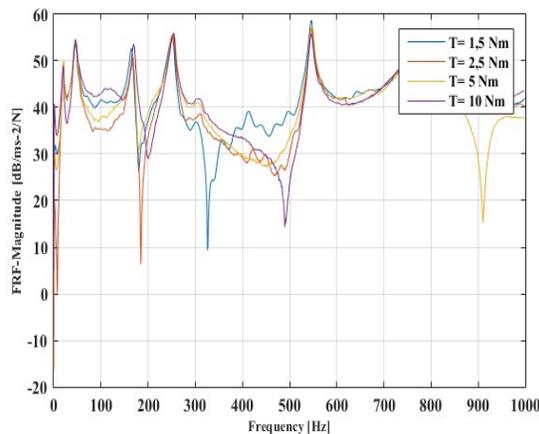
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian FRF dengan menggunakan *Impact testing* sebelum dan sesudah digetarkan dapat dilihat

pada Gambar 5 dan Gambar 6 secara berturut-turut. FRF didapatkan dari posisi pemukulan di titik 1 dan posisi akselerometer di titik 3. Hasil *Impact testing* ini digunakan untuk melihat dan mengidentifikasi frekuensi pribadi dari struktur dan mengamati adanya penurunan kekakuan penguncian setelah mengalami eksitasi setelah beberapa waktu.



Gambar 5. Grafik FRF hasil pengujian posisi *impact test* di titik-1 variasi torsi pengencangan sebelum digetarkan menggunakan exciter



Gambar 6. Grafik FRF hasil pengujian posisi *impact test* di titik-1 variasi torsi pengencangan setelah digetarkan menggunakan exciter

Pada penelitian sebelumnya didapatkan bahwa frekuensi pribadi memiliki kecenderungan peningkatan terhadap variasi torsi yang diberikan [11]. Perbandingan nilai frekuensi pribadi terhadap variasi torsi pengencangan adalah berbanding lurus. Semakin besar torsi yang diberikan maka nilai frekuensi pribadi mengalami sedikit kenaikan khususnya pada frekuensi pribadi yang lebih tinggi. Sebaliknya, penurunan kekakuan sambungan baut akan menaikkan rasio redaman dari struktur secara keseluruhan. Secara lebih detail dari Gambar 5 dan 6, perbandingan hasil nilai frekuensi pribadi terhadap variasi torsi pada posisi pemukulan di titik 1 dan akselerometer di titik 3 dapat dilihat pada Tabel 1.

sampai Tabel 4. Analisis perubahan nilai frekuensi pribadi tidak dapat dilakukan hanya pada satu frekuensi pribadi saja, namun harus melihat perubahan nilai frekuensi pribadi lainnya.

Tabel 1. Frekuensi pribadi pada posisi *impact test* di titik-1 sebelum digetarkan menggunakan Exciter

Mode Number	Natural Frequency (Hz)			
	1,5 Nm	2,5 Nm	5 Nm	10 Nm
1	1,5	1,5	2	1,5
2	21	21	20,5	21
3	47	46	45,5	46
4	165,5	168	168,5	169,5
5	250	254	255	254,5
6	547,5	546,5	548	547
7	778	799,6	790,6	800,6

Tabel 2. Frekuensi pribadi pada posisi *impact test* di titik-1 setelah digetarkan menggunakan Exciter

Mode Number	Natural Frequency (Hz)			
	1,5 Nm	2,5 Nm	5 Nm	10 Nm
1	3	1,5	1,5	1,5
2	21	21	20,5	20
3	46	46	46	46,5
4	165	168	168	169,5
5	251	251,5	254,5	253,5
6	546	546	547,5	546
7	782,1	801,1	788,1	798,6

Tabel 3. Frekuensi pribadi pada posisi *Impact Test* di titik-2 sebelum digetarkan menggunakan Exciter

Mode Number	Natural Frequency (Hz)			
	1,5 Nm	2,5 Nm	5 Nm	10 Nm
1	2	1,5	2	1,5
2	20	20,5	20	20
3	165	168	167,5	169
4	251	255	255,5	255
5	546	546	547	546,5

Tabel 4. Frekuensi pribadi pada posisi *impact test* di titik-2 setelah digetarkan menggunakan exciter

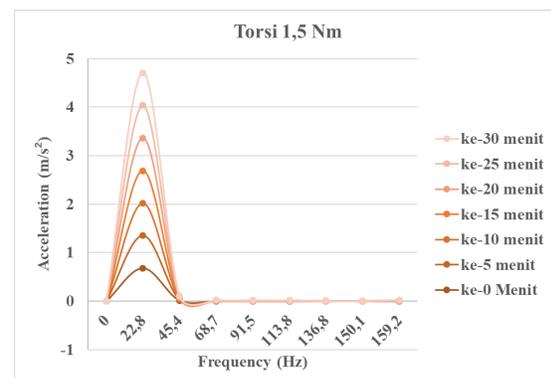
Mode Number	Natural Frequency (Hz)			
	1,5 Nm	2,5 Nm	5 Nm	10 Nm
1	3	1,5	1	1,5
2	21	20,5	20,5	20,5
3	165	167,5	168	168,5
4	252	253,5	255,5	254,5
5	546	545	547	546

Dari Tabel 1 sampai Tabel 4 dapat dilihat bahwa perubahan nilai frekuensi pribadi cenderung meningkat terhadap penambahan torsi, terutama pada frekuensi pribadi yang lebih tinggi (frekuensi pribadi ke-3, ke-4 dan ke-5). Perbedaan tersebut tidak terlalu terlihat secara signifikan pada frekuensi pribadi yang lebih rendah.

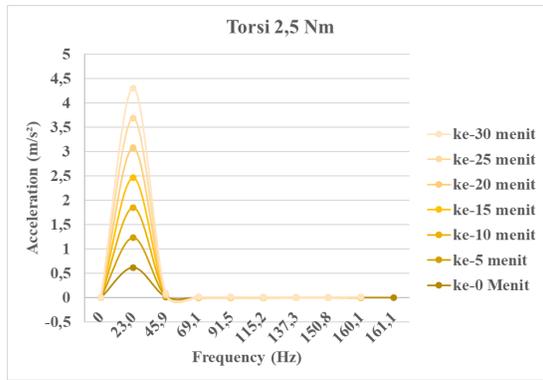
Secara sederhana dapat dianalisis bahwa kedua pelat yang disambung memungkinkan memiliki *clearance* antar permukaan dan mengalami kontak permukaan yang besar pada bagian yang lainnya. Kontak permukaan yang besar ini mempengaruhi nilai

frekuensi pribadi struktur dan juga redaman. Kontak permukaan akan berpengaruh terhadap kekakuan kontak dan memungkinkan kenaikan redaman akibat getaran dan *impact* kontak yang terjadi. Pada frekuensi pribadi ke delapan nilai frekuensi pribadi struktur tidak dapat terbaca karena nilainya melebihi *frequency span* (1000 Hz) pada pengaturan sebelum pengujian. *Frequency Respon Function* (FRF) yang dihasilkan pada pengujian struktur sambungan baut tunggal adalah 7 grafik FRF di setiap variasi kekencangan.

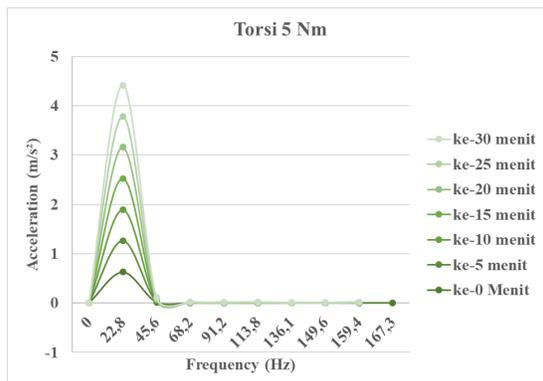
Detail lebih lanjut tentang puncak frekuensi ditampilkan di Tabel 1. Frekuensi pribadi dalam modus pertama tidak ditampilkan memiliki perubahan signifikan dalam torsi yang berbeda. Pergeseran frekuensi pribadi diamati dengan jelas dalam modus frekuensi yang lebih tinggi, khususnya pada mode 4 hingga 7. Ini berarti bahwa deteksi pelonggaran baut menjadi jauh lebih mudah dengan mengevaluasi respons frekuensi tinggi karena pergeseran respons puncak yang signifikan dalam frekuensi tinggi akan mudah dideteksi. Hal ini ditunjukkan dengan jelas ketika sambungan yang dibuat dilonggarkan, kekakuan sambungan berkurang, dan pengurangan kekakuan menyebabkan pergeseran signifikan dari puncak resonansi frekuensi tinggi ke frekuensi yang lebih rendah. Selain itu, efek kelonggaran atau torsi pengencangan juga dapat diamati oleh rasio redaman struktur. Selanjutnya untuk menganalisis pengaruh getaran terhadap terjadinya pelonggaran pada sambungan baut juga dapat diamati pada Gambar 7 sampai Gambar 10. Struktur digetarkan pada frekuensi pribadi kedua struktur di sekitar 22-23 Hz. Struktur digetarkan dengan *exciter* selama 30 menit dengan amplitudo eksitasi yang tetap. Data Getaran dicuplik setiap lima menit selama struktur dieksitasi. Pada keempat gambar tersebut terlihat bahwa semakin lama struktur digetarkan pada masing-masing torsi pengencangan terlihat besar amplitudo getaran pada struktur, secara umum semakin tinggi. Ini salah satu indikasi yang menunjukkan bahwa semakin lama struktur mengalami getaran, ada gejala pelonggaran yang terjadi pada sambungan baut.



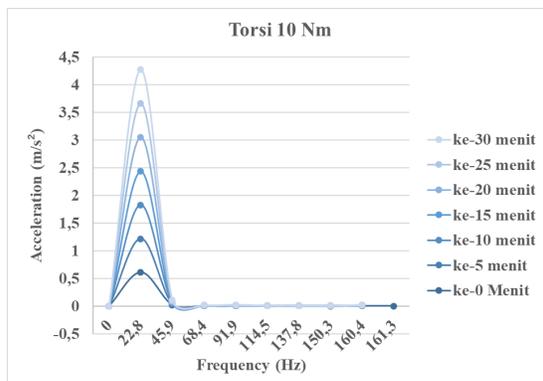
Gambar 7. Amplitudo getaran pada torsi pengencatan 1,5 Nm pada sambungan baut pengujian menggunakan *exciter*.



Gambar 8. Amplitudo getaran pada torsi pengetatan 2,5 Nm pada sambungan baut pengujian menggunakan Exciter.



Gambar 9. Amplitudo getaran pada torsi pengetatan 5 Nm pada sambungan baut pengujian menggunakan Exciter.



Gambar 10. Amplitudo getaran pada torsi pengetatan 10 Nm pada sambungan baut pengujian menggunakan Exciter.

Hal ini jika diindikasikan oleh adanya penurunan frekuensi pribadi pada modus getar atau frekuensi pribadi yang lebih tinggi seperti yang telah ditunjukkan oleh Tabel 1-4. Pada tabel-tabel tersebut terlihat adanya penurunan frekuensi pribadi khususnya pada frekuensi pribadi ke-4 dan ke-5. Pada semua variasi torsi penguncian frekuensi pribadi ke-4 dan ke-5 mengalami penurunan frekuensi sekitar 0,5 sampai 2,5 Hz. Penurunan ini tidak nampak terlihat dengan jelas pada frekuensi pribadi yang lebih rendah. Besar kemungkinan disebabkan oleh penurunan kekakuan struktur yang terjadi tidak cukup signifikan untuk

dapat menurunkan kekakuan struktur dan menurunkan frekuensi pribadi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan untuk struktur uji sambungan 1 baut dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Nilai frekuensi pribadi berbanding lurus terhadap penambahan nilai torsi pengencangan baut. Semakin besar torsi pengencangan yang diberikan maka semakin besar nilai frekuensi pribadi sistem dan sebaliknya. Perubahan nilai frekuensi terhadap variasi torsi pengencangan dipengaruhi oleh beban awal sambungan baut yang dapat merubah kekakuan struktur pada sambungan.

2. Beban getaran pada struktur secara signifikan dapat menurunkan tingkat kekakuan pada sambungan baut yang terlihat dari penurunan frekuensi pribadi pada frekuensi pribadi atau modus getar lebih tinggi

Daftar Rujukan

- [1] G. H. Junker, "New criteria for self-loosening of fasteners under vibration," *SAE Tech. Pap.*, pp. 314–335, 1969, doi: 10.4271/690055.
- [2] T. Sakai, "NII-Electronic Library Service," *Chem. Pharm. Bull.*, vol. 3, no. 1, 1978.
- [3] Yoshimi and M. Tsutsumi, "Determination of mathematical models for normal static stiffness of joints," *Chem. Pharm. Bull.*, no. 43, p. 2091, 2002.
- [4] J. X. Yuan and X. M. Wu, "Identification of the Joint Structural Parameters of Machine Tool by DOS and FEM," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 107, no. 1, pp. 64–69, 1985, doi: 10.1115/1.3185967.
- [5] C. Dekoninck, "Deformation properties of metallic contact surfaces of joints under the influence of dynamic tangential loads," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 193–199, 1972, doi: 10.1016/0020-7357(72)90020-0.
- [6] M. Burdekin, N. Back, and A. Cowley, "Analysis of the Local Deformations in Machine Joints.," *J Mech Eng Sci*, vol. 21, no. 1, pp. 25–32, 1979, doi: 10.1243/JMES_JOUR_1979_021_006_02.
- [7] B. Kenny and E. A. Patterson, "Stress Analysis Of Some Nut-Bolt Connections With Modifications To The Nut Thread Form," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 20, no. 1, pp. 35–40, 1985, doi: 10.1243/03093247V201035.
- [8] R. C. J. Dr. G. Ed Ramey, "Experimental Analysis of Thread Movement in Bolted Connections Due to Vibrations," *Spec. Proj. Div. Marshall Sp. Flight Center, NASA*, 1995.
- [9] N. G. Pai and D. P. Hess, "Influence of fastener placement on vibration-induced loosening," *J. Sound Vib.*, vol. 268, no. 3, pp. 617–626, 2003, doi:10.1016/S0022-460X(03)00369-9.
- [10] R. A. Ibrahim and C. L. Pettit, "Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners," *J. Sound Vib.*, vol. 279, no. 3–5, pp. 857–936, 2005, doi: 10.1016/j.jsv.2003.11.064.

- [11] M. Rusli, C. Mardianto, and M. Bur, "Experimental analysis of bolt loosening dynamics characteristic in a beam by impact testing," *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 175–180, 2018.
- [12] F. Wang and G. Song, "Bolt early looseness monitoring using modified vibro-acoustic modulation by time-reversal," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 130, pp. 349–360, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.04.036.
- [13] T. C. Huynh, J. H. Park, H. J. Jung, and J. T. Kim, "Quasi-Autonomous Bolt-Loosening Detection Method Using Vision-Based Deep Learning And Image Processing," *Autom. Constr.*, vol. 105, no. February, p. 102844, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102844.
- [14] Bur, M. 2012. Dasar-dasar Getaran Mekanik. CV.Ferila: Padang.
-