

## Analisis Perbandingan Kaedah Statistik I-kaz dan M-Z-N bagi Pencirian Keanjalan Bahan melalui Isyarat Sambutan Getaran Impuls (Comparative Analysis of Statistical Methods I-kaz and M-Z-N for Characterising Material Elasticity through Impulse Vibration Response Signals)

Muhamad Arif Fadli Ahmad\*, Mohd. Zaki Nuawi, Mohd Faizal Mat Tahir, Shahrum Abdullah & Tan Wen Shen

*Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina,  
 Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

\*Corresponding author: muhamadariffadli@gmail.com

Received 18 May 2025, Received in revised form 31 October 2025

Accepted 31 November 2025, Available online 30 March 2026

### ABSTRAK

Pencirian sifat mekanikal bahan adalah penting untuk memastikan prestasi dan integriti struktur komponen dalam aplikasi kejuruteraan. Kajian ini menggunakan Teknik Pengujaan Impuls (IET), iaitu kaedah ujian dinamik tanpa musnah, bagi menilai sifat keanjalan bahan. Sebagai alternatif kepada kaedah analisis konvensional, kajian ini mengaplikasikan Integrated Kurtosis-based Algorithm for Z-notch Filter (I-kaz) dan Mesokurtosis Zonal Nonparametric (M-Z-N) untuk menganalisis sambutan impuls. Persediaan ujikaji IET yang ringkas dibangunkan berdasarkan piawaian ASTM E1876, dengan menggunakan tukul impak sebagai penguja dan filem piezoelektrik sebagai penerima untuk merekodkan isyarat. Enam jenis bahan telah dipilih sebagai spesimen ujikaji: keluli aloi 6582, gangsa, besi tuang T250, tembaga, keluli acuan plastik P20 dan keluli alat kerja sejuk SKD-11. Data yang direkodkan merangkumi dua jenis isyarat: daya impak dan tindak balas getaran. Kaedah I-kaz dan M-Z-N digunakan untuk menganalisis data getaran dan mengekstrak ciri-ciri isyarat. Ciri-ciri ini kemudiannya dikorelasi dengan daya impak dan modulus Young teoretikal bagi membangunkan model persamaan matematik. Kaedah I-kaz menunjukkan nilai purata pekali penentuan yang tinggi ( $R^2 = 0.94908$ ) dengan ralat relatif sebanyak 13.12%. Sebaliknya, kaedah M-Z-N mencatatkan nilai  $R^2$  yang lebih rendah iaitu 0.34780 serta ralat setinggi 49.82%, sekali gus menunjukkan kebolehpercayaannya yang lebih rendah. Keputusan ini menegaskan bahawa penggunaan ciri isyarat yang bersesuaian serta korelasi yang kukuh antara pengujaan impuls dan tindak balas getaran membolehkan anggaran sifat modulus Young bahan dilakukan secara berkesan melalui analisis isyarat statistik.

*Kata kunci:* ujian tanpa musnah; teknik pengujaan impuls; modulus Young; analisis isyarat statistik; I-kaz

### ABSTRACT

The characterisation of mechanical properties is essential to ensure the performance and structural integrity of components in engineering applications. This study employs the Impulse Excitation Technique (IET), a non-destructive dynamic testing method, to evaluate the elastic properties of materials. As an alternative to conventional analysis methods, this work utilises the Integrated Kurtosis-based Algorithm for Z-notch Filter (I-kaz<sup>TM</sup>) and the Mesokurtosis Zonal Nonparametric (M-Z-N) technique to analyse the impulse responses. A simplified IET experiment setup, based on ASTM E1876, was implemented using an impact hammer as the exciter and a piezoelectric film sensor to capture the signals. Six different materials were selected as test specimens: 6582 alloy steel, bronze, T250 cast iron, copper, P20 plastic mould steel, and SKD-11 cold work tool steel. The recorded data included two signal types: impact force and vibrational response. Both I-kaz and M-Z-N methods were applied to analyse the vibrational data and extract signal features. These features were then correlated with the measured impact forces and theoretical Young's modulus to develop mathematical modelling equations. The I-kaz method yielded a high average coefficient of determination ( $R^2 = 0.94908$ ) with a relative error of 13.12%. In contrast, the M-Z-N method produced a significantly lower  $R^2$  value of

*0.34780 and a higher error of 49.82%, indicating its lower reliability. The results highlight that employing relevant signal features and establishing a strong correlation between impulse excitation and vibrational response enables effective estimation of a material's Young's modulus through statistical signal analysis.*

*Keywords: Non-destructive test; impulse excitation technique; Young modulus; statistical signal analysis; I-kaz*

## PENGENALAN

Bahan adalah suatu jirim yang mempunyai sifat-sifat dan struktur dalaman tersendiri, yang mana penggunaannya mampu memberi manfaat kepada manusia. Sebagai contoh, keluli mempunyai sifat keanjalan yang tinggi menjadikannya bahan ideal untuk aplikasi gelas beban. Tiang dan rasuk keluli mampu menahan beban yang ketara dan melentur tanpa ubah bentuk kekal menjadikannya sesuai untuk bangunan tinggi dan jambatan panjang. Oleh sebab itu, pengetahuan tentang ciri-ciri bahan adalah penting untuk mengoptimalkan penggunaannya.

Pencirian bahan merupakan penaksiran ciri-ciri komposisi dan struktur sesuatu bahan termasuk kecacatan untuk penyediaan kajian sifat-sifat, penggunaan dan pengeluaran semula bahan (McCauley & Weiss 2013). Ianya langkah penting yang diambil sebelum menggunakan bahan untuk tujuan tertentu. Pemilihan dan reka bentuk bahan tertakluk kepada faktor mekanikal, terma, optik, magnetik, elektrik dan kemerosotan untuk memastikan keboleharapan tanpa kegagalan demi kelestarian produk akhir (Callister & Rethwisch 2022). Faktor mekanikal khususnya berkait dengan ubah bentuk yang dikenakan oleh beban atau daya, contohnya seperti kekakuan (keanjalan), kekuatan dan ketahanan patah.

Sifat mekanikal yang penting seperti keanjalan sesuatu bahan boleh diukur menggunakan ujian teknik pengujaan impuls (IET). IET adalah salah satu ujian tanpa musnah (NDT) yang ringkas dan tepat dalam mencirikan sifat-sifat keanjalan bahan termasuklah modulus Young, modulus ricih dan nisbah Poisson (Popov & Shitikova 2020). Lazimnya, pendekatan ini melibatkan ketukan lembut pada spesimen sebagai satu bentuk impuls atau dedenyut untuk memulakan getaran. Isyarat getaran sambutan impuls yang terhasil dianalisa ke bentuk domain frekuensi untuk mengenal pasti nilai frekuensi resonans atau tabii. Seterusnya dengan mengetahui geometri dan jisim spesimen, sifat-sifat keanjalan bahan boleh dikira melalui persamaan pratentu, seperti yang ditetapkan dalam piawai ASTM E1876 (2022).

IET telah mengalami banyak pengubahsuaian dan kemajuan yang ketara kebelakangan ini. Ia secara tidak langsung memperluaskan kemampuan dan kebolegunaannya dalam pelbagai sektor. Antara kajian terkini adalah penerapan internet benda (IoT) dengan penerokaan peranti mudah alih untuk IET (Scislo 2023).

Mereka menggunakan mikrofon telefon sebagai penerima alternatif dan hasilnya menjanjikan pemeriksaan secara mudah alih. Selain itu, penyelidik seperti Massara et al. (2021) memperkenalkan instrumen binaan sendiri berkos rendah iaitu IETeasy. Akses kepada maklumat reka bentuk dan data adalah terbuka kepada umum menjadikannya lebih tersedia kepada bakal pengguna untuk analisis data penerokaan. Disamping tu, pengenalan kaedah IET terbaharu menggunakan geometri spesimen berbentuk plat segi empat sama juga telah diterokai (Zhang et al. 2024). Pendekatan ini berpotensi menyamai kecekapan yang setanding dengan kaedah piawai.

Walaupun bagaimanapun, penentuan sifat keanjalan bahan dengan hanya menentukan nilai tunggal frekuensi resonans berkemungkinan besar mengabaikan maklumat yang menerangkan hubungan kompleks antara isyarat dengan tingkah laku bahan. Ini disokong oleh penyelidik seperti Boursier Niutta (2020) yang bukan sahaja menggunakan frekuensi resonans, tetapi juga maklumat berkenaan bentuk mod dan kesan jisim tambahan. Tambahan pula, kajian terhadap tablet farmaseutikal yang bersifat komposit mendapati bahawa analisis berbilang frekuensi serta bentuk puncak resonans boleh mendedahkan sifat viskoelastik dan anisotropi (Meynard et al. 2021).

Selain itu, beberapa kajian mencadangkan penggunaan analisis statistik multivariat sebagai ciri isyarat tambahan dan pembelajaran mesin untuk mengklasifikasikan, mengekstrak dan mencirikan sifat serta tingkah laku bahan, tanpa bergantung kepada penentuan frekuensi resonans semata-mata (Li et al. 2024 ; Liu et al. 2024 ; Shen et al. 2024). Secara tidak langsung, mereka menyokong idea bahawa keseluruhan isyarat IET mengandungi maklumat tersembunyi yang bernilai dan boleh diteroka melalui analisis statistik yang relevan.

Analisis isyarat statistik adalah suatu teknik statistik yang digunakan untuk mentafsir serta merungkai isyarat mekanikal, contohnya getaran, ke bentuk atau maklumat yang berguna dan mudah difahami. Lazimnya, isyarat domain masa dan frekuensi ditukar ke ciri isyarat berbentuk diskret melalui pengiraan parameter statistik seperti punca min kuasa dua (RMS), sisihan piawai, kurtosis, faktor puncak dan lain-lain (Altaf et al. 2022). Ianya menjadi semakin popular kerana membolehkan penerokaan isyarat yang kompleks dalam sistem mekanikal dilakukan.

Antaranya adalah penyelesaian masalah kejuruteraan melalui diagnostik getaran. Sebagai contoh, penganggaran paras minyak pemampat automotif telah dibangunkan

melalui carta Z (*Z-chart*), yang menggabungkan kurtosis dan pemodelan Gaussian terhadap isyarat getaran tiga paksi (Othman et al. 2025). Selain itu, analisis secara statistik melalui dimensi fraktal dilakukan untuk mengukur isyarat fana yang kompleks dan mengaitkannya dengan nisbah Poisson bahan-bahan logam (Riza et al. 2022). Kajian-kajian ini menunjukkan ciri isyarat statistik mampu mengesan pelencongan atau perbezaan daripada kelakuan normal. Perubahan dalam taburan itu boleh menunjukkan kehadiran corak, trend atau anomali tertentu (Mohd Ghazali & Rahiman 2021).

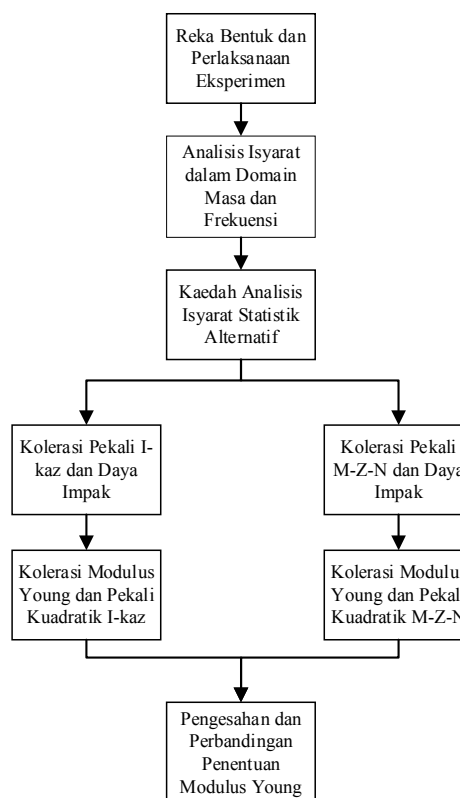
Statistik piawai, meskipun memberikan gambaran umum taburan data, ia cenderung dalam mengabaikan unsur luaran yang ketara dan menghadkan keberkesannya terhadap data yang terdedah kepada isyarat hingar (Andrade 2023). Oleh itu, dalam usaha mempertingkatkan kebolehpayaan ciri isyarat statistik, analisis alternatif telah diperkenalkan sebagai tambahan kepada ciri-ciri isyarat sedia ada. Antaranya termasuklah *Integrated Kurtosis-based Algorithm for Z-notch Filter* (I-kaz) dan *Mesokurtosis Zonal Nonparametric* (M-Z-N). Kaedah I-kaz dibangunkan berdasarkan darjah serakan data terhadap sentroid dengan menggabungkan algoritma kurtosis dengan teknik penguraian julat frekuensi (Nuawi et al. 2008). Manakala M-Z-N pula memfokuskan penyelerakan data terhadap tahap tenaga isyarat yang diwakili oleh nilai ukuran *rms* (Nuawi et al. 2012).

Sejak sedekad lalu, kaedah I-kaz dan M-Z-N telah dipraktikkan dalam banyak bidang kejuruteraan penyelidikan termasuklah pencirian bahan. Kebelakangan ini, I-kaz dipraktikkan dalam mengkaji hubungan kolerasi antara isyarat sambutan getaran melalui pengujaan impuls dengan beberapa jenis sifat mekanikal bahan logam (Ahmad et al. 2025 ; Ramli et al. 2020). Manakala kaedah M-Z-N pula digunakan dalam menterjemah isyarat sambutan impuls ke bentuk ciri isyarat statistik tidak berdimensi untuk menganggar kekuatan tegangan, dan kekonduksian terma bahan-bahan polimer (Ahmad et al. 2016). Penyelidikan-penyelidikan tersebut didapati berjaya dengan kebolehpayaan yang tinggi.

Walaupun bagaimanapun sehingga kini, perbandingan kecekapan antara I-kaz dan M-Z-N melalui analisis isyarat mekanikal yang sama dalam menentukan pencirian sifat bahan yang tertentu tidak pernah dilakukan. Kajian secara langsung menggunakan data isyarat dan persediaan ujikaji yang serupa boleh memberikan cerapan berharga tentang kekuatan atau kelemahan relatifnya. Secara tidak langsung ianya membantu menentukan kaedah yang lebih tepat, sensitif atau teguh terhadap perubahan sesuatu isyarat mekanikal. Maklumat ini penting untuk penyelidik dalam memilih kaedah yang paling sesuai mengikut keperluan semasa.

Oleh yang demikian, kajian ini menekankan ujian IET dan penerapan kaedah analisis isyarat statistik alternatif I-kaz dan M-Z-N dalam mentakrifkan hubungan melalui persamaan matematik antara isyarat daya impuls, sambutan dedenyut dan sifat keanjalan utama iaitu modulus Young. Aliran kajian dan langkah kerja dilampirkan dalam metodologi dan perbandingan antara dua analisis isyarat statistik tersebut dicatit dalam bab keputusan dan perbincangan.

## METODOLOGI KAJIAN



RAJAH 1. Carta alir kajian

Struktur kajian merangkumi empat fasa: reka bentuk eksperimen, perwakilan domain masa dan frekuensi, analisis isyarat statistik alternatif dan akhir sekali perbandingan ciri dan penilaian prestasi. Carta alir ringkas bagi struktur kajian ini dilakarkan seperti dalam Rajah 1.

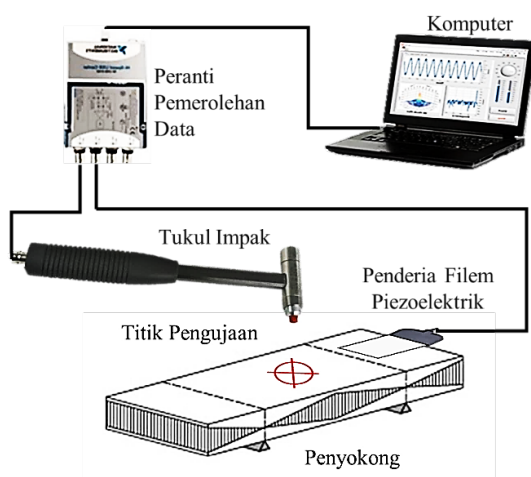
## REKA BENTUK DAN PROSES EKSPERIMEN

Eksperimen diatur berlandaskan konsep IET. Terdapat tiga peralatan utama yang digunakan, iaitu tukul impak, penerima filem piezoelektrik dan peranti pemerolehan data.

Spesimen kajian adalah bahan-bahan logam terdiri daripada gangsa, tembaga, besi tuang T250, keluli aloi 6582, keluli acuan plastik P20 dan keluli alat kerja sejuk SKD-11. Bentuk geometri kesemua spesimen adalah bar segi empat tepat dengan saiz dimensi 250 mm x 50 mm x 10 mm (panjang x lebar x tebal).

Ujikaji IET dilakukan di dalam persekitaran ujian terkawal sepenuhnya melalui penggunaan bilik anekoik atau bilik tanpa gema yang berada dalam Makmal Akustik, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina di Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Bilik ini direka untuk menghapuskan pantulan gelombang bunyi dan getaran daripada dinding, lantai dan siling, menjadikan ujian bebas daripada pengaruh akustik persekitaran serta mengurangkan hingar ambien luaran seperti bunyi mesin, pergerakan manusia dan getaran struktur di luar bilik.

Susunan eksperimen adalah mengikut piawaian ASTM E1876-22 dan digambarkan seperti dalam Rajah 2. Spesimen diletakkan di atas dua penyokong yang dijarakkan 0.224 L dari kedua-dua hujung spesimen. Fungsi penyokong-penyokong dengan susunan sedemikian adalah untuk mengaktifkan mod lenturan serta mengurangkan kewujudan mod-mod getaran yang lain (International 2022). Mod lenturan adalah merujuk kepada corak getaran daripada bahan dalam keadaan membengkok atau melentur yang mana frekuensi getarannya berkait langsung dengan kekakuan bahan. Kedudukan ini dikekalkan sepanjang kajian untuk semua spesimen. Penderia filem piezoelektrik berkos rendah ditampal pada hujung spesimen dan titik pengujaan ditanda pada tengah spesimen.



RAJAH 2. Susunan reka bentuk ujikaji IET

Tetapan frekuensi pensampelan adalah pada kadar 25.6 kHz. Operasi dimulakan dengan ketukan kecil atau lembut pada titik pengujaan dengan julat-julat impak yang berbeza.

Ketukan tersebut adalah suatu impuls pengujaan dengan daya impak tertentu yang menghasilkan sambutan impuls, iaitu isyarat-isyarat getaran pada spesimen. Daya impak dan isyarat getaran dicerap dan direkodkan bagi setiap operasi menggunakan perisian *LabVIEW SignalExpress*. Kedua-dua jenis isyarat itu ditukar ke format teks (.txt) yang diwakili oleh barisan data numerikal dengan bilangan sampel tertentu dan disimpan ke dalam komputer.

## PERWAKILAN DOMAIN MASA DAN FREKUENSI

Graf isyarat domain masa dibuat dengan memplot data numerikal yang disimpan pada paksi y melawan indeks masa pada paksi x. Indeks masa dihasilkan melalui bilangan numerikal setiap sampel data dengan mengambil kira kadar pensampelan ( $F_s$ ) iaitu 25.6 kHz iaitu 25.6 kilo sampel per saat (kS/s). Jika mempunyai  $N$  bilangan sampel, tatasusunan bagi indeks masa tercipta pada setiap nilai sampel di mana  $n$  sampel itu diambil, mengikut persamaan berikut.

$$t(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{n}{F_s} \quad (1)$$

Isyarat domain frekuensi pula dibentuk dengan menukar isyarat getaran dalam domain masa menggunakan transformasi fourier cepat (*FFT*). Grafnya diplot melalui magnitud pekali frekuensi melawan paksi frekuensi. Dalam suatu masa yang diskrit, *FFT* mampu mengira transformasi fourier diskrit (*DFT*) dengan cekap berdasarkan jumlah bilangan  $N$  sampel yang tertentu, seperti persamaan berikut.

$$X(k) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{-j * 2\pi * k * \frac{n}{N}} \right| \quad (2)$$

Di mana  $X$  adalah magnitud pekali frekuensi (frekuensi spektrum),  $k$  adalah indeks frekuensi,  $x$  adalah nilai sampel dan  $j$  adalah unit khayalan. Paksi frekuensi pula dihasilkan melalui persamaan di bawah.

$$f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} k \frac{F_s}{N} \quad (3)$$

## ANALISIS ISYARAT STATISTIK ALTERNATIF

Sambutan impuls iaitu isyarat getaran yang disimpan dalam bentuk data numerikal itu dianalisis menggunakan kaedah I-kaz dan M-Z-N bagi setiap set. Setiap analisa menerbitkan satu nilai tunggal sebagai perwakilan kepada ciri isyarat statistik, iaitu pekali I-kaz dan M-Z-N.

Kaedah analisis I-kaz diwakili oleh pekalinnya,  $Z^\infty$  dan dikira menggunakan formula berikut.

$$Z^\infty = \frac{1}{n} \sqrt{K_L s_L^4 + K_H s_H^4 + K_V s_V^4} \quad (4)$$

$K_L$ ,  $K_H$  and  $K_V$  adalah nilai kurtosis pada jalur frekuensi rendah, tinggi dan sangat tinggi. Manakala  $s_L$ ,  $s_H$  and  $s_V$  pula adalah sisihan piawai bagi setiap jalur frekuensi daripada penguraian isyarat itu. Pengagihan isyarat berdasarkan frekuensi maksimum ( $f_{max}$ ) adalah seperti berikut:

- Julat frekuensi rendah (L):  $0 - 0.25 f_{max}$
- Julat frekuensi tinggi (H):  $0.25 - 0.50 f_{max}$
- Julat frekuensi sangat tinggi (V):  $0.50 - f_{max}$

Manakala persamaan bagi pengiraan kurtosis ( $s$ ) dan sisihan piawai ( $K$ ) bagi setiap jalur frekuensi adalah seperti di bawah.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{ns^4} \sum (x - \bar{x})^4 \quad (6)$$

Simbol  $x$  adalah nilai sampel dan  $\bar{x}$  adalah purata nilai sampel. Manakala kaedah M-Z-N diwakili oleh pekali tidak berdimensinya yang tersendiri iaitu  $MZ_N$  yang diukur melalui persamaan berikut.

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum x^2} \quad (7)$$

Di mana  $M$  adalah bilangan segmen,  $N$  adalah jumlah sampel,  $x_i$  adalah nilai diskrit sampel dan  $rms$  adalah punca min kuasa dua bagi bahagian segmen itu. Nilai rms dikira berdasarkan persamaan berikut.

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum x^2} \quad (8)$$

## SUSUN ATUR LANGKAH REGRESI DAN PEMBENTUKAN MODEL EMPIRIKAL

Hubungan antara ciri statistik isyarat sambutan impuls dan sifat mekanikal bahan dianalisis melalui pendekatan regresi dua langkah (*two-step regression*). Pendekatan ini digunakan secara konsisten bagi kedua-dua kaedah statistik I-kaz dan M-Z-N untuk mengekstrak parameter ciri yang boleh dikaitkan dengan nilai Modulus Young setiap bahan. Ianya melalui dua susun atur seperti berikut:

1. Langkah pertama: Hubungan kolerasi antara daya impak dan pekali statistik (I-kaz atau M-Z-N) dipadankan melalui regresi menggunakan model polinomial untuk mengekstrak parameter tingkah laku dinamik setiap bahan.
2. Langkah kedua: Parameter hasil langkah pertama iaitu pekali daripada regresi polinomial digunakan sebagai pemboleh ubah bebas dalam regresi linear terhadap nilai Modulus Young teoretikal bagi membentuk model empirikal.

Kesemua enam jenis bahan logam dianalisis secara kolektif dalam aturan model ini bagi menilai keupayaan generalisasi kedua-dua kaedah statistik terhadap pelbagai jenis bahan. Walaupun setiap bahan mempunyai ciri isyarat yang berbeza disebabkan oleh variasi dalam kekakuan, ketumpatan, dan sifat redaman, analisis kolektif ini membolehkan pengujian sama ada wujud hubungan matematik yang konsisten yang boleh diterapkan ke atas seluruh jenis bahan logam secara umum. Ianya boleh dilabel sebagai pendekatan peringkat awal untuk mengukur trend umum hubungan sejagat statistik-mekanikal antara tindak balas getaran impuls dengan sifat keanjalan bahan.

Bagi menilai kebolehpercayaan model empirikal yang dibangunkan, kaedah pengecualian satu bahan (*leave-one-out cross-validation - LOO*) digunakan dalam proses penganggaran Modulus Young. Melalui pendekatan LOO, satu bahan dikecualikan daripada proses pembangunan model pada setiap pusingan, manakala baki lima bahan digunakan untuk membina model regresi. Model tersebut kemudiannya diaplikasikan untuk menganggar nilai Modulus Young bagi bahan yang dikecualikan. Proses ini diulangi sehingga semua bahan diuji sebagai data luaran. LOO membolehkan penilaian ketepatan dan kebolehumuman model terhadap bahan baharu tanpa bias

latihan, sekaligus memberikan ukuran prestasi yang lebih objektif bagi kedua-dua kaedah statistik I-kaz dan M-Z-N.

### PERBANDINGAN CIRI DAN PENILAIAN PRESTASI

Dalam menentukan kebolehpayaan kedua-dua kaedah alternatif I-kaz dan M-Z-N, perbandingan prestasi dilakukan melalui pengiraan ralat ujikaji daripada penentuan modulus Young, dan juga kolerasi antara ciri isyarat dengan sifat bahan itu. Pengukuran ralat bagi I-kaz ( $e^{ikaz}$ ) dan M-Z-N ( $e^{mzn}$ ) dilakukan berdasarkan formula seperti di bawah.

$$e^{ikaz} = \left| \frac{E^{ikaz} - E^{teori}}{E^{teori}} \right| \times 100\% \tag{9}$$

$$e^{mzn} = \left| \frac{E^{mzn} - E^{teori}}{E^{teori}} \right| \times 100\% \tag{10}$$

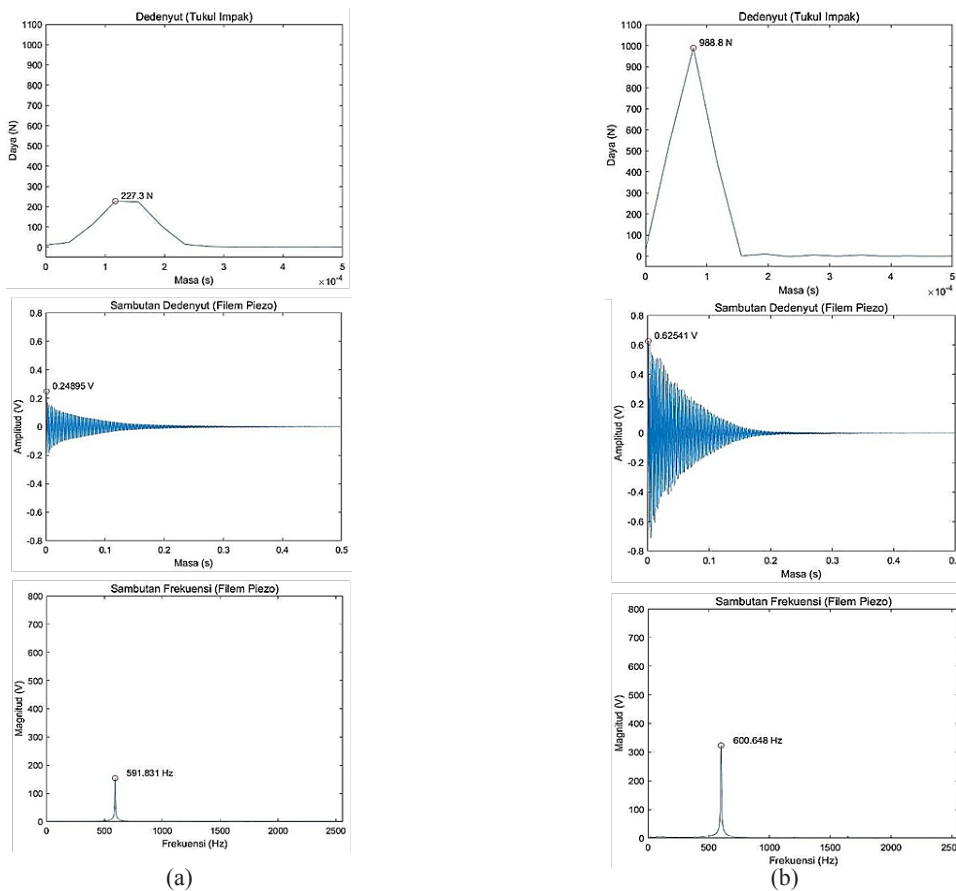
Di mana  $E^{ikaz}$  adalah modulus Young daripada kaedah I-kaz,  $E^{mzn}$  adalah daripada kaedah M-Z-N dan  $E^{teori}$  adalah nilai teori yang diambil daripada perisian CES.

### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Keputusan analisis dibahagikan kepada tiga fasa: pemantauan isyarat domain masa dan frekuensi, analisis isyarat statistik alternatif I-kaz dan M-Z-N dan pengesahan model melalui perbandingan ralat.

#### PEMANTAUAN ISYARAT DOMAIN MASA DAN FREKUENSI

Rajah 3 menunjukkan isyarat dedenyut (impuls) beserta sambutan impuls dalam domain masa dan frekuensi. Turutan graf-graf sebelah kiri adalah gambaran isyarat semasa daya impak yang dikenakan bersamaan 227.3 N, manakala turutan graf-graf sebelah kanan adalah ketika daya bersamaan 988.8 N. Graf impuls menunjukkan isyarat ringkas yang meningkat ke nilai puncak dan menurun ke nilai sifar secara drastik dalam masa yang singkat.



RAJAH 3. Isyarat impuls dan sambutan impuls dalam domain masa dan frekuensi bahan tembaga bagi dua daya impak berbeza: (a) 227.3 N (b) 988.8 N

Graf sambutan impuls menunjukkan isyarat fana berbentuk pereputan eksponen, bermula dengan maksimum amplitud dan menjadi lemah sehingga sifar selepas seketika. Maksimum amplitud berada pada nilai 0.24895 V semasa 227.3 N daya impak, dan kemudian meningkat ke 0.62541 V ketika daya impak setinggi 988.8 N. Fenomena ini menunjukkan hubungan langsung antara input dan respons sistem di mana kelakuan dinamik sistem adalah sensitif kepada magnitud daya yang dikenakan. Oleh itu, teknik analisis isyarat statistik boleh digunakan dengan berkesan untuk mengesktrak dan mengukur nilai yang bermakna berkaitan dengan hubungan tersebut.

Manakala dalam domain frekuensi, puncak frekuensi pertama hasil daripada ketukan daya impak yang berbeza itu memberikan nilai yang hampir konsisten, iaitu 591.831 Hz dan 600.648 Hz. Nilai-nilai tersebut adalah frekuensi resonans yang berlandaskan mod lenturan. Konsistensi ini menunjukkan bahawa walaupun terdapat variasi dalam daya impak, mod getaran terwujud iaitu yang dikaitkan dengan puncak pertama kekal tidak berubah. Frekuensi resonans bergantung pada jisim dan kekakuan sistem dan bukannya daya impuls. Hakikat ini menyokong bahawa data isyarat yang diperolehi adalah sahih dan eksperimen dijalankan adalah betul.

#### KAEDAH ANALISIS ISYARAT STATISTIK I-KAZ DAN M-Z-N

Isyarat domain masa mengikut input daya impuls dianalisis untuk mendapatkan pekali I-kaz dan M-Z-N. Hubungkait dilakukan antara pekali-pekali tersebut dengan daya-daya impuls melalui kolerasi dalam graf.

Berdasarkan pemerhatian daripada kolerasi, regresi polinomial dengan persamaan kuadratik dilakukan berdasarkan penyuaian lengkung bagi semua graf. Hubungan fizikal daya impak daripada pengujian impuls dengan tindak balas getaran yang terhasil adalah tak linear kerana interaksi dinamik antara amplitud, ketumpatan tenaga dan redaman bahan (Amabili 2018). Model polinomial dipilih kerana ianya boleh menangkap ketidaklinearan ini tanpa menetapkan bentuk fungsi khusus. Selain itu ia juga adalah untuk memastikan konsistensi dan perbandingan saksama untuk semua spesimen.

Walaupun model lain mungkin memberikan kesesuaian yang lebih baik untuk sesetengah sampel, model kuadratik tetap dipilih sebagai satu garis pangkal yang seragam dan konsisten. Ianya memudahkan perbandingan secara langsung kesan variasi pembolehubah spesimen melalui pekali polinomial untuk di bawa ke proses kolerasi seterusnya. Rajah 4 memberikan graf kolerasi pekali I-kaz melawan daya impak dengan penyuaian lengkung kuadratik kesemua spesimen. Manakala Rajah 5 pula adalah graf pekali M-Z-N melawan daya dengan garis lengkungan kuadratik.

Persamaan kuadratik ( $y = ax^2 + bx + c$ ) yang diterbitkan melalui regresi bagi I-kaz bermula daripada spesimen keluli aloi, gangsa, besi tuang, tembaga, keluli acuan plastik sehinggalah keluli alat kerja sejuk, adalah diberikan melalui persamaan 11 sehingga 16 mengikut turutan. Manakala persamaan 17 hingga 22 pula adalah bagi pekali M-Z-N, juga melalui turutan spesimen yang sama.

$$y = 5.79 \times 10^{-13}x^2 - 5.98 \times 10^{-11}x + 6.04 \times 10^{-08} \quad (11)$$

$$y = 5.70 \times 10^{-14}x^2 + 6.42 \times 10^{-10}x - 3.11 \times 10^{-09} \quad (12)$$

$$y = 1.18 \times 10^{-13}x^2 + 7.33 \times 10^{-10}x - 1.44 \times 10^{-07} \quad (13)$$

$$y = 2.00 \times 10^{-13}x^2 + 3.95 \times 10^{-10}x + 7.40 \times 10^{-09} \quad (14)$$

$$y = 7.51 \times 10^{-13}x^2 - 2.48 \times 10^{-10}x + 4.56 \times 10^{-08} \quad (15)$$

$$y = 6.06 \times 10^{-13}x^2 - 1.03 \times 10^{-10}x + 1.21 \times 10^{-07} \quad (16)$$

$$y = 2.40 \times 10^{-8}x^2 - 1.95 \times 10^{-5}x + 5.07 \times 10^{-3} \quad (17)$$

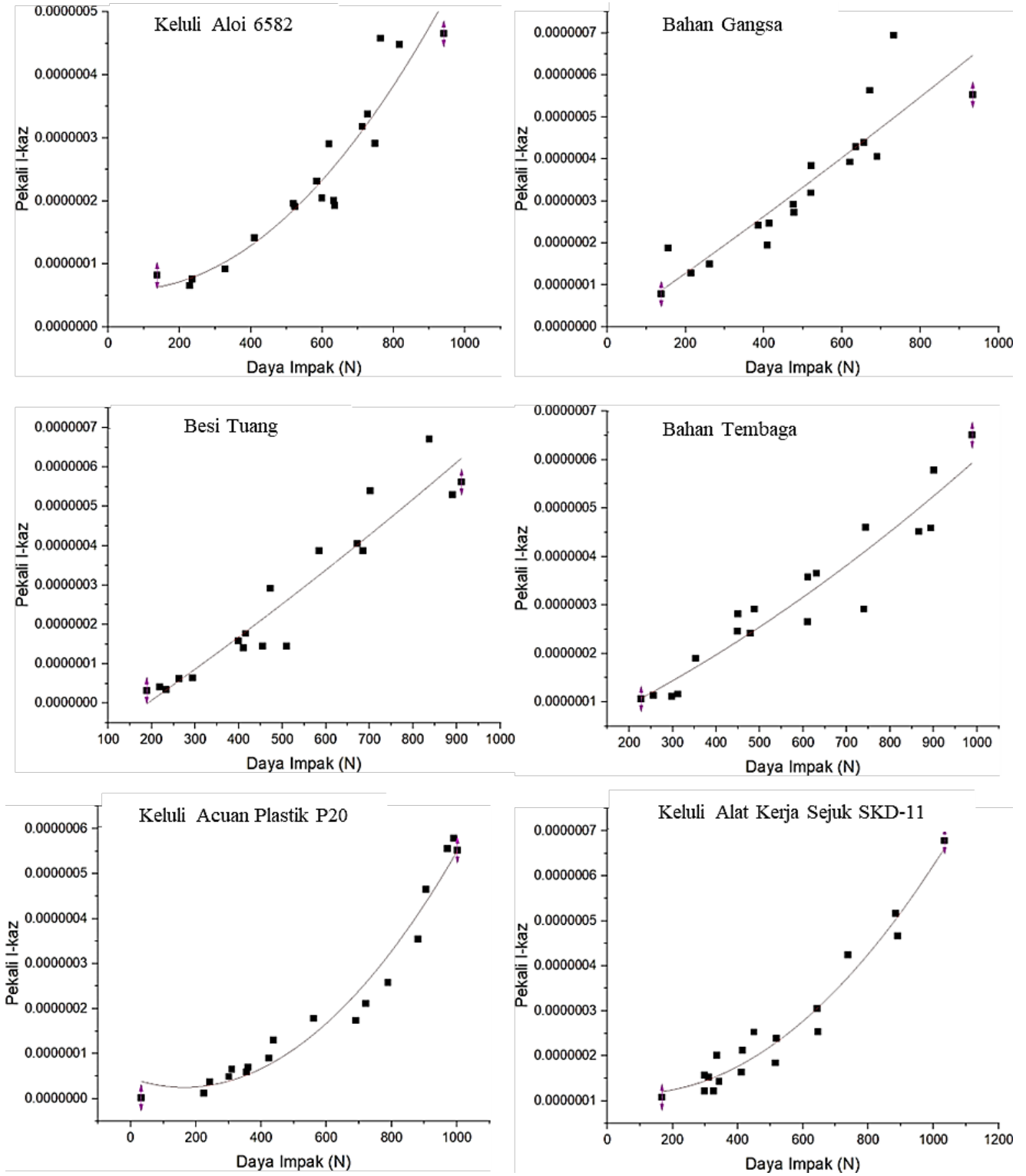
$$y = -1.94 \times 10^{-10}x^2 + 9.55 \times 10^{-6}x - 2.11 \times 10^{-4} \quad (18)$$

$$y = 6.98 \times 10^{-9}x^2 - 1.37 \times 10^{-6}x + 2.73 \times 10^{-4} \quad (19)$$

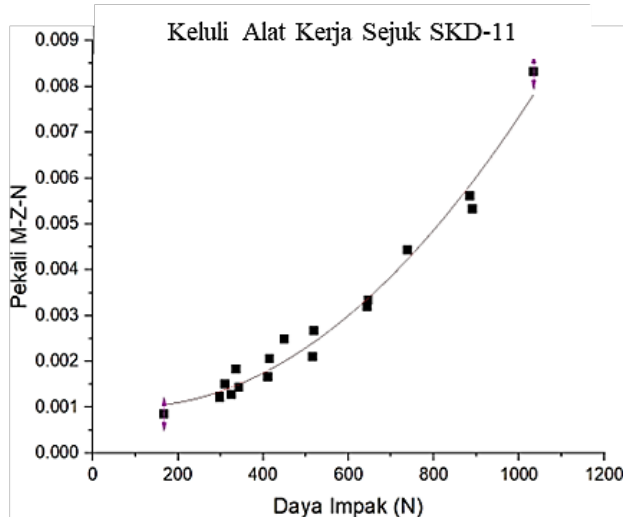
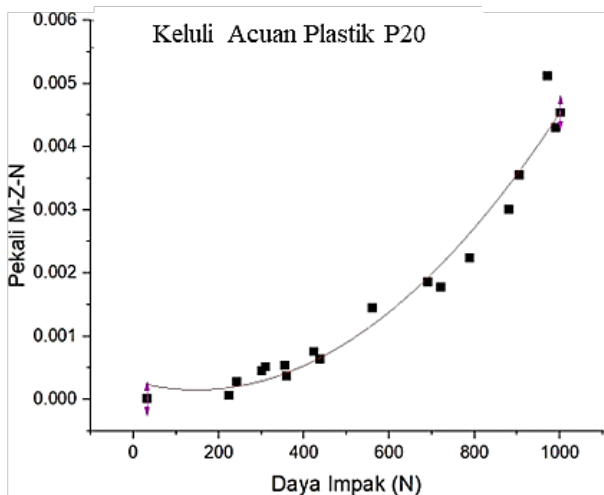
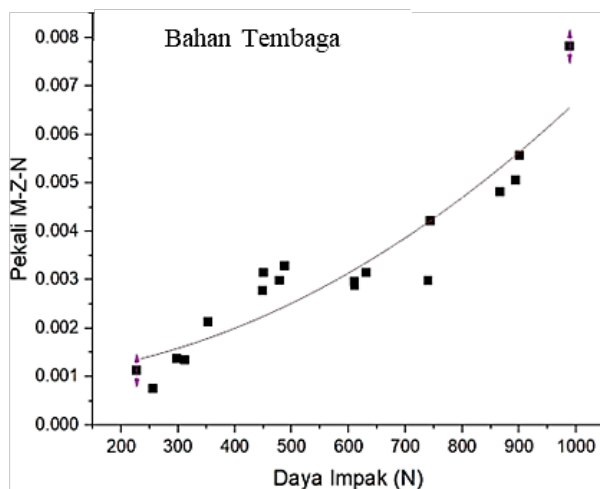
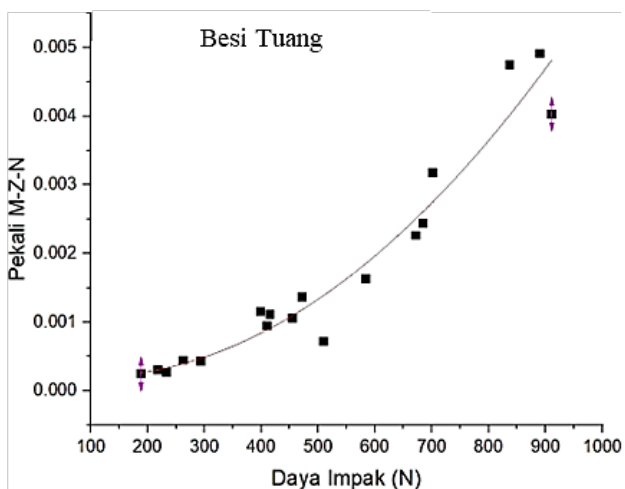
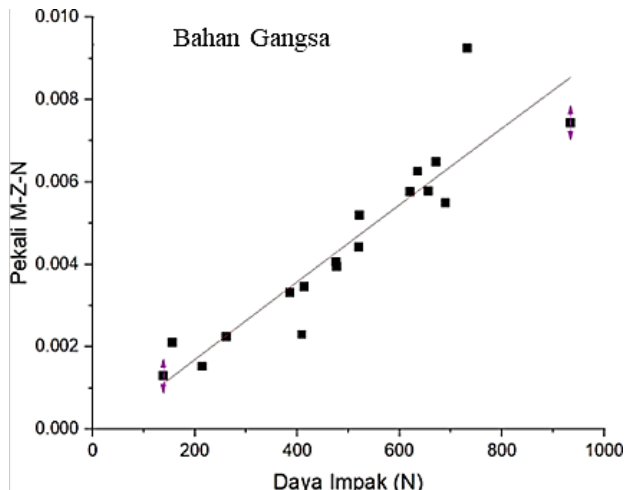
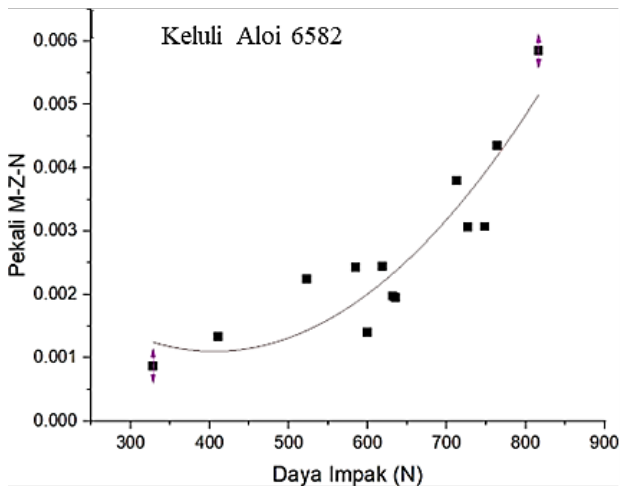
$$y = 5.23 \times 10^{-9}x^2 + 4.72 \times 10^{-7}x + 9.73 \times 10^{-4} \quad (20)$$

$$y = 6.04 \times 10^{-9}x^2 - 1.80 \times 10^{-6}x + 2.87 \times 10^{-4} \quad (21)$$

$$y = 7.62 \times 10^{-9}x^2 - 1.34 \times 10^{-6}x + 1.07 \times 10^{-3} \quad (22)$$



RAJAH 4. Pekali I-kaz melawan daya impak



RAJAH 5 . Pekali M-Z-N melawan daya impak

Kemudian, nilai pekali kuadratik,  $a$  daripada persamaan kuadratik  $ax^2+bx+c$  diekstrak. Jadual 1 mencatatkan nilai-nilai pekali kuadratik bagi kedua-dua kaedah I-kaz dan M-Z-N bersama nilai teoretikal modulus Young daripada perisian CES untuk kesemua spesimen.

Selepas itu, kolerasi kali kedua dilakukan dengan memetakan modulus Young melawan pekali kuadratik. Kali ini, salah satu daripada spesimen diasingkan bagi setiap graf. Jadi hanya data daripada lima spesimen dimasukkan ke dalam suatu graf manakala satu lagi ditinggalkan. Sebagai contoh jika nilai keluli aloi 6582 tidak dimasukkan dalam pemetaan graf, nilai daripada lima spesimen lain pula digunakan untuk mendapatkan hubungan kait melalui kolerasi. Begitu juga jika sebaliknya.

Rajah 6 menunjukkan kolerasi pekali kuadratik I-kaz dengan nilai teoretikal modulus Young, manakala Rajah 7 adalah kolerasi bagi pekali kuadratik M-Z-N. Enam graf yang berbeza dengan mengecualikan salah satu spesimen bagi setiap graf. Persamaan linear diseragamkan melalui penyuaiian lengkung terbaik untuk memberikan garis pangkal yang konsisten dan juga terkawal.

Setiap persamaan linear tersebut digunakan untuk menentukan modulus Young bagi bahan spesimen yang diasingkan pada peringkat awal kolerasi. Penentuan melalui kaedah I-kaz bermula daripada persamaan 23 hingga 28, yang mana ianya akan digunakan untuk menentukan sifat bahan mengikut urutan iaitu keluli aloi, gangsa, besi tuang, tembaga, keluli acuan plastik hingga keluli alat kerja sejuk. Sama juga seperti kaedah M-Z-N, persamaan 29 hingga 34 digunakan untuk mencari modulus Young semua bahan mengikut turutan.

JADUAL 1. Pekali kuadratik I-kaz dan M-Z-N bersama nilai teoretikal modulus Young

Jenis Bahan	Pekali Kuadratik I-kaz	Pekali Kuadratik M-Z-N	Modulus Young teoretikal (GPa)
Keluli Aloi 6582	$5.79 \times 10^{-13}$	$2.40 \times 10^{-8}$	203.7
Bahan Gangsa	$5.70 \times 10^{-14}$	$-1.94 \times 10^{-10}$	..78.8
Besi Tuang T250	$1.18 \times 10^{-13}$	$6.98 \times 10^{-9}$	113.8
Bahan Tembaga	$2.00 \times 10^{-13}$	$5.23 \times 10^{-9}$	123.0
Keluli Acuan Plastik P20	$7.51 \times 10^{-13}$	$6.04 \times 10^{-9}$	205.8
Keluli Alat Kerja Sejuk SKD 11	$6.06 \times 10^{-13}$	$7.62 \times 10^{-9}$	208.8

Selepas itu, kolerasi kali kedua dilakukan dengan memetakan modulus Young melawan pekali kuadratik. Kali ini, salah satu daripada spesimen diasingkan bagi setiap graf. Jadi hanya data daripada lima spesimen dimasukkan ke dalam suatu graf manakala satu lagi ditinggalkan. Sebagai contoh jika nilai keluli aloi 6582 tidak dimasukkan dalam pemetaan graf, nilai daripada lima spesimen lain pula digunakan untuk mendapatkan hubungan kait melalui kolerasi. Begitu juga jika sebaliknya.

Rajah 6 menunjukkan kolerasi pekali kuadratik I-kaz dengan nilai teoretikal modulus Young, manakala Rajah 7 adalah kolerasi bagi pekali kuadratik M-Z-N. Enam graf yang berbeza mengikut kaedah terhasil dengan mengecualikan salah satu spesimen bagi setiap graf. Persamaan linear diseragamkan melalui penyuaiian lengkung terbaik untuk memberikan garis pangkal yang konsisten dan juga terkawal.

Setiap persamaan linear tersebut digunakan untuk menentukan modulus Young bagi bahan spesimen yang diasingkan pada peringkat awal kolerasi. Penentuan melalui kaedah I-kaz bermula daripada persamaan 23 hingga 28, yang mana ianya akan digunakan untuk menentukan sifat bahan mengikut urutan iaitu keluli aloi, gangsa, besi tuang, tembaga, keluli acuan plastik hingga keluli alat kerja sejuk. Sama juga untuk kaedah M-Z-N, persamaan 29 hingga 34 digunakan untuk mencari modulus Young semua bahan mengikut turutan.

$$E = 1.81934 \times 10^{14}x + 83.00232 \tag{23}$$

$$E = 1.69536 \times 10^{14}x + 94.57582 \tag{24}$$

$$E = 1.96648 \times 10^{14}x + 77.76698 \tag{25}$$

$$E = 1.90114 \times 10^{14}x + 81.89649 \tag{26}$$

$$E = 2.19296 \times 10^{14}x + 77.18828 \tag{27}$$

$$E = 1.80683 \times 10^{14}x + 83.38605 \tag{28}$$

$$E = 1.30644 \times 10^{10}x + 78.93448 \tag{29}$$

$$E = 2.52837 \times 10^9x + 145.77428 \tag{30}$$

$$E = 4.03207 \times 10^9x + 129.54514 \tag{31}$$

$$E = 3.97944 \times 10^9x + 126.7633 \tag{32}$$

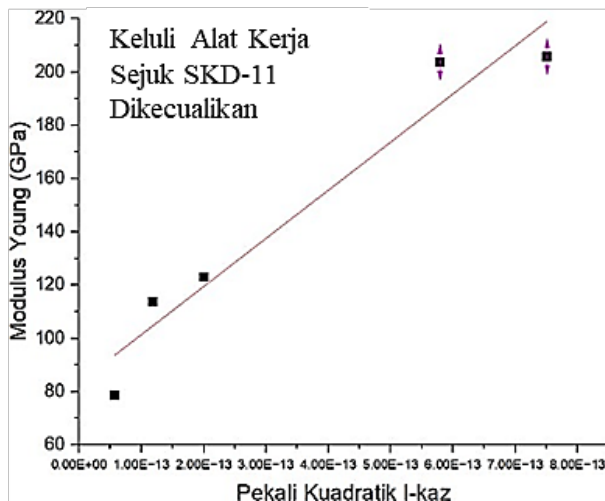
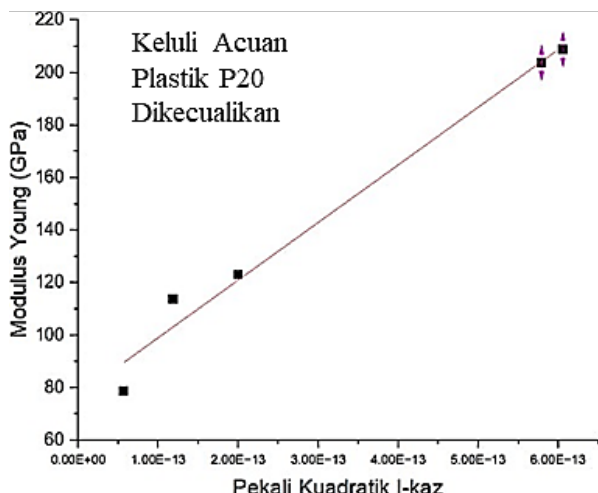
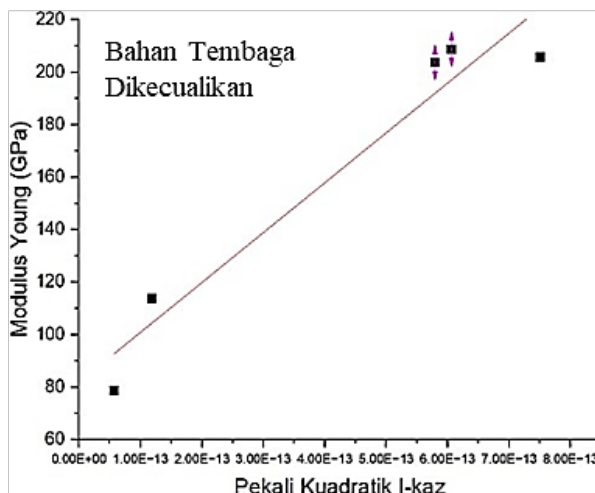
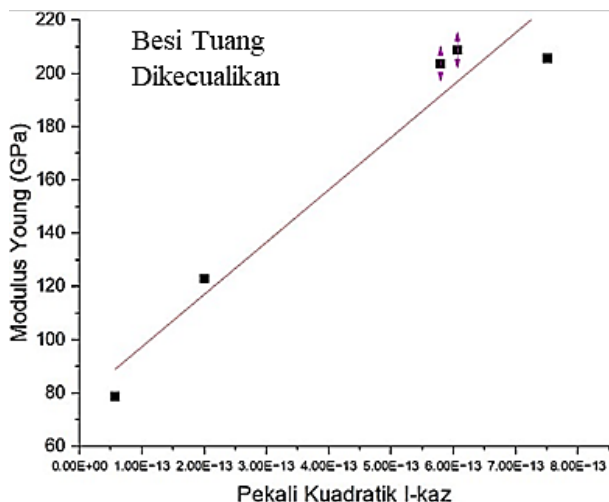
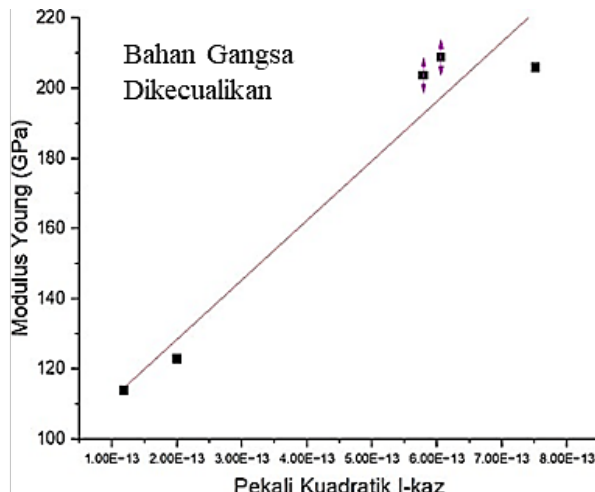
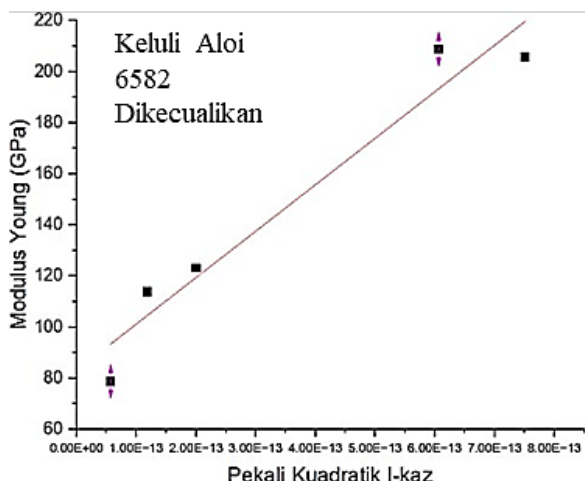
$$E = 2.71189 \times 10^9x + 126.0581 \tag{33}$$

$$E = 4.33682 \times 10^9x + 108.49101 \tag{34}$$

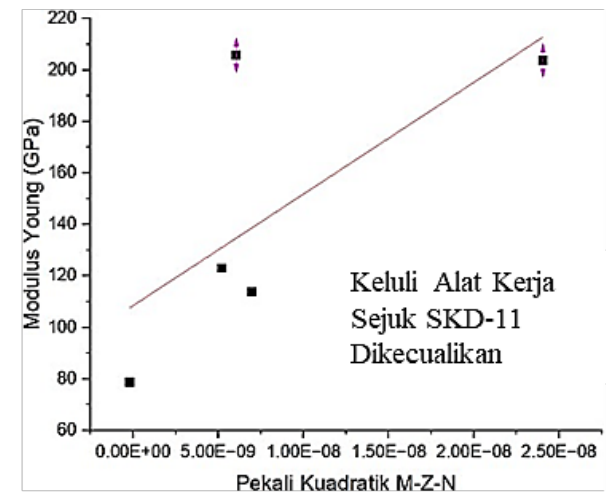
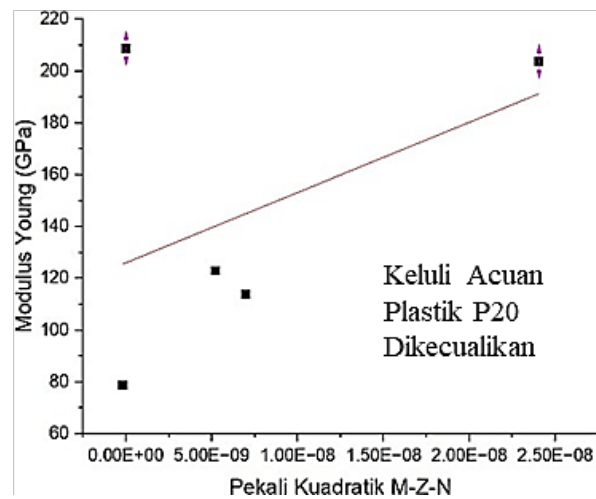
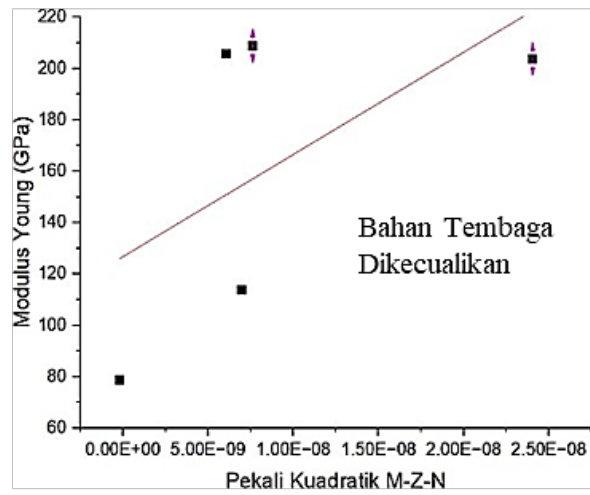
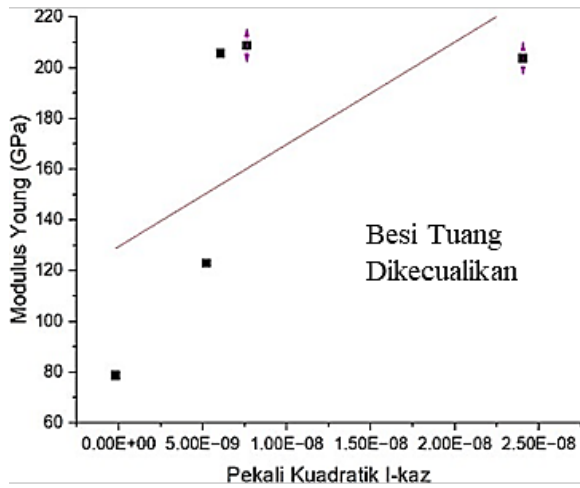
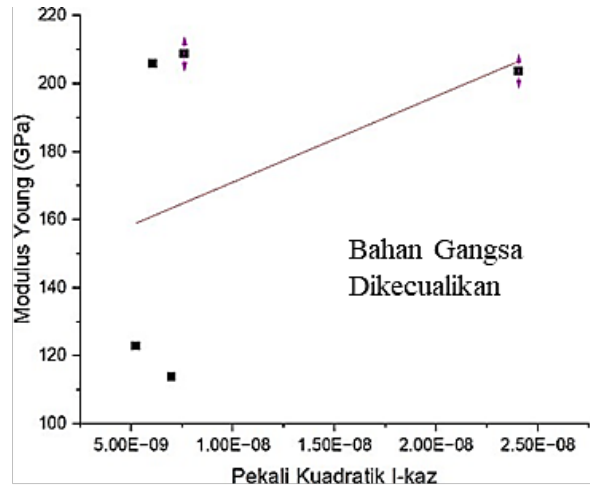
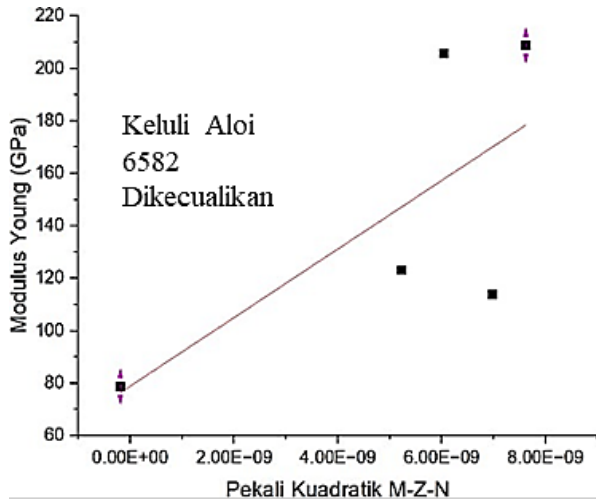
Persamaan linear tersebut dibangunkan melalui ungkapan  $y = ax + b$ . Dengan menukarkannya kepada pembolehubah berdasarkan kajian ini, ungkapan tersebut menjadi  $E = a$  (pekali kuadratik) + b. Sebagai contoh, jika ingin mencari nilai daripada bahan keluli aloi 6582, pekali kuadratik I-kaz dan M-Z-N daripada Jadual 1 dimasukkan ke dalam persamaan 23 dan 29 untuk menentukan modulus Young seperti di bawah.

$$E_{ikaz} = 1.81934 \times 10^{14}(5.79 \times 10^{-13}) + 83.00232 = 188.3 \text{ GPa}$$

$$E_{mzn} = 1.30644 \times 10^{10} (2.40 \times 10^{-8}) + 78.93448 = 393.1 \text{ GPa}$$



RAJAH 6. Modulus Young melawan pekali kuadratik I-kaz dengan salah satu bahan dikecualikan bagi setiap graf



RAJAH 7. Modulus young melawan pekali kuadratik m-z-n dengan salah satu bahan dikecualikan bagi setiap graf

## PENGESAHAN PENENTUAN MODULUS YOUNG MELALUI PERBANDINGAN RALAT

Kesemua nilai modulus Young yang ditentukan melalui persamaan linear mengikut jenis bahan spesimen dicatatkan dalam Jadual 2 bersama pekali penentuan,  $R^2$  yang diterbitkan melalui regresi linear tersebut. Modulus Young daripada CES dianggap sebagai nilai teoretikal, manakala daripada I-kaz dan M-Z-N pula dianggap sebagai nilai anggaran daripada kajian ini.

$R^2$  merupakan pekali penunjuk terhadap kesesuaian garis regresi dengan titik-titik data dalam graf. Berdasarkan jadual,  $R^2$  kesemua enam spesimen melalui kaedah I-kaz memberikan nilai melebihi 0.9. Manakala M-Z-N pula kurang daripada 0.5, dengan nilai julat antara 0.17 hingga 0.48. Ini menunjukkan bahawa hubungan linear adalah lemah antara pembolehubah M-Z-N dengan isyarat impuls. I-kaz pula mendekati nilai 1, justeru hubungan linear model I-kaz dengan isyarat sambutan impuls adalah kuat. Nilai purata  $R^2$  bagi I-kaz adalah 0.94908, manakala M-Z-N pula adalah 0.34790.

JADUAL 2. Ringkasan Keputusan Modulus Young Melalui Kaedah I-kaz dan M-Z-N

Jenis Bahan	Modulus Young (CES), $E^{teori}$ (GPa)	Modulus Young (I-kaz), $E^{ikaz}$ (GPa)	Ralat (I-kaz), %	$R^2$ (I-kaz)	Modulus Young (M-Z-N), $E^{mzn}$ (GPa)	Ralat (M-Z-N), %	$R^2$ (M-Z-N)
Keluli Aloil 6582	203.7	188.3	7.54	0.94518	393.1	92.99	0.48688
Bahan Gangsa	78.8	104.2	32.27	0.94147	145.3	84.37	0.17247
Besi Tuang T250	113.8	101.0	11.21	0.94304	157.7	38.57	0.38142
Bahan Tembaga	123.0	119.9	2.50	0.93941	147.6	19.99	0.34167
Keluli Acuan Plastik P20	205.8	241.9	17.55	0.98223	142.5	30.78	0.21714
Keluli Alat Kerja Sejuk SKD 11	208.8	192.9	7.63	0.94312	141.5	32.22	0.48723
Nilai Purata			13.12	0.94908		49.82	0.34790

Ralat dikira berdasarkan perbandingan antara nilai teoretikal (CES) dengan nilai anggaran (I-kaz dan M-Z-N). Nilai ralat bagi kaedah I-kaz adalah antara julat 7 hingga 32 peratus, manakala julat daripada kaedah M-Z-N pula adalah sangat tinggi, antara 19 hingga 92 peratus. Kiraan nilai purata ralat pula adalah 13.12% bagi I-kaz dan 49.82% bagi M-Z-N. Keputusan nilai ralat ini adalah selaras dengan nilai  $R^2$  yang diterbitkan daripada kedua-dua kaedah. Oleh yang demikian, kaedah I-kaz dilihat jauh lebih efektif berbanding M-Z-N.

Terdapat beberapa faktor utama yang menjurus kepada keberkesanan I-kaz. Antaranya adalah kepekaan kaedah I-kaz terhadap perubahan spesifik frekuensi. I-kaz memisahkan data isyarat kepada tiga jalur frekuensi yang berbeza. Keupayaan menganalisis taburan data dalam jalur-jalur frekuensi membolehkannya mengesan perubahan kecil getaran dalam julat frekuensi tertentu yang

mempunyai kaitan dengan modulus Young. Faktor yang lain pula adalah melalui formula asas I-kaz yang diterbitkan melalui momen statistik kurtosis dan kuasa empat sisihan piawai yang sensitif terhadap 'kepuncak' atau sifat impulsif taburan isyarat berbilang jalur. Jadi ia mampu mengesan perubahan kecil keamatan tenaga impulsif dalam isyarat getaran yang tidak mampu dilakukan oleh M-Z-N.

Di samping itu, beberapa punca ketara ketidakcekapan kaedah M-Z-N yang mengakibatkan ralat yang tinggi sehingga 92% itu telah dikenalpasti. Salah satunya adalah pendekatannya yang berlandaskan statistik tak parametrik. Ini bermakna tiada andaian model matematik yang tetap, tidak seperti I-kaz yang bersandarkan kepada momen statistik. Akibatnya, nilai terbitan pekali lebih mudah dipengaruhi oleh hingar, bentuk impuls, dan resolusi frekuensi, lalu menyebabkan ralat yang tinggi. Tambahan pula, M-Z-N membahagi isyarat getaran kepada beberapa

zon tenaga tempatan menyebabkan sensitiviti terhadap varians yang tinggi. Oleh sebab itu, walaupun perubahan impuls adalah kecil, perubahan nisbah tenaga mengikut zon tetap tinggi. Justeru, M-Z-N menjadi kurang stabil kerana ciri zonal turun naik antara impak. Secara tidak langsung pembesaran ralat berlaku apabila pekali model polinomial daripada regresi pertama dibawa ke regresi kedua sebagai input untuk mendapat persamaan empirikal terhadap modulus Young.

Walaupun bagaimanapun, kedua-dua kaedah statistik masih memberikan nilai purata ralat melebihi 10%. Terdapat dua faktor utama yang menyebabkan ketirisan ini. Salah satunya adalah penggunaan data yang tidak mencukupi. Hanya enam spesimen yang digunakan untuk mendapatkan hubungkait asas yang kompleks antara sifat elastik bahan dengan pekali regresi setiap spesimen. Bilangan titik data yang mewakili setiap spesimen masih terhad untuk melatih model statistik yang teguh. Seterusnya ia menyebabkan jurang yang besar dan gangguan unsur luaran di antara titik-titik tersebut, lalu tidak membenarkan kaedah statistik mempelajari corak asas dengan berkesan.

Satu lagi faktor adalah parameter I-kaz dan M-Z-N terdedah kepada hingar atau unsur luaran daripada isyarat getaran yang dicerap oleh penerima filem piezoelektrik. Penggunaan penerima berkost rendah dalam pemantauan kesihatan struktur sering menghasilkan isyarat getaran dengan hingar yang berpunca daripada pelbagai faktor luaran, seperti gangguan persekitaran, peralatan elektronik, atau ketidakstabilan sistem (Ravizza et al. 2021). Secara tidak langsung ianya memesongkan ciri isyarat yang diekstrak dan seterusnya membentuk model regresi untuk menganggar modulus Young dengan kebolehpercayaan yang rendah. Oleh itu, strategi penyahhingaran yang berkesan diperlukan dalam proses pasca-pemprosesan untuk memastikan ketepatan isyarat yang diperolehi.

## CADANGAN PENAMBAHBAIKAN DAN ARAH KAJIAN LANJUTAN

Berdasarkan dapatan dan analisis yang diperolehi, beberapa penambahbaikan dan hala tuju lanjutan dicadangkan bagi meningkatkan kebolehpercayaan hasil kajian ini.

Antara penambahbaikan yang boleh dilakukan adalah dengan menambah bilangan sampel bahan logam. Walaupun jumlah semasa memadai untuk menunjukkan keberkesanan kaedah antara I-kaz dan M-Z-N, bilangan sampel yang lebih besar akan memperkukuh kebolehgunaan model empirikal terhadap pelbagai jenis logam yang berbeza struktur mikro dengan sifat mekanikal bahan. Ini turut membantu mengurangkan isu underfitting seperti yang diperhatikan dalam keputusan kaedah M-Z-N,

di mana model gagal menangkap sepenuhnya variasi antara bahan menyebabkan ralat yang tinggi. Dengan set data yang lebih luas, model regresi yang dibina akan mempunyai keupayaan pembelajaran yang lebih baik dan mampu menghasilkan anggaran Modulus Young yang lebih stabil dan konsisten, serta mewakili keseluruhan populasi bahan logam.

Kualiti isyarat sambutan impuls memainkan peranan penting dalam memastikan ciri statistik yang diperolehi benar-benar mewakili tindak balas dinamik bahan. Oleh itu, Langkah penurasan frekuensi wajar dilaksanakan bagi menyingkirkan hingar atau gangguan yang berpunca daripada peralatan dan persekitaran ujian. Kaedah seperti penuras jalur laluan (*band-pass filter*), penuras gelombang kecil (*wavelet denoising*), atau teknik pemotongan berdasarkan tenaga (*energy thresholding*) boleh digunakan untuk mendapatkan isyarat yang lebih bersih sebelum pengiraan pekali I-kaz dan M-Z-N dijalankan. Langkah prapemprosesan ini bukan sahaja meningkatkan kestabilan pengiraan ciri statistik, malah membantu mengurangkan ralat penganggaran dalam penentuan Modulus Young.

Selain pendekatan regresi dua langkah, penggunaan kaedah pembelajaran mesin (*machine learning*) boleh diterokai sebagai pendekatan lanjutan bagi meramal nilai Modulus Young secara automatik berdasarkan ciri-ciri statistik seperti I-kaz dan M-Z-N. Model seperti Regresi Vektor Sokongan (SVR), Regresi Proses Gaussian (GPR), Hutan Rawak, atau Rangkaian Saraf Tiruan (ANN) boleh digunakan untuk mengenal pasti hubungan bukan linear yang kompleks antara ciri-ciri isyarat statistik dan sifat mekanikal bahan. Pendekatan ini membuka ruang kepada pembangunan model ramalan yang lebih pintar dan dipacu data (*data-driven*), sekaligus mendorong evolusi IET ke arah pendekatan analisis berprestasi tinggi yang lebih adaptif, tepat, dan cekap.

## KESIMPULAN

Pencirian melalui penganggaran sifat elastik bahan berdasarkan ujikaji IET serta penggunaan kaedah analisis statistik alternatif telah berjaya dibangunkan. Dua kaedah alternatif iaitu I-kaz dan M-Z-N digunakan untuk mengekstrak data isyarat getaran sambutan impuls kepada ciri-ciri isyarat statistik tunggal dan kemudian dikolerasi dengan daya impuls untuk mendapatkan pekali persamaan kuadratik. Pekali-pekali tersebut dipetakan bersama nilai teoretikal modulus Young dan regresi linear dibentuk. Persamaan linear daripada regresi tersebut digunakan untuk menganggar nilai modulus Young secara analitikal.

Secara purata, nilai ralat bagi kaedah I-kaz adalah 13.12% dan 49.82% bagi M-Z-N. Manakala  $R^2$  untuk

persamaan linear bagi I-kaz adalah 0.94908 dan M-Z-N pula adalah 0.34790. Kebolehpayaan kaedah I-kaz adalah jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan M-Z-N. Walaubagaimanapun, nilai ralat melebihi 10% juga menunjukkan terdapat beberapa faktor atau kelemahan yang perlu ditangani seperti penggunaan data yang terhad kerana bilangan spesimen yang tidak mencukupi serta hingar yang tidak dapat dielakkan.

Namun demikian, kajian ini secara tidak langsung membantu penyelidik menentukan kaedah statistik yang sensitif terhadap perubahan isyarat getaran dan impuls pelbagai jenis bahan logam yang berkait dengan sifat modulus Young. Ciri isyarat statistik yang sesuai, kolerasi yang bagus dan regresi dengan kepadanan lengkung yang baik antara pengujaan impuls dan isyarat sambutan boleh mentakrifkan sifat modulus Young dengan berkesan. Maklumat ini boleh menjadi pemangkin terhadap penyelidik dalam memilih kaedah yang sesuai dalam meneroka hubungan isyarat getaran dengan keanjalan bahan pada masa hadapan, sam ada menambah jumlah set data sampel, menuras hingar untuk mendapat isyarat sambutan bersih ataupun menadaptasi pembelajaran mesin untuk kaedah dipacu data.

## PENGHARGAAN

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia kerana menyediakan pembiayaan penyelidikan dan bantuan teknikal yang diperlukan sepanjang kajian, termasuk bimbingan pakar, bilik anekoik di makmal akustik, dan akses peralatan.

## PERNYATAAN KEPENTINGAN YANG BERCANGGAH

Tiada.

## RUJUKAN

- Ahmad, M. A. F., Nuawi, M. Z., Abdullah, S., Tahir, M. F. M. & Ahmad, M. I. M. 2025. Data-driven impulse excitation technique via statistical signal analysis for determining materials' elastic properties. *International Journal of Integrated Engineering* 17(5): 14-28.
- Ahmad, M. A. F., Nuawi, M. Z., Mohamed, N. F., Wahid, Z. & Dirhamsyah, M. 2016. The study of polymer material characterisation using MZN statistical analysis method. *Jurnal Kejuruteraan* 28: 9-18.
- Altaf, M., Akram, T., Khan, M. A., Iqbal, M., Ch, M. M. I. & Hsu, C.-H. 2022. A new statistical features based approach for bearing fault diagnosis using vibration signals. *Sensors* 22(5): 2012.
- Amabili, M. 2018. Nonlinear damping in large-amplitude vibrations: modelling and experiments. *Nonlinear Dynamics* 93(1): 5-18.
- Andrade, C. 2023. Understanding statistical noise in research: 1. Basic concepts. *Indian Journal of Psychological Medicine* 45(1): 89-90.
- Boursier Niutta, C. 2020. Enhancement of a new methodology based on the impulse excitation technique for the nondestructive determination of local material properties in composite laminates. *Applied Sciences* 11(1): 101.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. 2022. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- International, A. 2022. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Li, Z., Alkhayyat, A., Yadav, A., Samavatian, M. & Samavatian, V. 2024. Elastic constant analysis of orthotropic steel sheets using multitask machine learning and the impulse excitation technique. *Physica Scripta* 100(1): 016014.
- Liu, Y., Alkhazaleh, H. A., Khan, M. A., Samavatian, M. & Samavatian, V. 2024. Local elasticity assessment of unidirectional fiber-reinforced polymer composites through impulse excitation and machine learning. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*: 07316844241307083.
- Massara, N., Boccaleri, E., Milanesio, M. & Lopresti, M. 2021. IETeasy: An open source and low-cost instrument for impulse excitation technique, applied to materials classification by acoustical and mechanical properties assessment. *HardwareX* 10: e00231.
- Mccauley, J. W. & Weiss, V. 2013. *Materials Characterization for Systems Performance and Reliability*. 26. Springer Science & Business Media.
- Meynard, J., Amado-Becker, F., Tchoreloff, P. & Mazel, V. 2021. Use of impulse excitation technique for the characterization of the elastic anisotropy of pharmaceutical tablets. *International Journal of Pharmaceutics* 605: 120797.
- Mohd Ghazali, M. H. & Rahiman, W. 2021. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration* 2021(1): 9469318.
- Nuawi, M., Bahari, A., Abdullah, S., Ihsan, A. & Ali, M. 2012. Mesokurtosis zonal nonparametric signal analysis for dynamic characterisation of metallic material. *J. Kejuruter* 24: 21-27.

- Nuawi, M., Nor, M., Jamaludin, N., Abdullah, S., Lamin, F. & Nizwan, C. 2008. Development of integrated kurtosis-based algorithm for z-filter technique. *Journal of applied sciences* 8(8): 1541-1547.
- Othman, M. N., Nuawi, M. Z., Ngatiman, N. A. & Yusri, M. Y. 2025. Novel Z-Chart for Predicting Insufficient Oil of Automotive Belt-Driven Air Conditioning Compressor. *Jurnal Kejuruteraan* 37(4): 2003-2014.
- Popov, I. & Shitikova, M. 2020. Impulse excitation technique and its application for identification of material damping: An overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, hlm. 022025.
- Ramli, M., Nuawi, M., Rasani, M., Ngatiman, N., Basar, M. & Ghani, A. A. 2020. Analysis of Young modulus and Poisson ratio using I-kaz 4D analysis method through piezofilm sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, hlm. 042025.
- Ravizza, G., Ferrari, R., Rizzi, E. & Dertimanis, V. 2021. On the denoising of structural vibration response records from low-cost sensors: A critical comparison and assessment. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 11(5): 1201-1224.
- Riza, N. S. M., Zainuri, N. A., Nuawi, M. Z., Razali, N. & Othman, H. 2022. Pencirian Sifat Mekanikal Bahan dengan Pendekatan Analisis Fraktal. *Jurnal Kejuruteraan*: 111-118.
- Scislo, L. 2023. Verification of mechanical properties identification based on impulse excitation technique and mobile device measurements. *Sensors* 23(12): 5639.
- Shen, Z., Samavatian, M. & Samavatian, V. 2024. Integrating impulse excitation technique and machine learning to analyze elastic moduli in surface coatings. *European Journal of Mechanics-A/Solids* 105: 105250.
- Zhang, L., Zhang, W., Xu, H. & Ma, Y. 2024. A new method for identifying elastic parameters of isotropic materials based on square specimens. *Scientific Reports* 14(1): 21051.