

Jurnal Kejuruteraan 38(6) 2026: 2889-2896
[https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38\(6\)-20](https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38(6)-20)

Kestabilan Gentian Optik Mod Tunggal di Bawah Getaran Seismik Simulasi untuk Rangkaian Penderiaan Bersepadu

(Stability of Single-Mode Optical Fiber Under Simulated Seismic Vibration for Integrated Sensing Networks)

Long Muhammad Haziq Long Hassan, Ji Loun Tan, Nurfarhana Mohd Sapiee, Norazreen Abd Aziz, Mohd Hadri Hafiz Mokhtar & Norhana Arsad*

Department of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, UKM Bangi 43600, Malays Long Muhammad Haziq Long Hassania.

*Corresponding author: noa@ukm.edu.my

Received 23 December 2025, Received in revised form 7 May 2026
 Accepted 7 June 2026, Available online 30 September 2026

ABSTRAK

Peningkatan aktiviti seismik yang ketara di Malaysia, khususnya di Sabah, telah mengukuhkan keperluan terhadap strategi pemantauan dan mitigasi gempa bumi yang lebih canggih. Kajian ini meneliti ketahanan gentian optik mod tunggal di bawah keadaan getaran terkawal yang menyerupai rangsangan mekanikal seakan-seismik, serta menilai kesesuaiannya sebagai medium komunikasi yang teguh dan sebagai infrastruktur asas kepada sistem pemantauan seismik berasaskan gentian optik. Kesan amplitud getaran yang berbeza ke atas parameter penghantaran optik utama seperti Kuasa Puncak Maksimum, Panjang Gelombang Puncak, Panjang Gelombang Purata dan Kuasa Keseluruhan telah dikaji melalui eksperimen makmal menggunakan gegar MicroMix 5, Optical Spectrum Analyzer (OSA) dan AQ2201 Frame Controller yang menguasai gentian optik mod tunggal sepanjang 400 m pada panjang gelombang 1550.5 nm. Keputusan menunjukkan variasi yang sangat kecil bagi Kuasa Puncak Maksimum dan Panjang Gelombang Puncak, masing-masing dengan perbezaan peratusan sekitar 1.49% dan 0.0003%, sekali gus menggambarkan tahap kestabilan yang tinggi merentasi semua tahap getaran. Kuasa Keseluruhan menunjukkan variasi yang sedikit lebih besar, iaitu sekitar 2.85%, namun masih dalam julat sederhana. Analisis varians sehalu (ANOVA) mengesahkan perbezaan yang signifikan secara statistik antara tahap getaran bagi semua parameter; walau bagaimanapun, magnitud mutlak perbezaan tersebut kekal kecil, sekali gus menegaskan keteguhan gentian optik mod tunggal di bawah keadaan mekanikal yang diuji. Secara keseluruhannya, dapatan ini membuktikan bahawa gentian optik mod tunggal mampu mengekalkan integriti struktur dan kestabilan penghantaran isyarat dalam persekitaran yang terdedah kepada getaran, sekali gus mengukuhkan peranannya sebagai medium komunikasi optik yang boleh dipercayai serta menyokong potensinya sebagai tulang belakang kepada sistem pemantauan seismik berasaskan gentian optik.

Kata kunci: Gempa bumi; getaran; gentian optik mod tunggal; analisis data; pemantauan seismik

ABSTRACT

Growing seismic activity in Malaysia, particularly in regions such as Sabah, has heightened the need for advanced earthquake monitoring and risk-mitigation strategies. This study investigates the resilience of single-mode optical fiber under controlled vibration conditions that emulate seismic-like mechanical excitation and evaluates its suitability both as a robust communication medium and as an enabling backbone for fiber-based seismic sensing. The effects of varying vibration amplitudes on key optical transmission properties which maximum peak power, peak wavelength, mean wavelength, and total power were examined in laboratory experiments using a MicroMix 5 shaker, an optical spectrum analyzer (OSA), and an AQ2201 frame controller to interrogate a 400-m single-mode fiber at 1550.5 nm. The results show very small variations in maximum peak power and peak wavelength, with percentage differences of approximately

1.49% and 0.0003%, respectively, indicating high stability across vibration levels. Total power exhibits a slightly larger, yet still moderate, variation of about 2.85%. One-way ANOVA confirms statistically significant differences among vibration levels for all parameters; however, the absolute magnitudes of these differences remain small, underscoring the robustness of single-mode optical fiber under the tested mechanical conditions. These findings demonstrate that single-mode optical fiber maintains its structural integrity and transmission performance in vibration-prone environments, reinforcing its role as a reliable medium for optical communication and supporting its potential use as an underlying infrastructure for distributed fiber-optic seismic monitoring systems.

Keywords: Earthquake; vibration; single-mode optical fiber; data analysis; seismic monitoring

PENDAHULUAN

Secara tradisional, Malaysia sering digambarkan sebagai negara berisiko seismik rendah. Namun, beberapa kejadian gempa bumi dalam dekad kebelakangan ini menunjukkan bahawa risiko sebenar adalah lebih kompleks, khususnya di Sabah yang diklasifikasikan sebagai zon aktiviti seismik sederhana (Sauti et al. 2022; Noh et al. 2021; Tongkul 2021). Kajian kerentanan struktur dan rekod kejadian terkini menunjukkan bahawa walaupun magnitud gempa bumi adalah sederhana, kedudukan sumber, keadaan tanah tempatan dan kualiti pembinaan boleh memperbesarkan kesan terhadap bangunan dan infrastruktur tempatan (Marto et al. 2013; Loi et al. 2018). Selain itu, gempa bumi jauh di zon subduksi berhampiran, seperti di sekitar Sumatra dan Lautan Hindi, berpotensi menimbulkan bahaya sampingan seperti gelombang tsunami dan ketidakstabilan cerun yang menjejaskan komuniti pesisir (Benazir et al. 2023). Dalam konteks ini, data pemantauan seismik yang lebih tumpat dan berkualiti tinggi menjadi asas penting kepada penilaian bahaya dan strategi mitigasi yang berkesan (Tongkul 2021; Freddi et al. 2021).

Salah satu cabaran utama dalam pengurusan risiko gempa bumi di Malaysia ialah keterbatasan rangkaian pemantauan seismik konvensional. Rangkaian seismometer lazimnya tertumpu di kawasan tertentu, dengan jurang liputan yang ketara di lokasi luar bandar, pesisir dan perairan dalam, walhal infrastruktur kritikal seperti empangan, jambatan, pelabuhan dan saluran paip merentasi kawasan-kawasan ini (Freddi et al. 2021). Kos pemasangan, operasi dan penyelenggaraan seismometer konvensional dalam skala besar adalah tinggi, manakala keperluan tenaga, keperluan tapak dan cabaran logistik di kawasan terpencil mengehadkan keupayaan untuk menambah ketumpatan instrument (Trnkoczy et al. 2012). Di samping itu, terdapat keperluan untuk meningkatkan kesedaran awam dan kapasiti sumber manusia dalam pemantauan dan tindak balas seismik (Shaw et al. 2009; Benazir et al. 2023).

Sejajar dengan perkembangan teknologi penderiaan moden, gentian optik muncul sebagai platform yang menarik untuk pemantauan struktur dan geofizik malah merangkumi inovasi struktur seperti gentian tirus untuk aplikasi penderiaan persekitaran yang lebih sensitif (Han

et al. 2025). Pendekatan Distributed Acoustic Sensing (DAS) dan kaedah berasaskan interferometer telah menunjukkan potensi besar untuk merekodkan gelombang seismik dan getaran struktur sepanjang gentian optik yang dipasang bagi tujuan komunikasi (Taha et al. 2025; Jabidin et al. 2024; Yu J. et al. 2023; Zhu et al. 2023; Wang et al. 2019). Selain pemantauan seismik berskala besar, prinsip pengesanan isyarat serak-balik turut terbukti berkesan dalam aplikasi berketepatan tinggi seperti pengimbas gentian resonans yang digerakkan oleh piezoelektrik (Ser et al. 2019). Kelebihan utama pendekatan ini ialah keupayaan untuk memanfaatkan rangkaian telekomunikasi gentian optik sedia ada sebagai deretan penderia yang memanjang, sekali gus membolehkan pemantauan berskala besar dengan pertambahan kos infrastruktur (Liu et al. 2022; Ghazali et al. 2024). Hal ini amat relevan di Malaysia, di mana rangkaian gentian optik semakin meluas bagi menyokong komunikasi jalur lebar dan perkhidmatan digital.

Walau bagaimanapun, sebelum rangkaian gentian optik telekomunikasi dapat digunakan secara meluas sebagai platform pemantauan seismik, beberapa persoalan asas perlu terlebih dahulu dijawab. Antaranya, sejauh mana getaran yang menyerupai beban seismik sederhana boleh mempengaruhi kestabilan penghantaran isyarat dalam gentian optik mod tunggal, dan sama ada variasi ini cukup kecil untuk tidak menjejaskan fungsi komunikasi konvensional. Di samping itu, pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara amplitud getaran dan perubahan parameter optik seperti kuasa puncak, panjang gelombang puncak, panjang gelombang purata dan kuasa keseluruhan amat penting untuk menilai margin operasi yang selamat bagi gentian optik mod tunggal.

Memandangkan konteks ini, kajian ini memberi tumpuan kepada penilaian eksperimen ke atas prestasi penghantaran gentian optik mod tunggal asas yang tertakluk kepada getaran simulasi dalam keadaan makmal yang terkawal bagi mewujudkan penanda aras kes asas untuk kestabilan aplikasi dwi-fungsi. Objektif utama kajian adalah untuk: (i) menyiasat kesan amplitud getaran yang berbeza ke atas parameter penghantaran optik utama, iaitu Kuasa Puncak Maksimum, Panjang Gelombang Puncak, Panjang Gelombang Purata dan Kuasa Keseluruhan; (ii)

menilai kestabilan dan kepekaan gentian optik mod tunggal terhadap perubahan getaran dalam konfigurasi gulungan gentian yang mewakili pemasangan praktikal; dan (iii) implikasi dapatan ini terhadap kesesuaian gentian optik sebagai komponen penting kepada sistem pemantauan seismik berasaskan gentian optik di kawasan berisiko seismik.

Dengan itu, kajian ini menyumbang kepada asas empirikal bagi pengintegrasian rangkaian telekomunikasi dan sistem penderiaan pintar, sejajar dengan trend global ke arah pemantauan infrastruktur yang lebih pintar dan kos efektif.

METODOLOGI

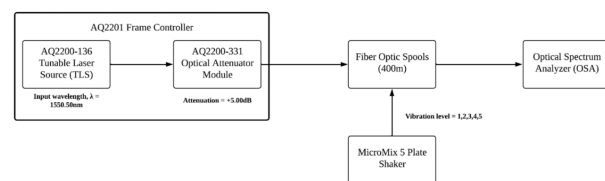
REKA BENTUK EKSPERIMEN DAN KONFIGURASI SISTEM

Bahagian ini menerangkan reka bentuk eksperimen dan prosedur pengumpulan data yang digunakan untuk mengkaji kesan getaran simulasi ke atas prestasi penghantaran gentian optik mod tunggal. Kajian ini dilaksanakan dalam persekitaran makmal bagi memastikan keadaan kawalan yang baik dan pengulangan pengukuran yang konsisten. Reka bentuk eksperimen keseluruhan dirumuskan dalam bentuk rajah blok seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1, yang memperincikan susunan sumber optik, gentian optik, gegar mekanikal dan peralatan pengukuran. Konfigurasi ini membolehkan rangsangan getaran dikenakan secara sistematik kepada gelung gentian sambil parameter penghantaran optik dipantau secara berterusan.

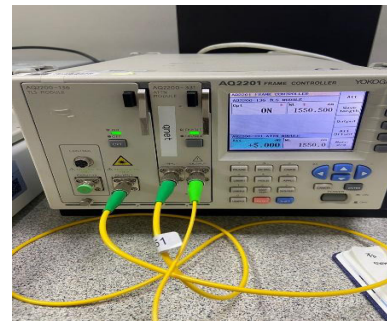
Sistem eksperimen terdiri daripada beberapa komponen utama, iaitu sumber optik, gegar mekanikal (MicroMix 5 Shaker), gentian optik mod tunggal, Optical Spectrum Analyzer (OSA) dan AQ2201 Frame Controller sebagai instrumen kawalan dan pengukuran utama. Gentian optik yang digunakan ialah gentian optik mod tunggal sepanjang 400 m yang digulung dalam bentuk gegelung untuk mensimulasikan konfigurasi pemasangan praktikal. Sumber optik beroperasi pada panjang gelombang nominal 1550.5 nm, yang merupakan julat operasi lazim bagi sistem telekomunikasi gentian optik. Keluaran sumber optik disalurkan melalui attenuator dan sambungan gentian yang sesuai sebelum memasuki gegelung gentian 400 m, manakala hujung keluar gentian disambungkan kepada OSA untuk penganalisan spektrum optik, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2 dan Rajah 3.

Getaran mekanikal dikenakan kepada gegelung gentian menggunakan MicroMix 5 Shaker seperti yang digambarkan dalam Rajah 3. Gegar ini dipasang pada platform yang kukuh, manakala gegelung gentian diikat

dengan kemas pada permukaan gelung gegar untuk memastikan pemindahan tenaga getaran yang berkesan. Dalam kajian ini, gegar dikendalikan pada lima tahap amplitud getaran dengan julat frekuensi operasi 5 hingga 30 Hz, dan sesaran amplitud mekanikal puncak-ke-puncak berkadar hingga maksimum 2.5 mm. Skala tetapan ini digerakkan bermula daripada keadaan tanpa getaran (aras rujukan) sehingga tahap 5 bagi memberikan variasi sesaran fizikal yang mewakili rangsangan seakan-seismik sederhana. Setiap tahap getaran dikekalkan dalam julat frekuensi operasi yang sama (seperti yang ditetapkan oleh konfigurasi MicroMix 5) bagi meminimumkan kesan frekuensi sebagai pemboleh ubah perancu.



RAJAH 1. Rajah blok reka bentuk eksperimen



RAJAH 2. Sambungan AQ2200-136 Tunable Laser Source dan AQ2200-331 Optical Attenuator Module

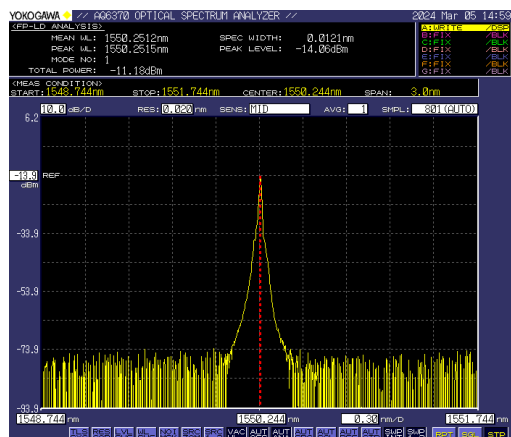


RAJAH 3. Gulungan gentian optik sepanjang 400-meter pada MicroMix 5 Shaker

PROTOKOL PENGUJIAN GETARAN DAN PENGUMPULAN DATA

Prosedur pengukuran dioptimumkan bagi memastikan data yang diperoleh konsisten dan bebas daripada gangguan luar. Sebelum sesi pengukuran bermula, sistem dibiarkan mencapai keadaan stabil dari segi suhu dan penjajaran optik. Bagi setiap tahap getaran, termasuk keadaan tanpa getaran, sistem dikendalikan bagi tempoh pra-penstabilan yang sesuai sebelum data direkodkan. Spektrum optik pada hujung keluar gentian direkodkan menggunakan OSA yang dikawal melalui AQ2201 Frame Controller, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.

Untuk setiap tahap amplitud getaran, enam siri pengukuran diambil, menjadikan jumlah keseluruhan $N=30$ titik data pemerhatian bagi memastikan kebolehpercayaan statistik. Daripada spektrum yang diperoleh, empat parameter utama diekstrak, iaitu Kuasa Puncak Maksimum (Max Peak Power), Panjang Gelombang Puncak (Peak Wavelength), Panjang Gelombang Purata (Mean Wavelength) dan Kuasa Keseluruhan (Total Power). Parameter ini dipilih kerana ia mewakili ciri utama penghantaran optik yang berpotensi dipengaruhi oleh mikrolengkungan dan mikro-bengkokan gentian akibat getaran mekanikal. Data yang direkodkan kemudiannya disusun dalam format jadual untuk tujuan analisis statistik.



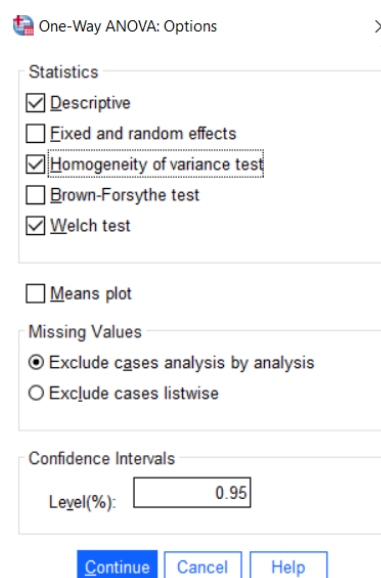
RAJAH 4. Contoh bacaan data yang dikumpulkan

ANALISIS STATISTIK

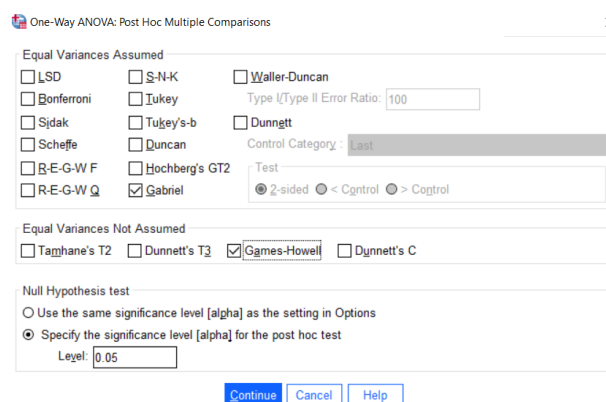
Analisis statistik dalam kajian ini dilaksanakan menggunakan perisian IBM SPSS (versi 23.0) dengan tumpuan kepada ujian homogeniti varians, analisis varians sehala (one-way ANOVA) dan ujian perbandingan berganda (post hoc). Ujian homogeniti varians digunakan untuk menilai sama ada varians antara kumpulan (tahap getaran) adalah seragam bagi setiap parameter yang dianalisis, selaras dengan andaian asas ANOVA. Konsep

asas ANOVA yang digunakan untuk tujuan ini dirumuskan dalam Rajah 5.

Seterusnya, analisis varians sehala (one-way ANOVA) digunakan untuk menguji sama ada terdapat perbezaan yang signifikan secara statistik antara lima tahap getaran bagi Kuasa Puncak Maksimum, Panjang Gelombang Puncak, Panjang Gelombang Purata dan Kuasa Keseluruhan. Nilai F dan p yang diperoleh digunakan untuk menentukan signifikan statistik bagi setiap parameter. Apabila keputusan ANOVA menunjukkan perbezaan yang signifikan, ujian post hoc dijalankan untuk mengenal pasti pasangan tahap getaran yang menyumbang kepada perbezaan tersebut. Rajah 6 menggambarkan aliran kerja analisis perbandingan ini. Pendekatan ini membolehkan hubungan antara intensiti getaran dan perubahan ciri penghantaran optik gentian optik mod tunggal dianalisis secara sistematik dan kuantitatif.



RAJAH 5. Pilihan one-way ANOVA

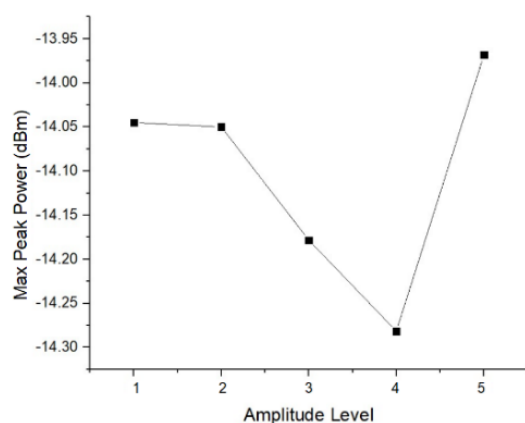


RAJAH 6. Analisis perbandingan ujian post hoc

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

ANALISIS KUASA PUNCAK MAKSIMUM

Perbezaan peratusan antara nilai minimum dan maksimum adalah sekitar 1.49%, menunjukkan bahawa julat perubahan kuasa adalah sempit walaupun amplitud getaran dinaikkan seperti digambarkan dalam Rajah 7. Penurunan kuasa pada tahap 3 dan 4 berkemungkinan didorong oleh peningkatan kehilangan mikrolengkungan apabila tenaga mekanikal melepasi tahap redaman salutan, manakala lonjakan mendadak pada tahap 5 berpotensi disumbangkan oleh resonans mekanikal yang menghasilkan gangguan membina pada isyarat pantulan. Secara keseluruhannya, kestabilan ini boleh dikaitkan dengan pengurangan mod optik yang teguh di dalam teras gentian. Gentian optik mod tunggal direka dengan perbezaan indeks biasan antara teras dan pelitup yang memastikan isyarat kekal terpandu melalui Pantulan Dalam Penuh walaupun terdapat gangguan luaran (Shao et al. 2018). Variasi kecil yang diperhatikan berkemungkinan disebabkan oleh gandingan ragam lemah akibat getaran, di mana sebahagian kecil tenaga cahaya terbias keluar dari ragam asasi ke ragam pelapisan, namun magnitudnya tidak mencukupi untuk menyebabkan kehilangan lenturan makro yang ketara. Dapatan ini selari dengan Ghazali et al. (2024), yang melaporkan keteguhan gentian dalam aplikasi kejuruteraan awam.

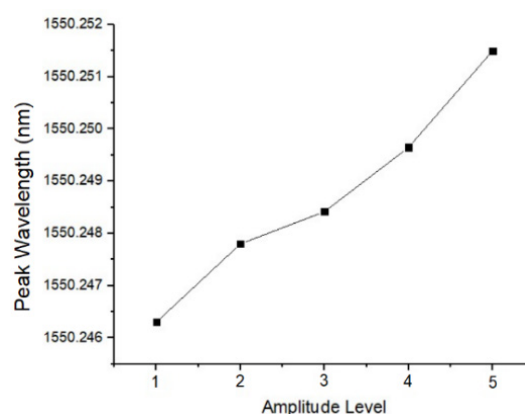


RAJAH 7. Kuasa Puncak Maksimum

ANALISIS PANJANG GELOMBANG PUNCAK

Bagi Panjang Gelombang Puncak, nilai min didapati hampir malar merentasi semua tahap getaran dengan perbezaan peratusan yang sangat kecil, iaitu sekitar 0.0003% yang ditunjukkan dalam Rajah 8. Kestabilan ini menunjukkan bahawa struktur silika gentian mempunyai kekakuan yang tinggi terhadap beban getaran yang

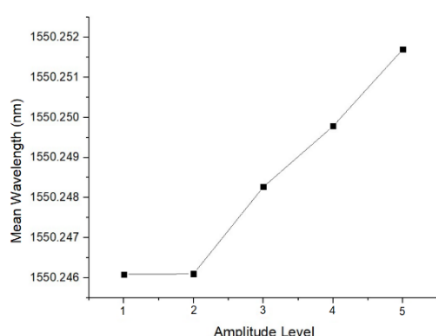
dikenakan. Anjakan panjang gelombang puncak lazimnya berlaku akibat perubahan besar pada pemalar kekisi bahan atau perubahan suhu yang drastik. Memandangkan eksperimen dijalankan pada suhu terkawal, ketiadaan anjakan ini membuktikan bahawa getaran mekanikal tersebut tidak menghasilkan terikan paksi yang cukup besar untuk mengubah ciri fizikal teras gentian semasa operasi masa nyata. Ini mengesahkan bahawa gentian optik mod tunggal mempunyai margin operasi yang selamat untuk sistem DWDM, di mana kestabilan panjang gelombang di bawah tekanan tegasan dinamik adalah sangat penting.



RAJAH 8. Panjang Gelombang Puncak

ANALISIS PANJANG GELOMBANG PURATA

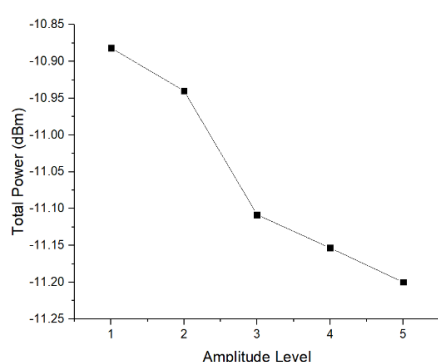
Analisis Panjang Gelombang Purata menunjukkan fenomena dua fasa yang menarik seperti yang digambarkan dalam Rajah 9. Pada Tahap Amplitud 1 dan 2, nilai min dilihat mendatar dan tidak berubah. Keadaan ini boleh dijelaskan melalui teori redaman mekanikal. Lapisan salutan polimer pada gentian optik bertindak sebagai penyerap tenaga kinetik yang berkesan pada intensiti getaran rendah. Tenaga getaran pada tahap ini diserap sepenuhnya oleh lapisan polimer ini, menghalang tekanan fizikal daripada dipindahkan ke bahagian teras dan pelitup dan mengekalkan kestabilan indeks biasan (Shan et al. 2017). Walau bagaimanapun, bermula pada Tahap Amplitud 3 hingga 5, berlaku peningkatan trend yang jelas. Fenomena ini menandakan bahawa tenaga getaran telah melepasi ambang redaman salutan, menyebabkan teras gentian mula mengalami terikan mikro. Analisis ini mengaktifkan kesan elasto-optik, di mana perubahan ketumpatan bahan mengakibatkan perubahan pada indeks biasan berkesan (n_{eff}) gentian. Berdasarkan hubungan Bragg ($\lambda \propto n_{eff}$), peningkatan tekanan mekanikal yang meninggikan indeks biasan akan menyumbang kepada anjakan spektrum ke arah panjang gelombang yang lebih tinggi (Mikulchik et al. 2023).



RAJAH 9. Panjang Gelombang Purata

ANALISIS KUASA KESELURUHAN

Kuasa Keseluruhan menunjukkan variasi yang sedikit lebih besar berbanding parameter lain, dengan penurunan sekitar 2.85% apabila amplitud meningkat seperti ditunjukkan dalam Rajah 10. Penurunan kuasa ini konsisten dengan teori kehilangan mikrolengkungan (Wang et al. 1995). Apabila gentian digetarkan, paksi gentian mengalami gangguan geometri berskala mikroskopik. Gangguan ini menyebabkan perubahan pada sudut tuju cahaya pada sempadan teras-pelutup. Apabila sudut tuju ini melebihi sudut kritikal gentian, syarat pandu gelombang terganggu, menyebabkan sebahagian tenaga daripada mod teras terganding ke mod sinaran yang hilang ke dalam pelutup (Taffoni et al. 2013). Walaupun wujud kehilangan ini, magnitudnya masih dalam julat sederhana, menunjukkan bahawa gentian masih mampu mengekalkan integriti isyarat bagi tujuan komunikasi, di mana kehilangan kuasa sebegini lazimnya boleh diimbangi oleh link budget sistem telekomunikasi (Kabi et al. 2023).



RAJAH 10. Kuasa Keseluruhan

KEPUTUSAN ANOVA DAN IMPLIKASI STATISTIK

Analisis statistik melalui ANOVA menunjukkan bahawa bagi keempat-empat parameter iaitu Kuasa Puncak

Maksimum, Panjang Gelombang Puncak, Panjang Gelombang Purata dan Kuasa Keseluruhan seperti yang dibentangkan dalam Rajah 11, terdapat perbezaan yang signifikan secara statistik antara tahap getaran yang berbeza. Nilai F yang tinggi dan nilai p yang kecil menggambarkan sensitiviti sistem terhadap perubahan keadaan getaran. Walau bagaimanapun, apabila keputusan ini ditafsir bersama magnitud variasi yang kecil, jelas bahawa perbezaan yang signifikan secara statistik tidak semestinya membawa kepada kesan praktikal yang besar terhadap fungsi penghantaran optik.

Hal ini menunjukkan bahawa gentian optik mod tunggal cukup sensitif untuk merekodkan perubahan keadaan mekanikal melalui variasi kecil dalam parameter optik, tetapi pada masa yang sama kekal teguh dari sudut fungsi penghantaran dalam julat getaran yang diuji (Zhu et al. 2024; Ghazali et al. 2024). Dari perspektif pemantauan seismik, ciri ini adalah sangat diingini, gentian berupaya bertindak sebagai penderia yang merespons getaran, sambil mengekalkan kebolehpercayaan sebagai medium komunikasi. Dalam konteks Malaysia yang mempunyai rangkaian gentian telekomunikasi yang semakin meluas, pendekatan dwi-guna ini membuka peluang untuk membina rangkaian pemantauan seismik berskala besar dengan kos tambahan infrastruktur (Zhan et al. 2021; Noh et al. 2021). Bagi menangani cabaran persekitaran dunia sebenar yang tidak menentu dan dinamik ini, integrasi algoritma Pembelajaran Pengukuhan dilihat berpotensi untuk mengoptimumkan proses pembuatan keputusan dalam pengasingan isyarat seismik yang kompleks (Tan et al. 2025).

Parameter	Source of Variation	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
PeakPower	Between Groups	0.371	4	0.093	9.174	< 0.001
	Within Groups	0.253	25	0.01		
	Total	0.624	29			
PeakWavelength	Between Groups	0	4	0	18.064	< 0.001
	Within Groups	0	25	0		
	Total	0	29			
MeanWavelength	Between Groups	0	4	0	70.04	< 0.001
	Within Groups	0	25	0		
	Total	0	29			
TotalPower	Between Groups	0.461	4	0.115	25.063	< 0.001
	Within Groups	0.115	25	0.005		
	Total	0.576	29			

RAJAH 11. Keputusan ANOVA

KESIMPULAN

Kajian ini telah menunjukkan bahawa gentian optik mod tunggal mampu mengekalkan prestasi penghantaran optiknya dengan sangat stabil apabila tertakluk kepada getaran simulasi yang menyerupai keadaan seismik sederhana. Empat parameter utama yang dikaji, iaitu Kuasa Puncak Maksimum, Panjang Gelombang Puncak, Panjang Gelombang Purata dan Kuasa Keseluruhan, masing-masing menunjukkan variasi yang kecil, dengan perbezaan

peratusan sekitar 1.49% bagi Kuasa Puncak Maksimum, 0.0003% bagi Panjang Gelombang Puncak dan 2.85% bagi Kuasa Keseluruhan. Dapatan ini menunjukkan bahawa getaran mekanikal dalam julat yang diuji tidak menjejaskan secara signifikan integriti penghantaran isyarat dalam gentian optik mod tunggal.

Analisis statistik menggunakan ANOVA mengesahkan bahawa terdapat perbezaan yang signifikan secara statistik antara tahap getaran bagi setiap parameter, namun magnitud perubahan kekal kecil. Hal ini menggambarkan bahawa gentian optik mod tunggal mempunyai kepekaan yang mencukupi untuk mengesan perubahan keadaan mekanikal, sambil mengekalkan fungsi penghantaran yang teguh. Ciri ini amat penting bagi aplikasi dwi-guna, di mana gentian optik berfungsi serentak sebagai saluran komunikasi dan sebagai unsur penderiaan bagi pemantauan seismik.

Dalam konteks Malaysia yang berhadapan dengan peningkatan pendedahan seismik di beberapa kawasan, pendekatan dwi-guna yang memanfaatkan rangkaian gentian sedia ada untuk komunikasi dan penderiaan seismik menawarkan penyelesaian yang kos efektif dan berskala besar. Dapatan kajian ini memberikan asas empirikal bahawa penggunaan rangkaian telekomunikasi gentian optik sebagai tulang belakang kepada sistem pemantauan seismik berasaskan gentian adalah berdaya maju dari sudut kestabilan penghantaran isyarat.

Pendekatan ini diharapkan dapat menyumbang kepada pembinaan rangkaian pemantauan seismik generasi baharu yang bersepadu dengan infrastruktur komunikasi moden serta menyokong usaha mitigasi risiko bencana secara lebih menyeluruh di Malaysia dan rantau sekitarnya. Pada masa hadapan, kajian lanjutan boleh dijalankan dengan meluaskan julat amplitud dan frekuensi getaran, menggunakan konfigurasi gentian yang berbeza serta menguji sistem dalam persekitaran lapangan sebenar bagi mengesahkan kebolehgunaan praktikal pendekatan ini.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia (MoHE) melalui Geran Penyelidikan Fundamental Research Grant Scheme (FRGS) FRGS/1/2021/TK0/UKM/02/17 dan Dana Pecutan Penerbitan 2026. Para penulis juga ingin merakamkan penghargaan kepada Makmal Teknologi Fotonik, Pusat Kejuruteraan Elektronik Dan Komunikasi Terkehadapan (PAKET), Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia kerana menyediakan kemudahan untuk menjalankan penyelidikan ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Benazir, Syamsidik, Idris, Y. & Putra, N.P. 2023. Connecting community's perspectives on tsunami risk to anticipated future tsunamis: A reflection from a progress of tsunami preparedness from a coastal community in Aceh-Indonesia after 19 years of the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Geoenvironmental Disasters* 10(1): 21. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00252-7>
- Freddi, F., Galasso, C., Cremen, G., Dall'Asta, A., Di Sarno, L., Giaralis, A., Gutiérrez-Urzuá, F., Málaga-Chuquitaype, C., Mitoulis, S.A., Petrone, C., Sextos, A., Sousa, L., Tarbali, K., Tubaldi, E., Wardman, J. & Woo, G. 2021. Innovations in earthquake risk reduction for resilience: Recent advances and challenges. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 60: 102267. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102267>
- Ghazali, M.F., Mohamad, H., Nasir, M.Y.M., Hamzh, A., Abdullah, M.A., Abd Aziz, N.F., Thansirichaisree, P. & Zan, M.S.D. 2024. State-of-the-art application and challenges of optical fibre distributed acoustic sensing in civil engineering. *Optical Fiber Technology* 87: 103911. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103911>
- Jabidin, H.Z., Ibrahim, S.A., Zan, M.S.D., Musa, S.M.A., Mansoor, A., Ngo, H.Y., Abdul Aziz, N.A., Choo, K.Y., Bakar, A.A.A., Mokhtar, M.R., Tee, C. & Abdul-Rashid, H.A. 2024. Review on digital signal processing (DSP) algorithm for distributed acoustic sensing (DAS) for ground disturbance detection. *International Journal of Integrated Engineering* 16(2): 102–113. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.011>
- Kabi, J.N., wa Maina, C., Mharakurwa, E.T. & Mathenge, S.W. 2023. Low cost, LoRa based river water level data acquisition system. *HardwareX* 14: e00414. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00414>
- Liu, Z., Zhang, S., Yang, C., Chung, W.H. & Li, Z. 2022. Submarine optical fiber sensing system for the real-time monitoring of depth, vibration, and temperature. *Frontiers in Marine Science* 9: 922669. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.922669>
- Loi, D.W., Raghunandan, M.E. & Swamy, V. 2018. Revisiting seismic hazard assessment for Peninsular Malaysia using deterministic and probabilistic approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(9): 2387–2408. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2387-2018>

- Marto, A., Tan, C.S., Kasim, F. & Mohd Yunus, N.Z. 2013. Seismic impact in Peninsular Malaysia. Dlm. *The 5th International Geotechnical Symposium, Incheon*, hlm. 237–242. <https://doi.org/10.13140/2.1.3094.9129>
- Mikulchyyk, T., Murphy, K., Walsh, J., Martin, S., Cody, D. & Naydenova, I. 2023. Improving the angular visibility of photopolymer-based reflection holograms for sensing applications. *Sensors* 23(9): 4275. <https://doi.org/10.3390/s23094275>
- Noh, M.R.M., Rambat, S., Abd Halim, I.S.B. & Ahmad, F. 2021. Seismic risk assessment in Malaysia: A review. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* 25(1): 69–79. <https://doi.org/10.37934/araset.25.1.6979>
- Sauti, N.S., Daud, M.E., Kaamin, M. & Sahat, S. 2022. Earthquake risk assessment of Sabah, Malaysia based on geospatial approach. *International Journal of Integrated Engineering* 14(5): 38–48. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.004>
- Ser, J.P., Lee, C.C., Shahrim, F., Bakar, A.A.A. & Mokhtar, M.H.H. 2019. Detection of back-scattered signal for optical fibre resonant scanner. *Jurnal Kejuruteraan* 31(1): 169–175. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31\(1\)-21](https://doi.org/10.17576/jkukm-2019-31(1)-21)
- Shan, D., Zhang, C., Kalaba, S., Mehta, N., Kim, G.B., Liu, Z. & Yang, J. 2017. Flexible biodegradable citrate-based polymeric step-index optical fiber. *Biomaterials* 143: 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.08.003>
- Shao, L., Liu, Z., Hu, J., Gunawardena, D. & Tam, H.Y. 2018. Optofluidics in microstructured optical fibers. *Micromachines* 9(4): 145. <https://doi.org/10.3390/mi9040145>
- Shaw, R., Takeuchi, Y. & Rouhban, B. 2009. Education, capacity building and public awareness for disaster reduction. Dlm. Sassa, K. & Canuti, P. (pnvt.). *Landslides – Disaster Risk Reduction*, hlm. 499–515. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_26
- Taffoni, F., Formica, D., Saccomandi, P., Di Pino, G. & Schena, E. 2013. Optical fiber-based MR-compatible sensors for medical applications: An overview. *Sensors* 13(10): 14105–14120. <https://doi.org/10.3390/s131014105>
- Taha, B.A., Addie, A.J., Haider, A.J., Osman, S.A., Ramli, M.Z. & Arsad, N. 2025. A review of seismic detection using fiber optic distributed acoustic sensing: From telecommunication cables to earthquake sensors. *Natural Hazards* 121: 13927–13959. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07370-5>
- Tan, J.L., Taha, B.A., Aziz, N.A., Mokhtar, M.H.H., Mukhlisin, M. & Arsad, N. 2025. A review of reinforcement learning evolution: Taxonomy, challenges and emerging solutions. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 16(1): 490–502. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160149>
- Tongkul, F. 2021. An overview of earthquake science in Malaysia. *ASM Science Journal* 14: 1–12. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2020.440>
- Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb, L.G., Nigbor, R.L., Shinohara, M., Shiobara, H. & Suyehiro, K. 2012. Site selection, preparation and installation of seismic stations. Dlm. Bormann, P. (pnvt.). *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, hlm. 1–139. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch7
- Wang, A., Wang, G.Z., Murphy, K.A. & Claus, R.O. 1995. Fiber-optic temperature sensors based on differential spectral transmittance/reflectivity and multiplexed sensing systems. *Applied Optics* 34(13): 2295–2300. <https://doi.org/10.1364/AO.34.002295>
- Wang, Y., Yuan, H., Liu, X., Bai, Q., Zhang, H., Gao, Y. & Jin, B. 2019. A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing. *IEEE Access* 7: 85821–85837. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924736>
- Xin, H.T., Zhou, Y., Taha, B.A., Bachok, N.N., Sapiee, N.M., Supian, L.S. & Arsad, N. 2025. Advancing environmental sensing with tapered optical fibers: Structures, challenges, and applications. *Journal of Physics Communications* 9(3): 032001. <https://doi.org/10.1088/2399-6528/adbed6>
- Yu, J., Xu, P., Yu, Z., Wen, K., Yang, J., Wang, Y. & Qin, Y. 2023. Principles and applications of seismic monitoring based on submarine optical cable. *Sensors* 23(12): 5600. <https://doi.org/10.3390/s23125600>
- Zhan, Z., Cantono, M., Kamalov, V., Mecozzi, A., Müller, R., Yin, S. & Castellanos, J.C. 2021. Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables. *Science* 371(6532): 931–936. <https://doi.org/10.1126/science.abe6648>
- Zhu, R., Rao, X., Dai, S., Chen, M., Liu, G., Liu, H., Xu, R., Chen, S., Chen, G.Y. & Wang, Y. 2024. Deep integration of fiber-optic communication and sensing systems using forward-transmission distributed vibration sensing and on-off keying. *Sensors* 24(17): 5758. <https://doi.org/10.3390/s24175758>