



Semarak International Journal of Applied Sciences and Engineering Technology

Journal homepage:
<https://semarakilmu.my/index.php/sijaset/index>
ISSN: 3030-5314



Penilaian Sifat Dinamik Lekapan Getah di bawah Syarat Beban Pra-Statik Pelbagai

Evaluation of the Dynamic Properties of Rubber Mounts under Varying Pre-Static Loading Conditions

Thian Pien Ooi¹, Norwahida Yusoff¹, Lu Ean Ooi^{1,*}

¹ School of Mechanical Engineering, Kampus Kejuruteraan Tuanku Syed Sirajuddin, Universiti Sains Malaysia, 14300 Nibong Tebal, Pulau Pinang, Malaysia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 March 2026

Received in revised form 26 May 2026

Accepted 2 June 2026

Available online 15 July 2026

ABSTRACT

Kajian ini memfokuskan kepada penilaian sifat-sifat lekapan getah di bawah pengaruh beban pra-statik. Sifat dinamik bahan viskoelastik seperti getah adalah bersandarkan frekuensi dan dipengaruhi oleh perbezaan beban pra-statik yang dikenakan. Eksperimen ini direkabentuk dan dimodelkan sebagai sistem darjah kebebasan tunggal (SDOF) dalam kajian getaran. Variasi beban pra-statik dilaksanakan menggunakan beberapa blok silinder dengan diameter seragam tetapi mempunyai ketinggian dan jisim yang berbeza. Dapatan kajian menunjukkan bahawa hubungan antara sifat lekapan getah dan beban pra-statik berubah mengikut rantau frekuensi yang berbeza. Pada julat frekuensi di bawah frekuensi asli, nilai Fungsi Respons Frekuensi (FRF) meningkat seiring dengan peningkatan beban pra-statik, di mana jisim beban yang lebih besar memberikan kesan yang lebih signifikan. Bagi julat frekuensi asli, nilai FRF meningkat sehingga mencapai tahap maksimum yang menunjukkan frekuensi asli sistem tersebut. Sebaliknya, pada julat di atas frekuensi asli, peningkatan beban pra-statik menyebabkan penurunan nilai FRF. Dari aspek kekakuan bersandarkan frekuensi, didapati bahawa semakin besar jisim beban pra-statik, semakin rendah nilai kekakuan pada semua julat frekuensi, kecuali di sekitar frekuensi resonans. Selain itu, perbandingan pada titik resonans bagi setiap sistem menunjukkan bahawa faktor kehilangan lekapan getah berkurangan apabila beban pra-statik meningkat.

This study focuses on evaluating the characteristics of rubber mounts under the influence of pre-static loading. The dynamic properties of viscoelastic materials, such as rubber, are frequency-dependent and significantly affected by variations in the applied pre-static load. In this vibration study, the experiment is designed and modeled as a single-degree-of-freedom (SDOF) system. Variations in pre-static loading are implemented using several cylindrical blocks with uniform diameters but varying heights and masses. The findings indicate that the relationship between rubber mount properties and pre-static loading shifts across different frequency regions. In the frequency range below the natural frequency, the Frequency Response Function (FRF)

Keywords:

* Corresponding author.

E-mail address: ooiluean@usm.my

Lekapan getah; bahan viskoelastik; beban pra-statik; Fungsi Respons Frekuensi (FRF); kekakuan dinamik; faktor kehilangan

Rubber mounts; viscoelastic materials; static preload; Frequency Response Function (FRF); dynamic stiffness; loss factor

values increase as the pre-static load increases, with larger masses producing more significant effects. Within the natural frequency range, the FRF value increases until it reaches a maximum peak, identifying the system's resonance. Conversely, in the range above the natural frequency, an increase in pre-static loading leads to a decrease in FRF values. Regarding frequency-dependent stiffness, it was observed that a higher pre-static mass results in lower stiffness values across all frequency ranges, except in the vicinity of the resonance frequency. Furthermore, a comparison at the resonance points for each system reveals that the loss factor of the rubber mount decreases as the pre-static load increases.

1. Pendahuluan

Lekapan getah atau lekapan anti-getaran merupakan komponen kritikal dalam pemencilan hingar dan getaran bagi jentera berat serta peralatan industri. Kepopularan lekapan getah berbanding alternatif lain didorong oleh kelebihanannya yang kompak, kos rendah, bebas penyelenggaraan, dan berkesan. Dari sudut material, lekapan ini diperbuat daripada elastomer yang memiliki sifat viskoelastik, iaitu gabungan ciri likat dan elastik semasa mengalami ubah bentuk [1]. Sifat dinamik bahan viskoelastik ini sangat dipengaruhi oleh parameter luaran seperti beban pra-statik, amplitud getaran, frekuensi, dan suhu [1]. Keupayaan bahan ini untuk berubah bentuk secara perlahan di bawah daya luaran dan kembali ke bentuk asal selepas daya dialihkan menjadikannya penyerap hentakan yang sangat efisien [1,2].

Kepentingan mengkaji sifat dinamik, khususnya kekakuan dinamik dan faktor kehilangan, telah ditekankan oleh ramai penyelidik kerana ia menggambarkan keupayaan bahan dalam menyerap tenaga mekanikal [3]. Pelbagai kaedah pengukuran telah diperkenalkan, antaranya kaedah getaran bebas, getaran paksa resonans, dan kaedah perambatan gelombang [4]. Dalam konteks lekapan enjin, kaedah kekakuan kompleks sering digunakan kerana ia mampu mewakili bahan seperti getah dengan tepat [3,5]. Selain itu, kaedah gelung histeresis turut diaplikasikan untuk mengenal pasti sifat ketidaklinearan lekapan getah melalui perubahan bentuk gelung daripada elips kepada bentuk-S [6,7]. Walau bagaimanapun, kebanyakan kaedah ini memerlukan persediaan makmal yang kompleks dan sukar untuk aplikasi praktikal.

Sebagai alternatif, teknik impak telah dicadangkan oleh beberapa penyelidik kerana ringkas, berkuasa, dan mampu memberikan keputusan dalam masa yang singkat [8-10]. Ooi dan Ripin [10] menyatakan bahawa ujian impak adalah lebih mudah dan pantas untuk aplikasi masa nyata tanpa memerlukan persediaan yang rumit. Namun, cabaran utama teknik ini adalah kawalan terhadap daya pengujian.

Satu aspek yang kritikal dalam sistem lekapan anti-getaran ialah pengaruh beban pra-statik, terutamanya dalam bidang automotif di mana lekapan perlu menyokong berat enjin secara berterusan [11,12]. Penggunaan kaedah eksperimen bagi mencirikan kekakuan dinamik terus menjadi tumpuan utama [13] Meskipun penting, literatur yang memfokuskan kesan beban pra-statik terhadap sifat dinamik masih terhad. Kajian terdahulu menunjukkan hasil yang berbeza. Kari [14] mendapati kekakuan pemacu meningkat seiring dengan beban pra-statik pada frekuensi melebihi 500 Hz. Kajian baharu mendapati frekuensi asli pad landasan terjejas secara signifikan oleh beban pra-statik pada tahap rendah hingga sederhana [15]. Walau bagaimanapun, kesan beban pra-statik terhadap faktor kehilangan dan julat frekuensi resonans masih kurang dibincangkan secara mendalam [1,11].

Oleh itu, kajian ini mencadangkan penggunaan teknik impak untuk menilai sifat dinamik lekapan getah di bawah pelbagai keadaan beban pra-statik. Variasi beban diaplikasikan menggunakan blok silinder dengan ketinggian dan berat yang berbeza. Kekakuan bersandarkan frekuensi dan faktor kehilangan akan diukur dan disahkan menggunakan dua jenis lekapan getah yang berbeza.

Seterusnya, teknik pemadanan keluk digunakan untuk memodelkan sifat tersebut bagi menghasilkan semula fungsi respons frekuensi (FRF). Hasil kajian ini dijangka dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai kesan beban pra-statik terhadap prestasi lekapan getah dalam rejim linear dan tidak linear.

2. Metodologi

2.1 Permodelan Teori dan Asas Dinamik

Eksperimen ini direkabentuk berdasarkan sistem darjah kebebasan tunggal (SDOF) bagi mengkaji kesan beban pra-statik dalam arah menegak. Sistem lekapan getah enjin dimodelkan menggunakan pendekatan modular kompleks [5], di mana sifat dinamik ditakrifkan sebagai respons getaran serta-merta terhadap daya pengujaan sinusoidal [4]. Pendekatan ini sering digunakan dalam pencirian dinamik elemen kenyal seperti bahan viskoelastik [1,9,10]. Melalui kaedah ini, kekakuan kompleks yang dihasilkan adalah bersandarkan frekuensi. Persamaan gerakan (EOM) yang mewakili sistem eksperimen ini adalah seperti berikut:

$$[-m\omega^2 + k(\omega)(1 + j\eta(\omega))]x(\omega) = F(\omega) \quad (1)$$

di mana $F(\omega)$ ialah daya yang dikenakan (kN), $x(\omega)$ ialah sesaran (mm), m ialah beban pra-statik (kg), $k(\omega)$ ialah kekakuan bersandarkan frekuensi (kN/mm), $\eta(\omega)$ ialah factor kehilangan, dan ω ialah frekuensi (rad/s).

Kekakuan dinamik, k , yang ditakrifkan sebagai nisbah bersandarkan frekuensi antara daya input kepada sesaran [18], boleh diperolehi secara eksperimen melalui persamaan:

$$k = \frac{F(\omega)}{x(\omega)} = k(\omega)[-m\omega^2 + k(\omega)(1 + j\eta)] \quad (2)$$

Daripada Eq. (1), Fungsi Respons Frekuensi (FRF) bagi sistem SDOF boleh diterbitkan dengan nisbah sesaran kepada daya, $(x(\omega)/F(\omega))$:

$$FRF = \frac{1}{k(\omega)[(1-r^2) + j\eta(\omega)]} \quad (3)$$

di mana $r = \omega/\omega_n$ adalah nisbah frekuensi dan $\omega_n = \sqrt{k/m}$ merupakan frekuensi asli yang ditentukan daripada ukuran FRF. Memandangkan FRF merupakan fungsi kompleks, ia terdiri daripada bahagian nyata, $Re(FRF)$ dan bahagian khayalan, $Im(FRF)$. Seterusnya, kekakuan bersandarkan frekuensi, $k(\omega)$, dan faktor kehilangan, $\eta(\omega)$, boleh dikira menggunakan hubungan berikut:

$$k(\omega) = \frac{Re(FRF)}{|FRF|^2(1-r^2)} \quad (4)$$

$$\eta(\omega) = -\frac{Im(FRF)}{Re(FRF)}(1-r^2) \quad (5)$$

Secara teorinya, perubahan pada jisim beban pra-statik (m) akan mengubah profil FRF, yang seterusnya menghasilkan nilai $k(\omega)$ dan η yang berbeza. Kesan variasi beban ini akan dianalisis melalui pemerubahan parameter-parameter tersebut.

2.2 Prosedur Eksperimen dan Persediaan Ujian

Rajah 1 menunjukkan persediaan eksperimen bagi melaksanakan teknik impak. Sebelum setiap sesi pengukuran dimulakan, proses penentukur dilakukan bagi memastikan ketepatan data. Peralatan utama yang digunakan terdiri daripada penganalisis spektrum (LMS Spectral Analyzer), penerima pecutan (Kistler, jenis 8776A50), tukul impak (Kistler, jenis 9724A5000), dan penguat cas berbilang saluran (Kistler, jenis 5070). Dua jenis lekapan getah enjin pemotong rumput daripada jenama berbeza digunakan, di mana setiap jenis diwakili oleh tiga unit sampel. Beban pra-statik yang diaplikasikan dalam kajian ini mempunyai jisim 0.90 kg, 2.44 kg, 3.26 kg dan 4.26 kg.

Daya impak dikenakan pada permukaan atas beban pra-statik melalui ketukan serta-merta menggunakan tukul impak. Bagi menjamin kebolehpercayaan data, purata tiga bacaan diambil bagi setiap variasi beban dan jenis lekapan. Daya impak dikawal secara konsisten pada tahap kira-kira 0.30 N bagi kesemua set data. Selain itu, fungsi koheren dipantau bagi mengesahkan kualiti pengukuran FRF, di mana nilai yang menghampiri uniti (1.0) menunjukkan kualiti data yang tinggi berbanding nilai input daya.



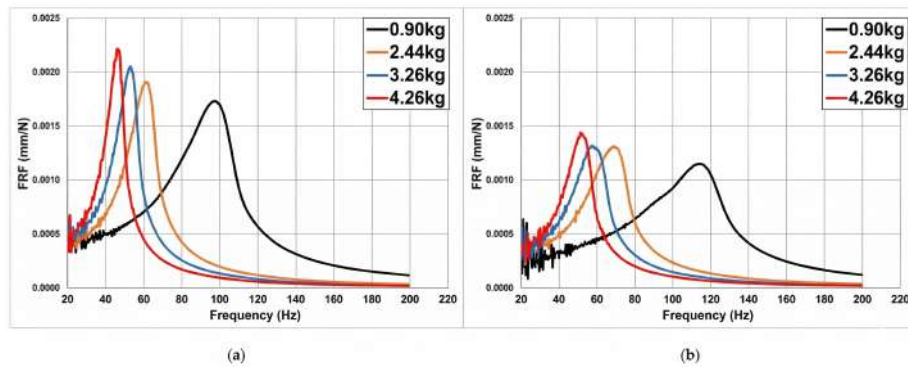
Rajah 1. Persediaan eksperimen teknik impak

Eksperimen ini diulangi menggunakan lekapan getah yang mempunyai dimensi yang sama tetapi ciri-ciri material yang berbeza (seperti kekakuan dan frekuensi asli) bagi tujuan pengesanan data. Lekapan getah dikategorikan sebagai 'RA' dan 'RB' untuk memudahkan analisis perbandingan kesan beban pra-statik terhadap sifat dinamik masing-masing.

3. Keputusan dan Perbincangan

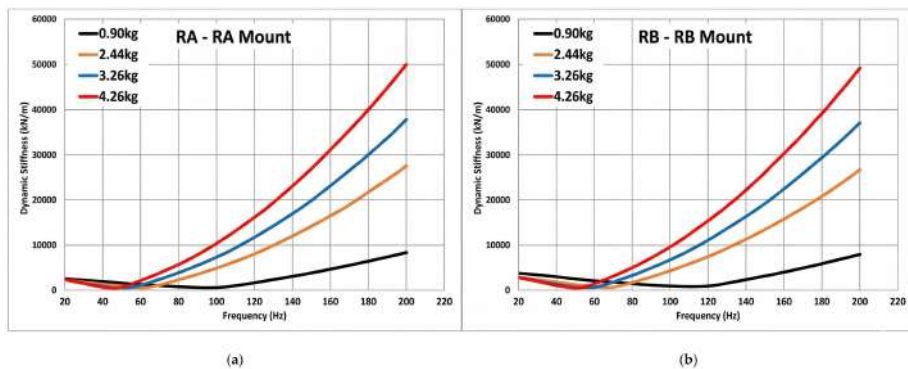
Merujuk kepada Rajah 2, dapat diperhatikan bahawa perubahan beban pra-statik yang dikenakan ke atas lekapan getah mengakibatkan anjakan pada frekuensi yang menghasilkan amplitud puncak FRF. Anjakan ini menandakan perubahan pada frekuensi asli sistem tersebut. Trend yang sama turut dikesan dalam Rajah 3, di mana frekuensi yang menghasilkan nilai kekakuan dinamik minimum sepadan dengan frekuensi asli sistem. Pemerhatian ini selaras dengan dapatan oleh Ooi dan Ripin [10], yang menyatakan bahawa penambahan jisim beban akan merendahkan frekuensi asli sistem SDOF.

Melalui pemerhatian terhadap Rajah 3, didapati bahawa pada rantau frekuensi di bawah frekuensi asli (di mana kekakuan minimum berlaku), perubahan kekakuan dinamik di bawah pengaruh beban pra-statik adalah kurang signifikan berbanding dengan rantau di atas frekuensi asli. Sebaliknya, merujuk kepada Rajah 2, profil FRF, iaitu salingan kepada kekakuan dinamik, menunjukkan perubahan yang sangat ketara pada rantau di atas frekuensi asli, manakala perubahan pada rantau di bawah frekuensi asli adalah lebih kecil. Trend dan pemerhatian ini selaras dengan dapatan kajian oleh Ooi dan Ripin [10]. Bagi mendalami kesan jisim beban pra-statik terhadap sifat lekapan getah secara lebih terperinci, teknik pepadanan keluk telah dilaksanakan. Langkah ini bertujuan untuk memodelkan hubungan antara frekuensi dan sifat dinamik bagi membolehkan simulasi prestasi lekapan dalam pelbagai senario beban.

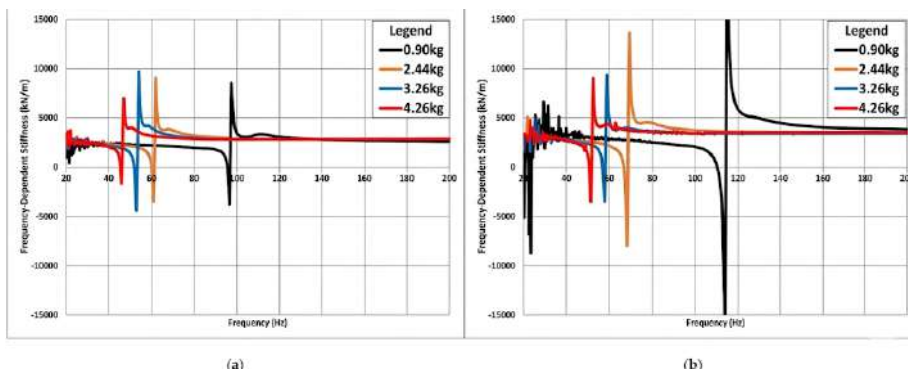


Rajah 2. Kesan beban pra-statik terhadap Fungsi Respons Frekuensi (FRF): (a) RA dan (b) RB

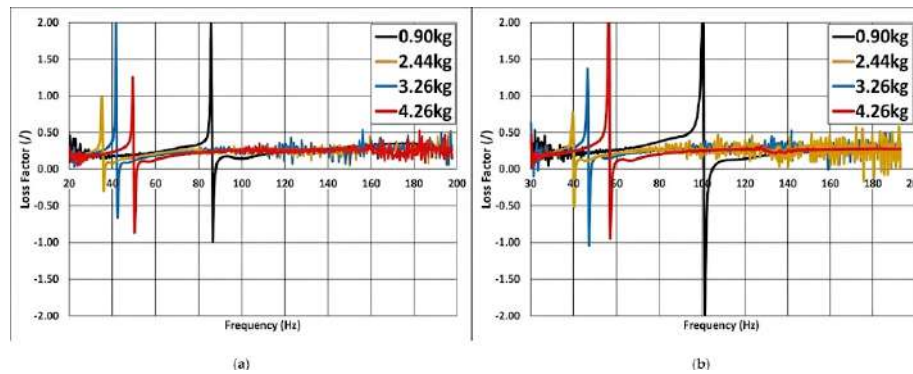
Sifat dinamik material viskoelastik, iaitu kekakuan bersandarkan frekuensi, $k(\omega)$ dan faktor kehilangan, $\eta(\omega)$, dikira menggunakan Persamaan (4) dan (5). Hasil pengiraan tersebut diplotkan seperti dalam Rajah 4 dan Rajah 5. Daripada Rajah 4, didapati bahawa pada julat frekuensi di luar zon resonans, peningkatan jisim beban pra-statik cenderung mengurangkan nilai kekakuan bersandarkan frekuensi. Walau bagaimanapun, profil kekakuan menunjukkan ketidakstabilan yang ketara pada titik resonans bagi setiap beban, yang merupakan ciri lazim dalam pengiraan berasaskan model SDOF apabila penyebut dalam persamaan menghampiri sifar.



Rajah 3. Kesan beban pra-statik terhadap kekakuan dinamik: (a) RA dan (b) RB



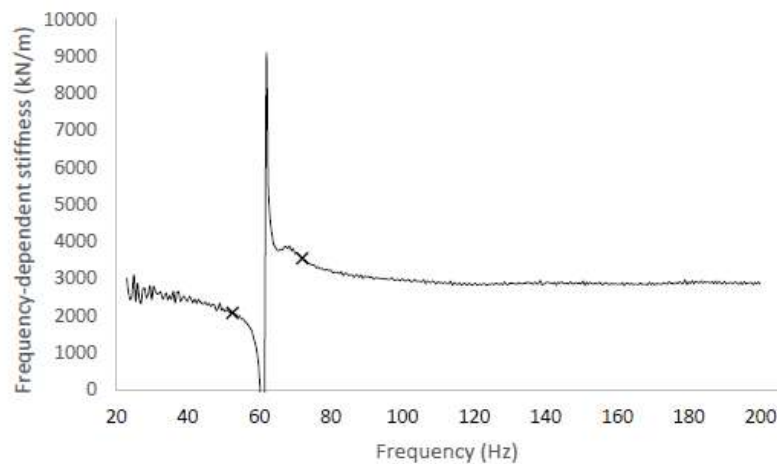
Rajah 4. Kesan beban pra-statik terhadap kekakuan bersandarkan frekuensi: (a) RA dan (b) RB



Rajah 5. Kesan beban pra-statik terhadap faktor kehilangan berdasarkan frekuensi: (a) RA dan (b) RB

Rajah 5 mempamerkan trend faktor kehilangan bagi RA dan RB. Secara keseluruhannya, faktor kehilangan menunjukkan nilai yang relatif stabil pada julat frekuensi tinggi, namun mengalami variasi drastik pada frekuensi rendah dan sekitar titik resonans. Peningkatan beban pra-statik didapati memberikan kesan terhadap keupayaan pelepasan tenaga lekapan, di mana perbandingan pada frekuensi asli menunjukkan penurunan faktor kehilangan apabila beban meningkat. Secara keseluruhannya, kedua-dua jenis lekapan getah (RA dan RB) menunjukkan trend yang konsisten, sekaligus mengesahkan bahawa beban pra-statik merupakan parameter kritikal yang mengubah prestasi dinamik sistem isolasi getaran secara signifikan.

Teknik pemadanan keluk diaplikasikan untuk memodelkan fungsi persamaan bagi sifat dinamik lekapan getah. Langkah ini perlu dilaksanakan memandangkan pengiraan teoretikal bagi kekakuan berdasarkan frekuensi dan faktor kehilangan menghasilkan nilai infiniti atau ralat yang besar pada frekuensi asli (seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4 dan Rajah 5). Fenomena ini disebabkan oleh ralat matematik atau ketunggalan yang membawa kepada pengiraan nilai yang tidak tepat pada titik frekuensi asli. Oleh itu, kaedah permodelan persamaan dan pemadanan keluk yang sesuai digunakan bagi menghasilkan graf yang lebih jelas untuk menentukan nilai kekakuan dan faktor kehilangan pada frekuensi resonans dengan lebih jitu [10]. Kaedah pemadanan keluk polinomial telah dipilih untuk mendapatkan fungsi bagi kekakuan berdasarkan frekuensi, $k(\omega)$, dan faktor kehilangan, $\eta(\omega)$, di bawah pelbagai keadaan beban pra-statik. Bagi parameter $k(\omega)$, proses pemadanan keluk dibahagikan kepada tiga rantau frekuensi utama: bawah frekuensi asli, sekitar frekuensi asli, dan atas frekuensi asli. Pengasingan prosedur ini adalah perlu kerana setiap rantau menunjukkan trend dan ciri data yang berbeza. Julat bagi setiap rantau ditentukan berdasarkan spektrum pecutan respons, di mana had atas dan bawah dipilih pada tahap kira-kira separuh daripada amplitud maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh penanda pangkah (x) dalam Rajah 6 [9,10].

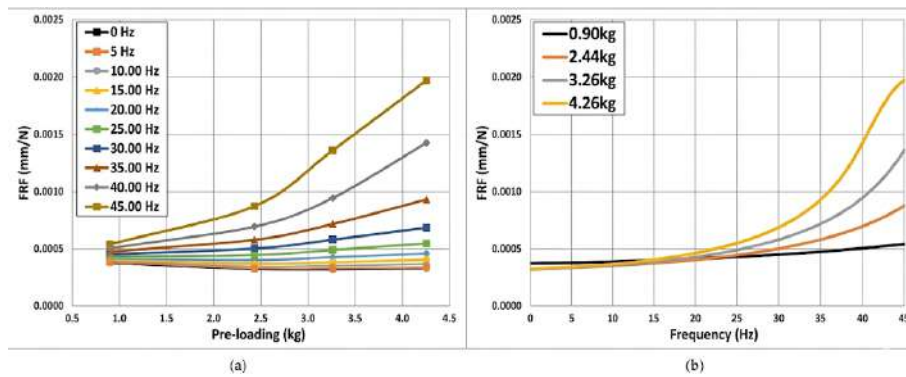


Rajah 6. Kekakuan berdasarkan frekuensi untuk RA yang diukur pada 2.44 kg

Seterusnya, teknik pemadanan keluk dilaksanakan ke atas nilai faktor kehilangan yang diukur bagi setiap jenis lekapan getah dan variasi jisim beban pra-statik. Berdasarkan pemerhatian, fungsi faktor kehilangan terhadap frekuensi didapati berkelakuan sebagai fungsi linear [9,10]. Oleh itu, model pemadanan keluk polinomial tertib pertama (1st order) adalah memadai untuk menghasilkan fungsi keluk berasaskan persamaan bagi faktor kehilangan melawan frekuensi.

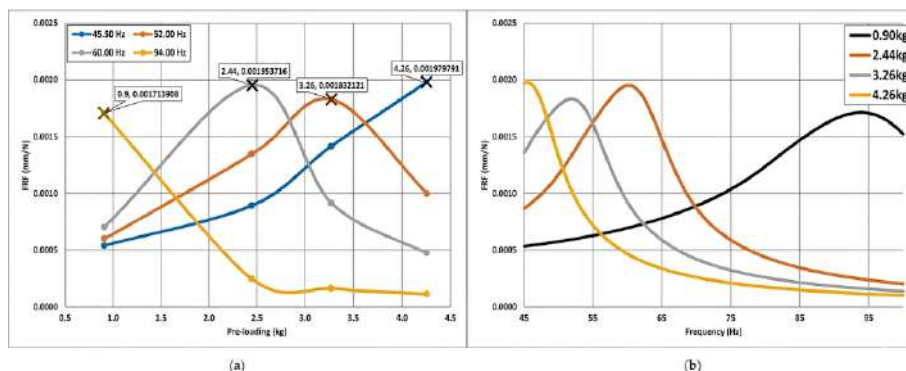
Bagi mengesahkan ketepatan nilai faktor kehilangan yang diperolehi melalui teknik pemadanan keluk, kaedah lebar jalur separuh kuasa telah dilaksanakan. Hasil perbandingan menunjukkan bahawa peratusan perbezaan bagi setiap set data adalah kurang daripada 10%. Seterusnya, data yang telah dipadankan digunakan semula untuk menjana profil FRF dan kekakuan dinamik bagi tujuan penentuan data. Analisis statistik menunjukkan bahawa pekali penentuan, R^2 , bagi perbandingan antara keputusan ukuran eksperimen dan keputusan pemadanan keluk adalah melebihi 0.97. Nilai R^2 yang tinggi ini membuktikan korelasi yang sangat kuat serta ketepatan model yang dibangunkan. Oleh itu, penggunaan data pemadanan keluk ini adalah sah dan dipercayai untuk digunakan dalam simulasi keputusan pada peringkat kajian yang seterusnya.

Rajah 7 (a) dan (b) masing-masing mempamerkan graf FRF melawan beban pra-statik dan frekuensi pada julat di bawah frekuensi asli. Merujuk kepada Rajah 7 (a), apabila jisim beban pra-statik meningkat dari 0.9 kg ke 4.26 kg, nilai FRF didapati turut meningkat bagi julat frekuensi di bawah frekuensi asli. Walau bagaimanapun, peningkatan nilai FRF apabila beban bertambah dari 0.90 kg ke 2.44 kg adalah kurang signifikan berbanding dengan peningkatan yang berlaku apabila beban bertambah dari 2.44 kg ke 4.26 kg. Seterusnya, apabila frekuensi meningkat, kenaikan nilai FRF pada jisim beban yang lebih besar adalah lebih ketara berbanding kenaikan pada jisim beban yang kecil. Tingkah laku ini turut diperhatikan dalam Rajah 7 (b) yang memaparkan FRF melawan frekuensi bagi beban pra-statik yang berbeza.



Rajah 7. Profil FRF pada julat di bawah frekuensi asli melawan: (a) Beban pra-statik dan (b) Frekuensi

Selain itu, daripada Rajah 7 (a) dan (b), didapati bahawa pada julat frekuensi 0 Hz hingga 20 Hz, perubahan FRF disebabkan oleh beban pra-statik adalah tidak signifikan berbanding perubahan pada julat 20 Hz hingga 45 Hz. Pada titik 0 Hz yang mewakili keadaan statik, kekakuan statik yang direkodkan adalah bersamaan dengan kekakuan dinamik [20], di mana dalam konteks ini merupakan salingan kepada FRF. Secara teoretikal, nilai FRF bagi pelbagai beban pra-statik pada 0 Hz adalah sama memandangkan lekapan getah yang serupa digunakan. Oleh itu, satu ketetapan boleh dibuat bahawa apabila beban pra-statik meningkat pada 0 Hz, nilai FRF kekal tidak berubah. Bagi julat frekuensi di atas 0 Hz sehingga 45 Hz, nilai FRF meningkat seiring dengan peningkatan beban pra-statik dan frekuensi; di mana semakin besar jisim beban, semakin signifikan perubahan pada nilai FRF tersebut.



Rajah 8. Profil FRF pada julat di sekitar frekuensi asli melawan: (a) Beban pra-statik dan (b) Frekuensi

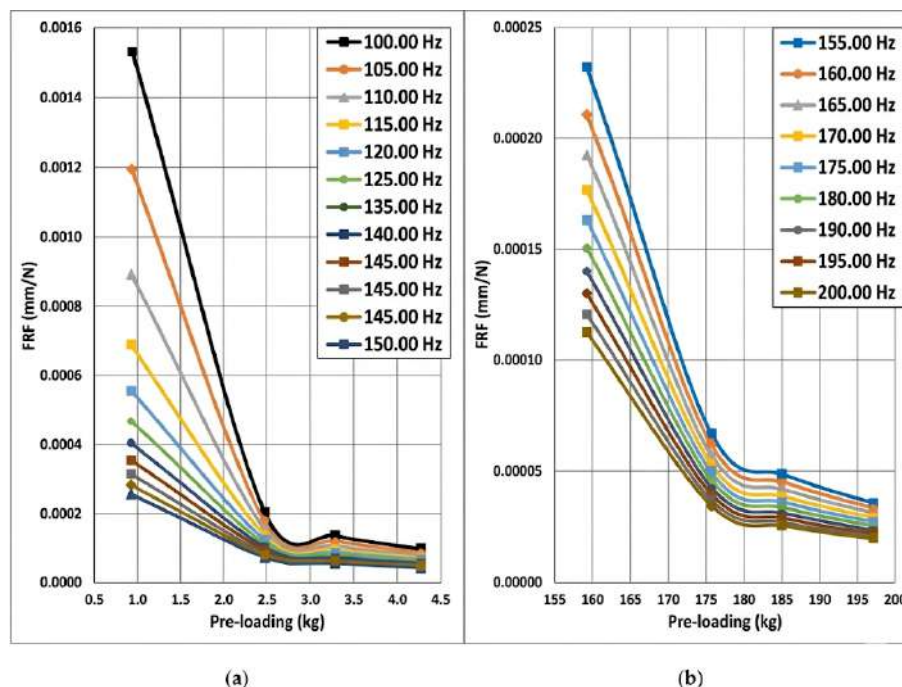
Rajah 8 (a) mempamerkan graf FRF melawan jisim beban pra-statik pada frekuensi asli sistem bagi empat keadaan beban pra-statik yang berbeza. Manakala, Rajah 8 (b) menunjukkan graf FRF melawan frekuensi bagi beban pra-statik yang berbeza pada julat di sekitar frekuensi asli. Penanda pangkah (x) berserta label jisim beban pra-statik dan nilai FRF dalam Rajah 8 (a) mewakili nilai FRF puncak pada frekuensi asli bagi setiap sistem beban. Dapat diperhatikan bahawa corak perubahan FRF pada keempat-empat frekuensi ini adalah berbeza antara satu sama lain. Secara amnya, keluk FRF melawan beban pra-statik pada keempat-empat nilai frekuensi ini menunjukkan tingkah laku bukan linear.

Bagi frekuensi 52.0 Hz dan 60.0 Hz, nilai FRF meningkat seiring dengan peningkatan beban pra-statik sehingga mencapai amplitud maksimum, dan kemudiannya menurun apabila beban terus bertambah. Bagi frekuensi 45.50 Hz, nilai FRF meningkat seiring dengan peningkatan beban, yang mempamerkan sifat yang sama seperti pada julat frekuensi di bawah frekuensi asli. Sebaliknya, bagi

frekuensi 94 Hz, nilai FRF menurun apabila beban pra-statik meningkat, yang menyerupai sifat pada julat frekuensi di atas frekuensi asli yang akan dibincangkan kemudian.

Apabila membandingkan Rajah 8 (a) dan (b), didapati bahawa bagi setiap frekuensi asli yang ditunjukkan pada keluk FRF melawan beban pra-statik, nilai FRF dengan penanda pangkah (x) adalah nilai FRF tertinggi. Nilai ini dihasilkan pada frekuensi asli sistem bagi jisim beban pra-statik yang ditetapkan. Pemerhatian ini juga selaras dengan Rajah 8 (b), di mana frekuensi dengan amplitud FRF tertinggi mewakili frekuensi asli sistem tersebut. Oleh itu, boleh ditentukan bahawa bagi graf FRF melawan beban pra-statik pada frekuensi resonans sesuatu sistem, nilai FRF puncak dihasilkan pada jisim beban pra-statik yang berkaitan dengan frekuensi asli sistem tersebut.

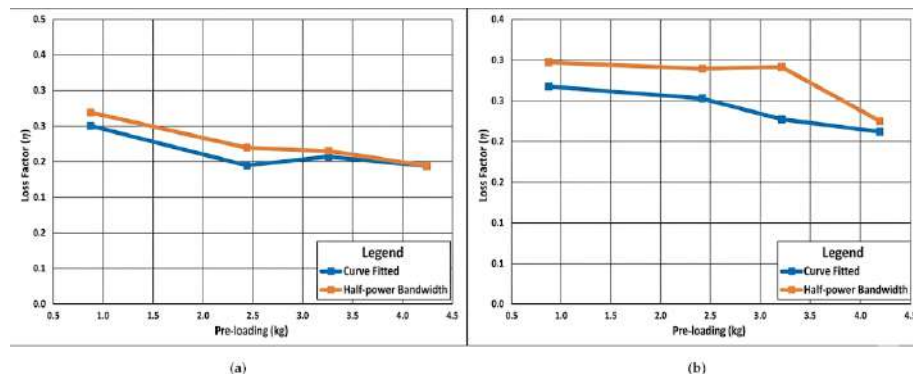
Satu ketetapan boleh dibuat bahawa pada julat frekuensi di sekitar frekuensi asli bagi mana-mana sistem, nilai FRF akan meningkat seiring dengan peningkatan beban pra-statik sehingga mencapai nilai FRF maksimum. Nilai maksimum ini menunjukkan frekuensi asli sistem yang berkaitan dengan jisim beban pra-statik yang menghasilkan FRF maksimum tersebut. Seterusnya, nilai FRF akan menurun apabila beban pra-statik terus meningkat selepas melepasi rantau frekuensi asli.



Rajah 9. Variasi FRF melawan beban pra-statik pada julat di atas frekuensi asli: (a) Julat frekuensi 100 Hz sehingga 150 Hz dan (b) Julat frekuensi 155 Hz sehingga 200 Hz

Rajah 9 (a) dan (b) mempamerkan graf FRF melawan beban pra-statik bagi julat frekuensi di atas frekuensi asli, yang dibahagikan kepada dua bahagian (100–150 Hz dan 155–200 Hz) untuk tujuan perbincangan yang lebih jelas. Berdasarkan pemerhatian pada kedua-dua rajah tersebut, corak perubahan nilai FRF terhadap beban pra-statik adalah hampir serupa bagi keseluruhan julat frekuensi tinggi ini. Apabila jisim beban pra-statik meningkat, nilai FRF didapati menurun secara konsisten. Penurunan nilai FRF adalah sangat signifikan apabila beban bertambah dari 0.9 kg ke 2.44 kg berbanding penurunan yang berlaku apabila beban terus bertambah dari 2.44 kg ke 4.26 kg. Selain itu, dapat diperhatikan bahawa kesan peningkatan beban terhadap penurunan FRF adalah lebih ketara pada frekuensi yang lebih rendah (berhampiran zon resonans) dan menjadi semakin mengecil apabila frekuensi bertambah. Secara keseluruhannya, bagi julat frekuensi di atas frekuensi asli, boleh dinyatakan bahawa peningkatan beban pra-statik akan menyebabkan penurunan nilai FRF. Walau

bagaimanapun, pada julat frekuensi yang lebih tinggi (menghampiri 200 Hz), nilai FRF bagi semua keadaan beban mula menghampiri sifar, yang menunjukkan pengaruh beban pra-statik menjadi semakin berkurangan pada frekuensi yang sangat tinggi.



Rajah 10. Perbandingan faktor kehilangan (η) melawan beban pra-statik pada frekuensi asli: (a) Sampel RA dan (b) Sampel RB

Rajah 10 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan perbandingan faktor kehilangan melawan beban pra-statik bagi sampel RA dan RB pada frekuensi asli. Dalam analisis ini, nilai η yang diperolehi melalui kaedah pemadanan keluk dan kaedah lebar jalur separuh kuasa dibandingkan. Merujuk kepada Rajah 10 (a) bagi sampel RA, nilai η daripada pemadanan keluk menunjukkan penurunan apabila beban meningkat dari 0.9 kg ke 2.44 kg dan dari 3.26 kg ke 4.26 kg, namun terdapat sedikit peningkatan apabila beban meningkat dari 2.44 kg ke 3.26 kg. Sebaliknya, nilai η yang dikira melalui kaedah lebar jalur separuh kuasa menunjukkan trend penurunan yang konsisten seiring dengan peningkatan beban. Bagi Rajah 10 (b) untuk sampel RB, nilai η daripada pemadanan keluk menurun secara konsisten dengan peningkatan beban. Walau bagaimanapun, bagi kaedah lebar jalur separuh kuasa, η menurun pada julat 0.9 kg ke 2.44 kg dan 3.26 kg ke 4.26 kg, tetapi meningkat sedikit pada julat 2.44 kg ke 3.26 kg. Hubungan antara faktor kehilangan dan jisim beban pra-statik pada frekuensi asli ini adalah selari dengan dapatan oleh Nashif *et al.*, [1]. Terdapat pengecualian pada data pemadanan keluk RA dan data lebar jalur separuh kuasa RB bagi peningkatan beban dari 2.44 kg ke 3.26 kg. Sisi-han pada data pemadanan keluk RA (2.44–3.26 kg) dikenal pasti berpunca daripada ralat matematik dalam prosedur pemadanan.

4. Kesimpulan

Kajian ini telah berjaya menilai kesan beban pra-statik terhadap sifat dinamik lekapan getah melalui penggunaan teknik impak dan permodelan matematik. Secara keseluruhannya, beberapa penemuan utama telah dikenal pasti. Untuk kesan beban terhadap parameter dinamik, peningkatan beban pra-statik secara konsisten menurunkan frekuensi asli sistem, yang dibuktikan melalui anjakan puncak Fungsi Respons Frekuensi. Dari segi kekakuan, peningkatan beban pra-statik menyebabkan penurunan kekakuan berdasarkan frekuensi pada rantau di luar resonans. Untuk tingkah laku FRF mengikut rantau frekuensid i bawah frekuensi asli, nilai FRF meningkat seiring dengan peningkatan beban pra-statik, terutamanya pada julat 20 Hz hingga 45 Hz. Pada titik statik (0 Hz), nilai FRF didapati tidak berubah bagi semua keadaan beban. Manakala untuk zon resonans, FRF menunjukkan tingkah laku bukan linear di mana nilai puncak dicapai pada frekuensi asli yang berpadanan dengan jisim beban tertentu. Untuk zon atas frekuensi asli, nilai FRF menurun apabila beban pra-statik meningkat dan mula menghampiri sifar apabila frekuensi meningkat melebihi 150 Hz. Faktor kehilangan didapati berkurangan apabila beban pra-statik bertambah pada rantau frekuensi asli. Nilai pekali penentuan R^2 yang melebihi 0.97 serta perbezaan kurang 10% berbanding kaedah lebar jalur separuh kuasa

mengesahkan ketepatan model yang dibangunkan. Secara tuntasnya, integrasi teknik impak dan pemadanan keluk ini menyediakan kaedah yang jitu dan pantas untuk mencirikan sifat dinamik lekapan getah.

Penghargaan

Penyelidikan ini tidak dibiayai oleh sebarang geran.

Rujukan

- [1] Nashif, Ahid D., David I. G. Jones, dan John P. Henderson. (1985). *Vibration Damping*. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471867722.
- [2] Gould, T. E., M. Jesunathadas, S. Nazarenko, dan S. G. Piland. (2019). *Chapter 6 - Mouth Protection in Sports. Materials in Sports Equipment (Second Edition)*, Page 199–231. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102582-6.00006-X>
- [3] Grootenhuis, P. "The control of vibrations with viscoelastic materials." *Journal of Sound and Vibration* 11, no. 4 (1970): 421-433. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(70\)80004-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(70)80004-9)
- [4] Gehman, S. D. "Dynamic properties of elastomers." *Rubber chemistry and technology* 30, no. 5 (1957): 1202-1250. <https://doi.org/10.5254/1.3542759>
- [5] Neumark, Stefan. "Concept of complex stiffness applied to problems of oscillations with viscous and hysteretic damping." (1957).
- [6] Nadeau, S., and Y. Champoux. "Application of the direct complex stiffness method to engine mounts." *Experimental Techniques* 24, no. 3 (2000): 21-23. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2000.tb00906.x>
- [7] Dargahi, Ashkan, Subhash Rakheja, and Ramin Sedaghati. "Development of a field dependent Prandtl-Ishlinskii model for magnetorheological elastomers." *Materials & Design* 166 (2019): 107608. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107608>
- [8] Thompson, D. J., W. J. Van Vliet, and J. W. Verheij. "Developments of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements." *Journal of Sound and Vibration* 213, no. 1 (1998): 169-188. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1437>
- [9] Lin, Tian Ran, Nabil H. Farag, and Jie Pan. "Evaluation of frequency dependent rubber mount stiffness and damping by impact test." *Applied Acoustics* 66, no. 7 (2005): 829-844. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.11.002>
- [10] Ooi, Lu Ean, and Zaidi Mohd Ripin. "Dynamic stiffness and loss factor measurement of engine rubber mount by impact test." *Materials & Design* 32, no. 4 (2011): 1880-1887. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.015>
- [11] Lu, Zheng, Zuo-Zhong Tan, Yan-Ting Lyu, dan Xiao-Le Li. "Experimental and Numerical Study on Dynamic Properties of Rubber Isolators under Different Loading Conditions." *Materials* 14, no. 14 (2021): 3845. <https://doi.org/10.3390/ma14143845>
- [12] Yu, Yunhe, Nagi G. Naganathan, and Rao V. Dukkipati. "A literature review of automotive vehicle engine mounting systems." *Mechanism and machine theory* 36, no. 1 (2001): 123-142. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(00\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(00)00023-9)
- [13] Zhang, Ben, Yinglong Zhao, Jingyue You, and Zhen Zhang. "Experimental and numerical analysis of rubber isolator dynamic stiffness under hydrostatic pressure." *Ocean Engineering* 314 (2024): 119650. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119650>
- [14] Kari, Leif. "On the dynamic stiffness of preloaded vibration isolators in the audible frequency range: Modeling and experiments." *The Journal of the Acoustical Society of America* 113, no. 4 (2003): 1909-1921. <https://doi.org/10.1121/1.1557214>
- [15] Noraphaiphapaksa, Nitikorn, Anat Hasap, Apiwat Muttamara, and Chaosuan Kanchanomai. "Numerical and experimental evaluations of the impact attenuation of a rail-fastening assembly." *Journal of Vibration and Control* 32, no. 3-4 (2026): 546-558. <https://doi.org/10.1177/10775463241299615>