

Pencirian Optik dalam Cecair Indeks Bias Menggunakan Penderia Gentian Optik Tirus: Pendekatan Gabungan Simulasi dan Eksperimen (Optical Properties in Refractive Index Liquids Using a Tapered Optical Fiber Sensor: A Combined Simulation and Experimental Approach)

Nur Nadia Bachok^a, Norhafizah Burham^b, Ahmad Razi Othman^c, Nurul Huda Abdul Karim^d, Ahmad Ashrif A. Bakar^a, Mohd Hadri Hafiz Mokhtar^a & Norhana Arsad^{a*}

^aMakmal Teknologi Fotonik, Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektrik dan Sistem,
 Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia

^bIntegrated Microelectronic System and Applications (IMSaA), Pengajian Kejuruteraan Elektrik,
 Kolej Pengajian Kejuruteraan, Universiti Teknologi MARA

^cJabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses,
 Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia

^dJabatan Sains Kimia, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia

*Corresponding author: noa@ukm.edu.my

Received 12 June 2024, Received in revised form 1 February 2025
 Accepted 2 March 2025, Available online 30 September 2025

ABSTRACT

The advantages of optical fibers that are immune to electromagnetic waves, high sensitivity, resistance to temperature and pressure, and resistant to corrosions, broaden the reach of this field, especially after the pandemic era. One of the sensor designs that can be explored is the tapered optical fiber sensor because of its advantages of being more sensitive, easy to develop, wider applications and having a larger contact surface between the optical fiber and the surrounding conditions. In this study, research on tapered fiber optic sensors through simulation and experiment was done to detect five refractive index readings using different refractive index liquids. The main objective of this study is to analyze the absorption readings of refractive index liquids through simulation and experiment. The simulation of the tapered fiber optic sensor was executed using COMSOL MULTIPHYSICS 6.0 software. An experimental study was made using a Deuterium Tungsten Halogen light source and a FLAME spectrometer. A total of five refractive indices were used namely 1.46, 1.50, 1.54, 1.58 and 1.62. While a total of 6 wavelengths has been selected, namely 365 nm, 406 nm, 473 nm, 532 nm, 589 nm and 632 nm. The results of the sensitivity and limit of detection analysis of tapered optical fiber sensors through simulation and experiment methods exhibited similar pattern. Despite a minor difference in the sensitivity value data, the simulation results can still predict the optical properties of the refractive index liquid because the data difference is too small, which is only between 0.69% to 5.91%.

Keywords: Taper optical fiber; refractive index; spectrometer; sensitivity; COMSOL 6.0

ABSTRAK

Kelebihan yang dimiliki dari sifat gentian optik yang kalis gangguan terhadap gelombang elektromagnet, tinggi kepekaan, tahan lasak terhadap suhu dan tekanan, dan tidak mudah berkarat menjadikan bidang kajian ini semakin meluas terutama selepas era pandemik. Salah satu rekebentuk penderia yang boleh diterokai adalah penderia gentian optik tirus kerana kelebihanannya yang lebih peka, mudah dibangunkan, aplikasi lebih meluas serta

mempunyai permukaan sentuhan yang lebih besar diantara gentian optik dan keadaan sekeliling. Dalam kajian ini, penyelidikan ke atas penderia gentian optik tirus secara simulasi dan eksperimen dilakukan bagi mengesan lima bacaan indeks pembiasan menggunakan cecair indeks pembiasan yang berbeza. Objektif utama kajian ini ialah menganalisis bacaan penyerapan bagi cecair indeks pembiasan secara simulasi dan eksperimen. Simulasi penderia gentian optik tirus dijalankan dengan menggunakan perisian COMSOL MULTIPHYSICS 6.0. Kajian secara eksperimen dibuat dengan menggunakan sumber cahaya Deuterium Tungsten Halogen dan spektrometer FLAME. Sebanyak lima indeks pembiasan telah digunakan iaitu 1.46, 1.50, 1.54, 1.58 dan 1.62. Manakala sebanyak 6 panjang gelombang telah dipilih iaitu 365 nm, 406 nm, 473 nm, 532 nm, 589 nm dan 632 nm. Hasil analisis kepekaan penderia gentian optik tirus melalui kaedah simulasi dan eksperimen telah menunjukkan trend yang sama. Walaupun terdapat sedikit perbezaan data nilai kepekaan, namun hasil simulasi masih boleh meramalkan keadaan sifat optik indeks pembiasan kerana perbezaan data adalah terlalu kecil iaitu hanyalah di antara 0.69% hingga ke 5.7%.

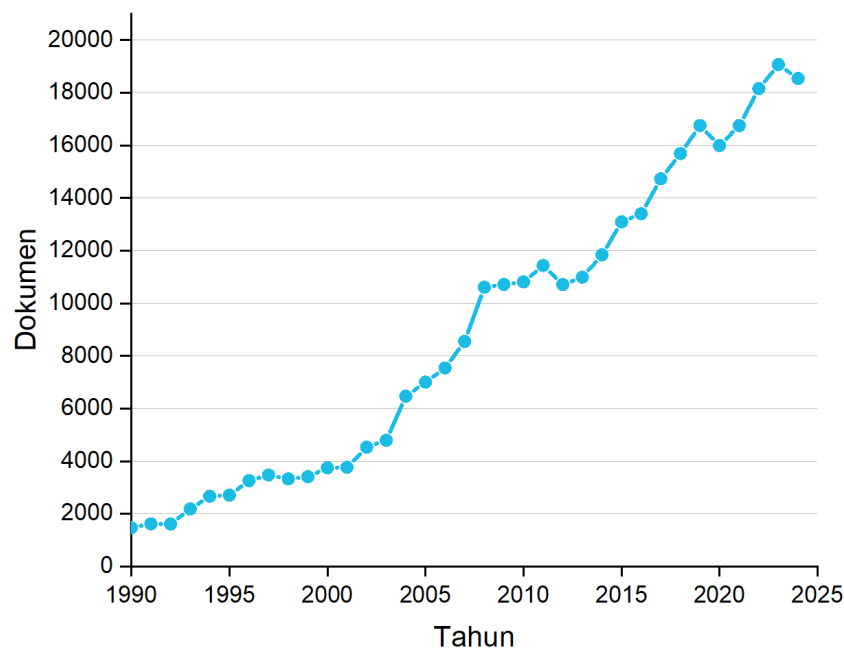
Kata Kunci: Gentian optik tirus; indeks pembiasan; spektrometer; kepekaan, COMSOL 6.0

PENGENALAN

PENDERIA GENTIAN OPTIK TIRUS

Kajian penggunaan gentian optik sebagai penderia menunjukkan peningkatan bermula dari tahun 1960 (Rajan & Iniewski 2017). Melalui carian pada *Scopus* menggunakan kata kunci *optic** dan *sensor*, dari tahun 1990 hingga 2023, didapati trend adalah meningkat. Rajah 1 menunjukkan graf jumlah bilangan dokumen penerbitan yang direkodkan melalui carian tersebut. Peningkatan dari tahun 2011 dan ke atas adalah ketara berbanding tahun sebelumnya. Tiga tahun terakhir iaitu dari 2020 hingga 2023 menunjukkan jumlah penerbitan yang tertinggi berbanding tahun-tahun

sebelum itu. Salah satu faktor yang menyumbang kepada peningkatan ini adalah pandemik. Hampir kesemua aktiviti di seluruh dunia lumpuh kesan dari penyebaran wabak Covid-19 (Taha et al. 2020). Penerokaan terhadap kemampuan gentian optik sebagai penderia diteruskan bagi meningkatkan tahap kepekaan. Selain aplikasi sebagai penderia bio, penderia gentian optik juga digunakan sebagai pengesan cahaya, suhu, gegaran, kelembapan, di dalam pelbagai industri seperti industri pengangkutan, kesihatan, ternakan, pemakanan, pembinaan dan pelbagai lagi (Raji et al. 2016; Weiland et al. 2020). Kelebihan gentian optik sebagai penderia adalah kerana ia tidak terganggu dengan gelombang elektromagnet, tinggi kepekaan, tahan lasak terhadap suhu dan tekanan, dan tidak mudah berkarat berbanding bahan lain sebagai penderia.



RAJAH 1. Trend jumlah penerbitan mengikut tahun terhadap carian pada kata kunci *optic** dan *sensor* melalui *Scopus*

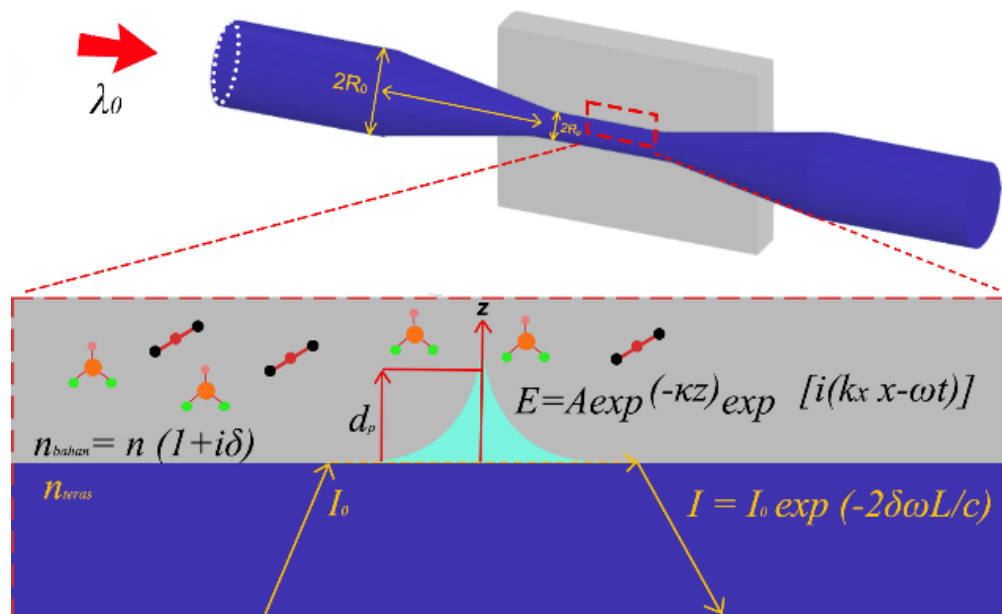
Melalui proses modifikasi terhadap struktur reka bentuk gentian optik, proses ini dapat membantu meningkatkan perincian kecekapan gentian optik tersebut sebagai penderia (Bhardwaj, Kishor & Sharma 2020). Antara reka bentuk berasaskan penderia gentian optik yang telah dimodifikasi seperti parutan Fiber Bragg, Fabry-Ferot interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Michelson interferometer, Sagnac interferometer, penderia bentuk U, penderia bentuk D, penderia bentuk kacang, penderia dumbel, penderia gentian optik tirus dan pelbagai lagi (Muhammad Abdullah 2024; Wei et al. 2023).

Kajian pertama yang melaporkan berkenaan potensi penderia gentian optik tirus adalah pada tahun 2003 (Wang et al. 2018). Melihat potensi yang ada penderia ini, banyak kajian telah melaporkan kelebihan yang dimiliki oleh

penderia gentian optik tirus seperti lebih peka, mudah dibangunkan, aplikasi yang lebih meluas serta mempunyai permukaan sentuhan yang lebih besar di antara gentian optik dan keadaan sekeliling (Garcia Mina et al. 2017; Hidayat et al. 2023; Korposh et al. 2019).

TEORI DAN PRINSIP PENGESANAN

Gentian optik tirus mempunyai tiga bahagian utama iaitu bahagian pinggang di tengah dan diapit di bahagian kiri dan kanan oleh bahagian tirus ke bawah dan tirus ke atas (Qiang et al. 2014). Rajah 2 menunjukkan fenomena gelombang evanescent yang berlaku pada kawasan penderia gentian optik tirus.



RAJAH 2. Gelombang evanescent pada penderia gentian optik tirus.

Gelombang evanescent berlaku apabila penyerapan resonan pada panjang gelombang tertentu yang menyerap antara kumpulan organik dan gelombang elektromagnetik. Keadaan ini membolehkan proses pengesanan molekul dan kekekatannya berlaku. Cahaya merambat secara pantulan dalaman dalam gentian optik ke bahagian tirus ke bawah, bahagian pinggang, bahagian tirus ke atas dan akhir sekali ke luar dari gentian optik. Persamaan gelombang evanescent diwakili oleh persamaan (2):

$$E = A e^{(-\kappa z)} e^{[i(k_x x - \omega t)]} \quad (2)$$

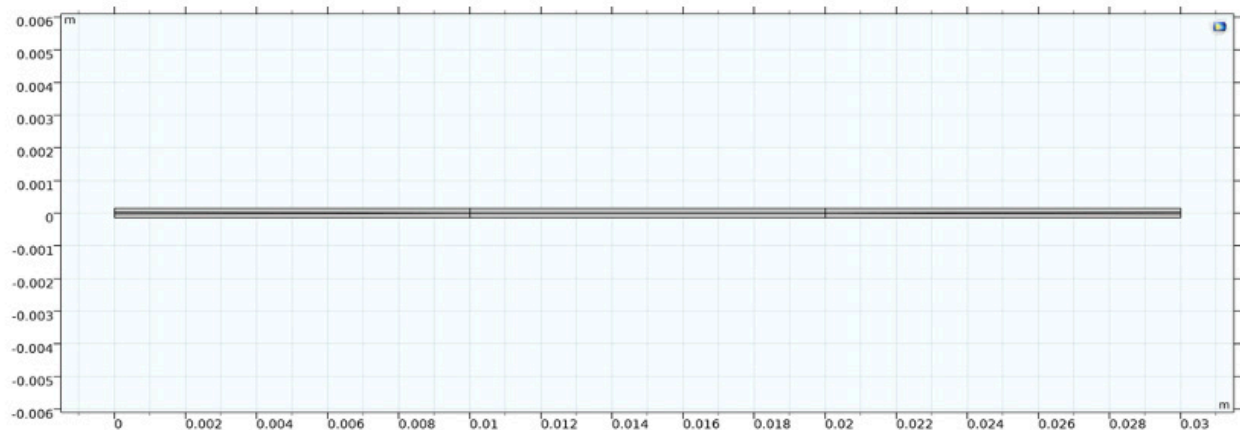
di mana, $e^{(-\kappa z)}$ adalah amplitud dan $e^{[i(k_x x - \omega t)]}$ adalah fasa. Apabila gelombang evanescent merosot kepada 1/e daripada nilai maksimumnya, kedudukan ini dipanggil

sebagai kedalaman penembusan, $z = 1/\kappa$. Bahagian khayalan indeks bagi indeks pembiasaan adalah untuk mencirikan keupayaan penyerapan cahaya medium luaran. Hasil analisis spektrum digunakan untuk mengenalpasti molekul dan kekekatannya termasuk keamatan molekul (Zhao et al. 2022).

METODOLOGI KAJIAN

SIMULASI COMSOL

Kajian ini melibatkan simulasi dengan menggunakan perisian COMSOL. Satu reka bentuk penderia gentian optik tirus dibangunkan secara dua dimensi (2D) seperti di dalam Rajah 3.



RAJAH 3. Reka bentuk gentian optik tirus 2D

Dua nilai indeks pembiasan perlu dimasukkan di dalam kajian ini iaitu teras dan cecair indeks pembiasan dan masing-masing diwakili oleh pembolehubah indeks_pembiasan_teras dan indeks_pembiasan_cecair. Nilai

indeks pembiasan yang digunakan secara eksperimen digunakan di dalam simulasi ini. Jadual 1 berikut adalah parameter yang digunakan bagi reka bentuk gentian optik tirus.

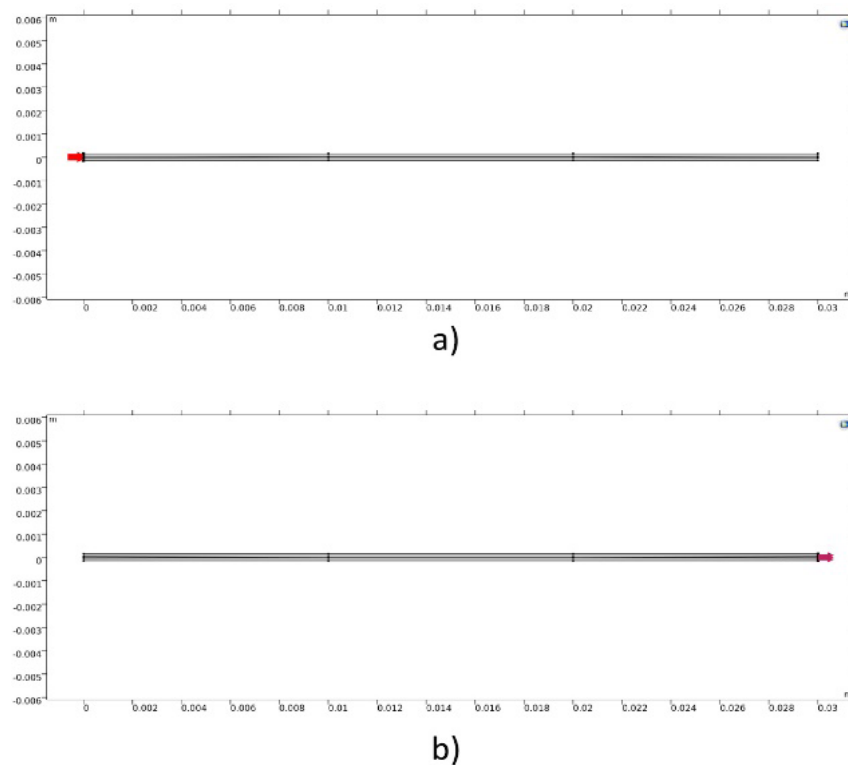
JADUAL 1. Parameter reka bentuk penderia gentian optik tirus

	Pembolehubah	Nilai	Perincian
1	lam0	365 nm, 406 nm, 473 nm, 532 nm, 589 nm dan 632 nm	Panjang gelombang
2	f0	Pekali halaju/lam0	Frekuensi
3	n_gentian	Nisbah panjang gentian terhadap panjang gelombang	Panjang gentian dalam panjang gelombang vakum
4	panjang_gentian	0.064 m	Panjang gentian
5	diameter_teras_besar	6.25E-5 m	Diameter teras besar
6	diameter_cecair_keliling_1	3E-4 m	Diameter cecair keliling teras 1
7	diameter_teras_kecil	10um	Diameter teras kecil
8	diameter_cecair_keliling_2	3E-4 m	Diameter cecair keliling teras 2
9	indeks_pembiasan_cecair	1.46 – 1.62	Indeks pembiasan cecair
10	indeks_pembiasan_teras	1.55	Indeks pembiasan teras

ANTARA MUKA ELECTROMAGNETIC WAVES BEAM ENVELOPES (EWBE)

Antara muka *Electromagnetic Waves Beam Envelopes* (EWBE) digunakan untuk mengukur medan agihan elektrik

dan magnet di mana amplitud medan berubah secara perlahan pada skala panjang gelombang. Dalam simulasi ini, *Port 1* dan *Port 2* masing-masing ditetapkan pada bahagian masukan dan keluaran pandu gelombang. Kuasa mengalir dari *Port 1* ke *Port 2* seperti pada Rajah 4 (a) dan (b).



RAJAH 4. Arah aliran kuasa (a) masuk ke dalam pandu gelombang dan (b) keluar dari pandu gelombang

TAKRIFAN

Seterusnya, pembolehubah vektor fasa (kx) dan gelombang yang hilang (ϕ) ditakrifkan di dalam Jadual 2. Ungkapan

berikut menjadikan pembolehubah fasa (ϕ) berterusan di mana-mana sepanjang pandu gelombang

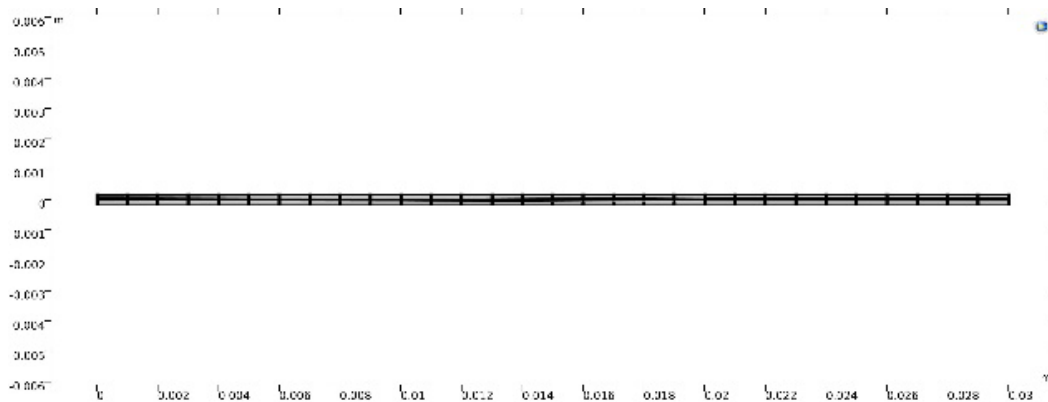
JADUAL 2. Takrifan pembolehubah vektor fasa dan gelombang yang hilang

	kx	ϕ
PML Masukan	$ewbe.b\beta_1$	$kx \cdot pml1.x$
Pandu gelombang masukan	$ewbe.b\beta_1$	$kx \cdot x$
Pandu gelombang tirus	$ewbe.b\beta_1 + (ewbe.b\beta_2 - ewbe.b\beta_1) \cdot x / d_taper$	$(kx + ewbe.b\beta_1) \cdot x / 2$
Pandu gelombang keluaran	$ewbe.b\beta_2$	$kx \cdot (x - d_taper) + (ewbe.b\beta_1 + ewbe.b\beta_2) \cdot d_taper / 2$
PML keluaran	$ewbe.b\beta_2$	$kx \cdot (pml1.x - d_taper - lam0) + (ewbe.b\beta_1 + ewbe.b\beta_2) \cdot d_taper / 2 + kx \cdot lam0$

MESHING

Elemen *Edge* dan *Mapped* digunakan semasa *meshing* dalam simulasi ini. Garisan paling kiri yang terdapat pada reka bentuk gentian optik tirus dipilih sebagai garisan

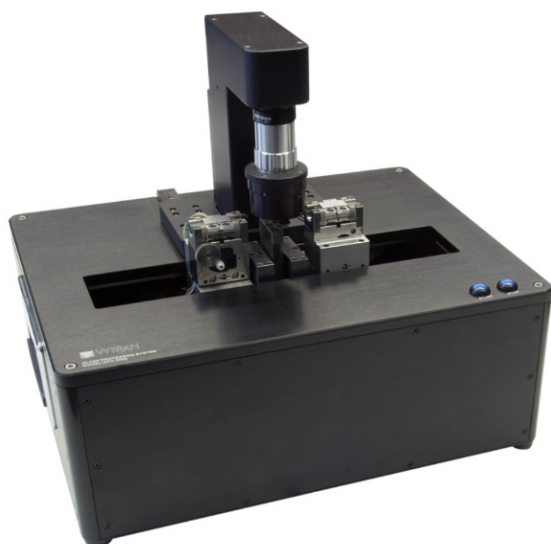
yang membahagi kawasan untuk *edge meshing*. Manakala garisan paling atas dipilih untuk pembahagian *mapped meshing*. Rajah 5 menunjukkan proses *meshing* bagi bagi reka bentuk gentian tirus di dalam perisian COMSOL.



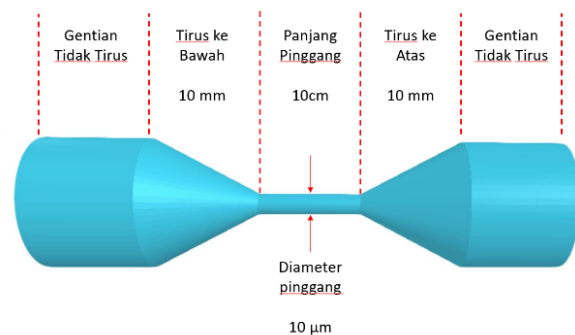
RAJAH 5. Hasil *meshing* bagi reka bentuk gentian optik tirus

FABRIKASI PENDERIA GENTIAN OPTIK TIRUS

Penderia gentian optik tirus difabrikasi dengan menggunakan mesin Vytran GPX-3400 di Universiti Putra Malaysia (UPM) sebagaimana pada Rajah 6. Penggunaan mesin penirus ini memberi banyak kelebihan berbanding proses penirusan menggunakan punaran kimia iaitu hasil yang lebih seragam, bentuk penirusan yang tajam, boleh dihasilkan berulang kali dan mudah untuk ubah spesifikasi (Ahsani et al. 2019; Yadav et al. 2014). Bahagian lapisan luar teras dibuang dengan menggunakan pelucut gentian optik. Tujuannya adalah untuk membenarkan proses penirusan berlaku pada bahagian teras. Filamen pemanas bergerak secara seragam di bahagian pinggang sambil kedua-dua hujung gentian ditarik serentak. Gentian mod pelbagai bersaiz 125 μm ditiruskan kepada saiz 10 mm di kedua-dua bahagian tirus ke bawah dan tirus ke atas. Sementara diameter bahagian pinggang ditetapkan kepada 10 μm sepanjang 10 mm. Rujuk Rajah 7.



RAJAH 6. Mesin Vytran GPX-3400



RAJAH 7. Dimensi gentian optik tirus

EKSPERIMEN

Sumber cahaya yang digunakan di dalam eksperimen ini adalah model DT-MINI-2-GS Deuterium Tungsten Halogen UV-VIS-NIR dari *Ocean Optics*. DT-MINI-2-GS menggabungkan spektrum berterusan RF dari sumber cahaya UV deuterium teruja dan sumber cahaya VIS-NIR halogen tungsten dalam satu laluan optik. Sumber spektrum gabungan menghasilkan output spektrum yang stabil dari ~200-2000 nm dalam pakej padat. Manakala spektrometer yang digunakan adalah model Flame Miniature Spectrometer dari jenama yang sama yang mempunyai julat panjang gelombang pengesanan antara 190-1100 nm.

Penyambungan bagi eksperimen ini ditunjukkan seperti pada Rajah 8. DT-MINI-2-GS disambungkan kepada gentian optik tirus yang bertindak sebagai penderia. Gentian optik tirus dipasang ke dalam pemegang bagi memastikan cecair yang dititiskan dapat menyeliputi bahagian penderia. Hujung bahagian satu lagi gentian optik tirus disambung kepada spektrometer.

Perisian SpectraSuite pada komputer disambungkan dengan spektrometer. Perisian ini digunakan bagi mengawal spektrometer, merekod dan menganalisis data

spektrum dalam bentuk keamatan cahaya dan penyerapan pada setiap panjang gelombang yang terlibat (Sulaiman et al. 2024). Selepas memastikan semua penyambungan berada pada keadaan sempurna, sumber cahaya deuterium tungsten halogen dihidupkan selama 10 minit untuk memastikan keamatan cahaya menjadi stabil (Salleh et al. 2023).

Bahagian pengesan pada penerima gentian optik tirus dicuci dengan air ternyah ion sebanyak dua kali dan dibiarkan kering terlebih dahulu bagi memastikan permukaan penerima bebas bendasing. Mikropipet 20-200 μ L digunakan untuk menitisikan cecair indeks pembiasan. Sebanyak 125 μ L disedut dari botol cecair indeks pembiasan dan dititiskan ke atas kawasan penerima. Bacaan data penyerapan direkodkan melalui perisian SpectraSuite bagi tujuan analisis. Kajian ini dijalankan untuk mengesan tahap penyerapan oleh 5 jenis cecair indeks pembiasan yang berbeza dari jenama *Cargille*. 5 tahap indeks pembiasan yang terlibat iaitu 1.46, 1.50, 1.54, 1.58, dan 1.62. Langkah ini diulang untuk kelima-lima kepekatan dan diambil bacaan pada suhu bilik.



RAJAH 8. Susun atur eksperimen

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEPUTUSAN COMSOL

Nilai medan elektrik dan nilai penghantaran melalui simulasi COMSOL bagi cecair indeks pembiasan 1.46 pada panjang gelombang 583nm ditunjukkan di dalam Rajah 9 dan 10. Bahagian kiri pada Rajah 9 adalah bahagian di mana sumber cahaya masuk dan bahagian kanan adalah sumber cahaya keluar. Bahagian tengah yang berwarna merah menunjukkan kawasan itu mempunyai medan elektrik paling tinggi. Medan evanescent berlaku lebih jauh ke dalam pada kawasan ini kerana diameter teras yang dikecilkan menyebabkan keamatan medan menjadi lebih tinggi pada titik-titik tertentu. Gandingan mod di antara mod teras dan mod medium mudah berlaku pada kawasan tirus. Gangguan antara mod menghasilkan gangguan

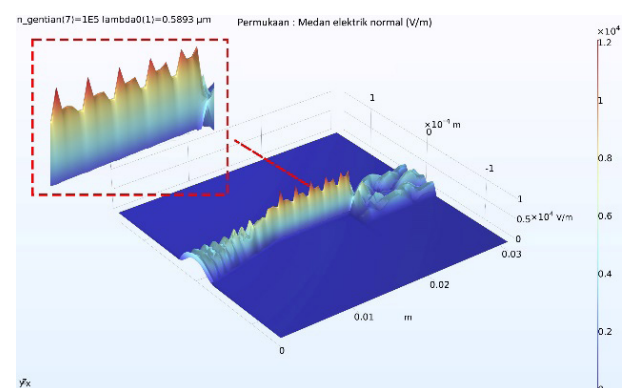
membina pada kawasan tempatan yang membentuk medan keamatan elektrik yang tinggi. Berbanding

Nilai penghantaran pada Rajah 10 menunjukkan peningkatan pesat pada panjang gelombang yang lebih pendek iaitu dari 10^0 hingga 10^{-1} , diikuti pada 10^0 hingga 10^1 dan 10^1 hingga 10^2 . Selepas panjang ini, nilai penghantaran telah menjadi tepu dan seragam. Ini menunjukkan, penirusan gentian optik di bahagian masukan meningkatkan jumlah penghantaran. Selepas panjang tertentu, peningkatan penghantaran tidak berlaku kerana gandingan optimum dan kurungan telah dicapai pada panjang yang lebih pendek. Hasil simulasi bagi kelima-lima cecair indeks pembiasan bagi panjang gelombang 589 nm dipaparkan di dalam Jadual 3. Nilai penghantaran yang terhasil adalah di antara 0.3293 ke 0.33, manakala nilai penyerapan adalah di antara 0.48149 ke 0.49089. Semakin tinggi indeks pembiasan cecair yang diuji, semakin rendah jumlah nilai penyerapan. Hubungan di antara nilai penghantaran dan nilai penyerapan diwakili oleh persamaan (3)

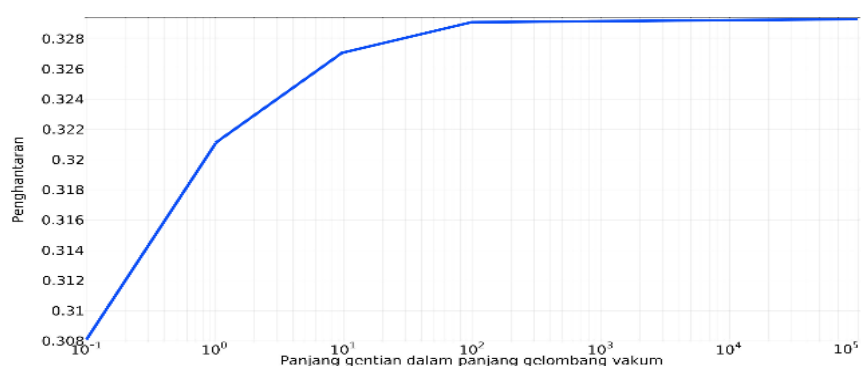
$$A = \log_{10}(T) \quad (3)$$

di mana A adalah penyerapan dan T adalah penghantaran (Liu et al. 2007).

Cecair indeks pembiasan 1.62 mempunyai nilai penghantaran tertinggi dan nilai penyerapan terendah. Sementara cecair indeks 1.46 mempunyai nilai penghantaran terendah dan nilai penyerapan tertinggi. Terdapat kajian yang terdahulu juga menunjukkan perkaitan hubungan yang sama di antara nilai penyerapan dan nilai penghantaran (Li et al. 2018). Melalui persamaan (3) menunjukkan nilai penghantaran dan nilai penyerapan adalah songsang.



RAJAH 9. Simulasi gelombang medan elektromagnet penerima gentian optik tirus bagi mengesan cecair indeks pembiasan 1.46 pada panjang gelombang 589 nm.



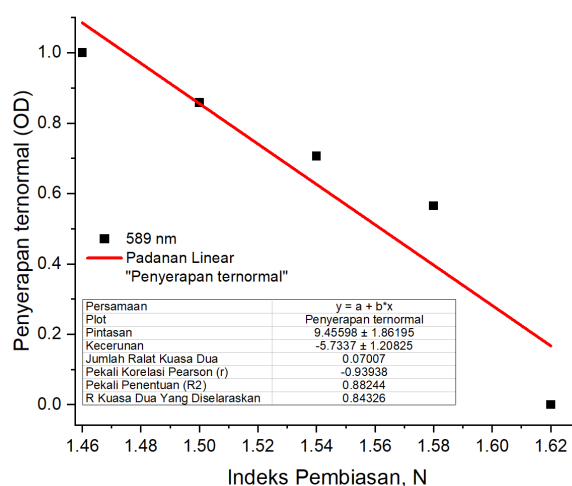
RAJAH 10. Nilai penghantaran berbanding panjang gentian dalam panjang gelombang vakum

JADUAL 3. Jadual nilai penghantaran dan nilai penyerapan bagi lima nilai indeks pembiasan.

Bil	Indeks Pembiasan	Nilai Penghantaran	Nilai Penyerapan
1	1.46	0.3293	0.49089
2	1.50	0.3294	0.48228
3	1.54	0.3295	0.48214
4	1.58	0.3296	0.48201
5	1.62	0.33	0.48149

Rajah 11 menunjukkan terdapat hubungan linear negatif antara indeks pembiasan dan penyerapan melalui simulasi bagi panjang gelombang 589 nm. Garis regresi berwarna merah mempunyai persamaan $y = 9.45598 - 5.7337x$. Nilai R^2 bagi persamaan ini adalah 0.88244, yang bermaksud hampir 88.24% daripada garis regresi ini menerangkan hubungan antara nilai penyerapan dan nilai

indeks pembiasan. Nilai pekali korelasi Pearson juga tinggi, iaitu -0.93938, menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara indeks pembiasan dan penyerapan. Nilai kepekaan bagi penerima optik tirus terhadap cecair indeks pembiasan yang direkodkan adalah 5.7337 OD/unit indeks pembiasan. Tidak terdapat sebarang data terpencil yang perlu dikecualikan dari data-data yang dipersembahkan.



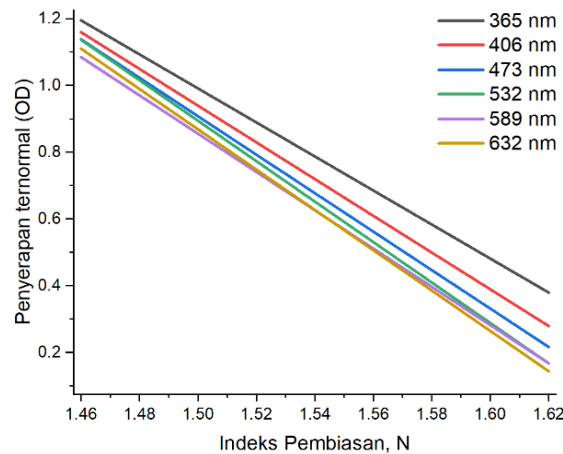
RAJAH 11. Graf plot sebaran dan padanan linear bagi simulasi pada panjang gelombang 589 nm.

Simulasi turut dibuat ke atas beberapa panjang gelombang lain iaitu pada panjang gelombang 365 nm, 406 nm, 473 nm, 532 nm, 632 nm dan 656 nm dan diplotkan pada Rajah 12. Setiap panjang gelombang menunjukkan penurunan linear yang berbeza dalam penyerapan dengan

peningkatan indeks biasan. Garis linear ini menunjukkan kepekaan sensor terhadap perubahan dalam indeks biasan. Semua panjang gelombang menunjukkan hubungan linear secara tekak yang menggambarkan keadaan prestasi penerima yang boleh dipercayai dan diramal. Ciri ini adalah

penting bagi aplikasi yang memerlukan pengukuran indeks biasan yang tepat. Hubungan linear bagi setiap gelombang ini diperlukan bagi membandingkan kepekaan bagi setiap panjang gelombang. Kepekaan diwakili oleh nilai kecerunan dari keluk penentuan (Porto et al. 2019). Pada indeks pembiasan yang lebih rendah, nilai penyerapan

menunjukkan bacaan lebih tinggi Panjang gelombang 365 nm menunjukkan kecerunan yang lebih tinggi iaitu kepekaan yang lebih tinggi. Perbincangan lanjut perbandingan kepekaan penerima optik bagi setiap panjang gelombang dibincangkan dalam Rajah 16.

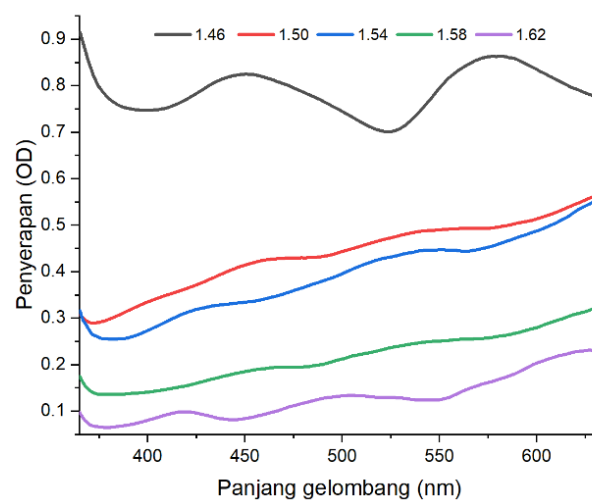


RAJAH 12. Graf padanan linear bagi simulasi pada enam panjang gelombang berbeza.

KEPUTUSAN EKSPERIMEN

Rajah 13 menunjukkan spektrum penyerapan bagi setiap cecair indeks pembiasan secara eksperimen yang diukur dari panjang gelombang 365 nm hingga ke panjang gelombang 635 nm. Ketidak sepadanan nilai indeks pembiasan di antara penerima optik dan cecair yang digunakan telah menyebabkan perambatan cahaya mengalami perubahan lalu menghasilkan penyerapan. Spektrum penyerapan bagi cecair indeks pembiasan 1.46 menunjukkan trend yang berbeza berbanding cecair indeks pembiasan yang lain. Selain dari mempunyai nilai

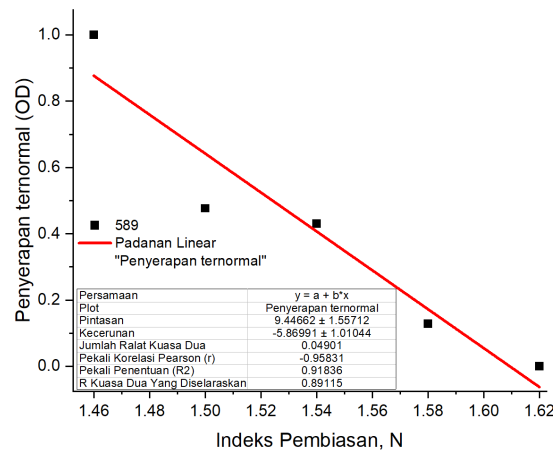
penyerapan yang lebih tinggi, cecair indeks pembiasan ini juga mempunyai nilai puncak pada panjang gelombang 450 nm dan 582 nm dan palung pada panjang gelombang 358 nm dan 524 nm yang ketara. Keadaan ini menunjukkan berlaku interaksi yang lebih kuat di antara cahaya dan medium pada indeks pembiasan ini berbanding indeks pembiasan lain (Tapfuma et al. 2024). Keadaan resonan telah berlaku yang menyebabkan interaksi di antara keduanya dan menyebabkan nilai puncak yang ketara (Heidarzadeh 2020). Nilai penyerapan menurun bagi setiap peningkatan nilai indeks pembiasan kerana interaksi di antara cahaya dan cecair indeks pembiasan semakin berkurangan.



RAJAH 13. Nilai penyerapan bagi lima cecair indeks pembiasan yang berbeza dari panjang gelombang 365 nm - 635 nm.

Rajah 14 menunjukkan hubungan linear secara negatif di antara indeks pembiasan dan penyerapan bagi eksperimen, di mana garis regresi merah membentuk persamaan $y = 9.44662 - 5.86991x$. Nilai R^2 bagi persamaan ini adalah lebih tinggi berbanding simulasi iaitu 0.91836. Ini menunjukkan 91.8% dari variasi dalam penyerapan

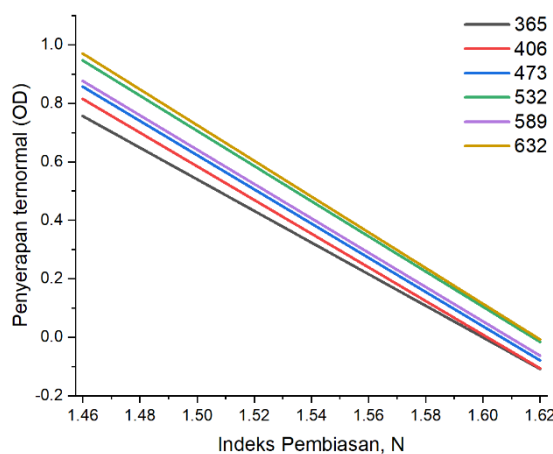
boleh dijelaskan oleh nilai indeks pembiasan. Nilai pekali korelasi Pearson juga lebih tinggi iaitu -0.95831. Nilai kepekaan bagi penderia optik tirus terhadap cecair indeks pembiasan yang dicatatkan adalah 5.86991 OD/unit indeks pembiasan.



RAJAH 14. Graf plot sebaran dan padanan linear bagi eksperimen pada panjang gelombang 589 nm.

Rajah 15 pula adalah graf padanan linear bagi eksperimen pada enam panjang gelombang berbeza. Seperti hasil simulasi pada Rajah 12, keenam-enam panjang gelombang menunjukkan hubungan linear secara negatif, namun mempunyai kepekaan yang berbeza. Hubungan ini menyerlahkan kepekaan penderia, menunjukkan tindak balas linear yang boleh diramal

kepada perubahan dalam indeks biasan. Penemuan ini adalah penting dalam konteks penderia optik, di mana pengesanan perubahan kecil dalam indeks biasan sering diperlukan untuk aplikasi seperti pengesanan bio atau analit. Perbincangan lanjut berkaitan prestasi kepekaan bagi setiap gelombang dibincang pada Rajah 16.



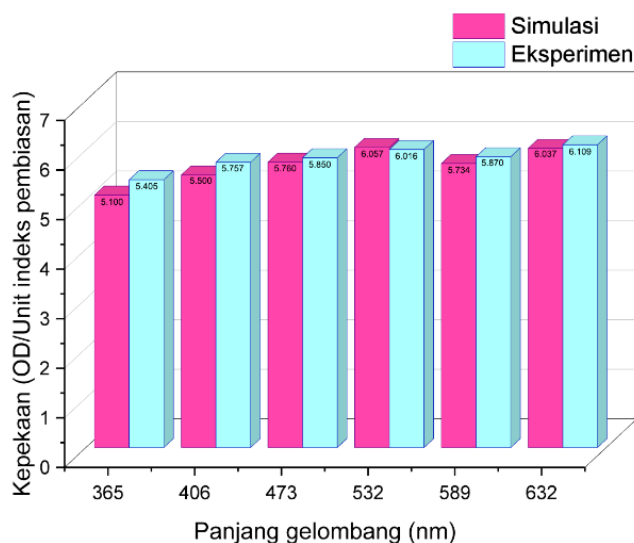
RAJAH 15. Graf padanan linear bagi eksperimen pada enam panjang gelombang berbeza.

Data nilai kepekaan bagi setiap panjang gelombang dibandingkan di antara hasil simulasi dan eksperimen dan diterjemahkan melalui carta palang pada Rajah 16. Didapati trend bagi hasil simulasi dan eksperimen adalah sama. Ini menunjukkan model simulasi boleh dipercayai dan

mewakili keadaan eksperimen dengan tepat. Peratus ralat terbesar adalah pada panjang gelombang 365 nm iaitu sebanyak 5.7% dan terendah pada panjang gelombang 532 nm iaitu sebanyak 0.69%. Manakala nilai ralat di antara hasil simulasi dan ralat eksperimen bagi panjang

gelombang 406 nm, 473 nm, 589 nm, dan 632 nm masing-masing ialah 4.46%, 1.54%, 2.31% dan 1.18%. Kepekaan semakin meningkat di antara panjang gelombang 365 nm hingga 532 nm, kemudian menurun sedikit pada panjang gelombang 589 nm dan kembali meningkat pada panjang gelombang 632 nm. Hasil simulasi menunjukkan nilai kepekaan tertinggi adalah pada panjang gelombang 532 nm iaitu 6.057 OD/ unit indeks pembiasan. Manakala hasil

eksperimen pula menunjukkan, nilai tertinggi berada pada panjang gelombang 632 nm iaitu 6.109 OD/ unit indeks pembiasan. Kedua-dua hasil ini menunjukkan pada panjang gelombang di kawasan yang lebih tinggi menghasilkan kepekaan yang lebih baik. Prestasi ini mungkin kerana panjang gelombang pada kawasan ini mempunyai kadar penyerakan yang lebih rendah dan mempunyai interaksi yang lebih baik pada medan evanescent.



RAJAH 16. Carta palang nilai kepekaan hasil simulasi dan eksperimen pada enam panjang gelombang berbeza.

KESIMPULAN

Kajian ini telah berjaya membangunkan dua kaedah bagi melihat sifat optik penyerapan bagi cecair indeks pembiasan pada penderia gentian optik tirus secara eksperimen dan simulasi komputer. Lima bacaan indeks pembiasan telah digunakan di dalam kajian ini iaitu 1.46, 1.50, 1.54, 1.58 dan 1.62. Enam bacaan panjang gelombang telah dipilih untuk mendapatkan nilai penyerapan iaitu pada panjang gelombang 365 nm, 406 nm, 473 nm, 532 nm, 589 nm dan 632 nm. Kedua-dua hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan bahawa hubungan di antara indeks pembiasan dan penyerapan adalah linear negatif. Walaupun terdapat perbezaan nilai kepekaan di antara data simulasi dan data eksperimen, namun model simulasi ini masih boleh meramalkan keadaan sifat optik indeks pembiasan menggunakan penderia gentian optik tirus. Perbezaan data ini adalah kecil iaitu hanyalah di antara 0.69% hingga ke 5.7%. Perbezaan ini boleh dikaitkan dengan ketepatan instrumen, kualiti bahan, reka bentuk model dan sebagainya. Ruang ini boleh ditambahbaik untuk mengurangkan jurang perbezaan antara keduanya. Hasil kajian ini dapat dimanfaatkan untuk aplikasi penderiaan sensitiviti tinggi.

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia (MOHE), Malaysia, melalui Inisiatif Belanjawan 2025: AI Enhancement di bawah geran WARISAN-2025-023 dan Dana Pecutan Penerbitan FKAB, UKM.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Ahsani, V., Ahmed, F., Jun, M.B.G. & Bradley, C. 2019. Tapered fiber-optic mach-zehnder interferometer for ultra-high sensitivity measurement of refractive index. *Sensors (Switzerland)* 19(7).
- Bhardwaj, V., Kishor, K. & Sharma, A.C. 2020. Tapered optical fiber geometries and sensing applications based on Mach-Zehnder Interferometer: A review. *Optical Fiber Technology* 58(July): 102302.

- Garcia Mina, D., Haus, J.W., Chong, A., Khanolkar, A., Sarangan, A. & Hansen, K. 2017. Bi-tapered fiber sensor using visible to near infrared light. *Sensors and Actuators, A: Physical* 263: 285–290.
- Heidarzadeh, H. 2020. Highly Sensitive Plasmonic Sensor Based on Ring Shape Nanoparticles for the Detection of Ethanol and D-Glucose Concentration. *IEEE Transactions on Nanotechnology* 19: 397–404.
- Hidayat, N., Safwan Abd Aziz, M., Nur, H., Taufiq, A., Mufti, N., Rakhmata Mukti, R. & Bakhtiar, H. 2023. Sensitivity enhancement of gold nanospheres assisted CO₂ laser tapered optical fiber for refractive index sensor. *Optical Fiber Technology* 77(February): 103275.
- Korposh, S., James, S.W., Lee, S.W. & Tatam, R.P. 2019. Tapered Optical Fibre Sensors: Current Trends and Future Perspectives. *Sensors (Basel, Switzerland)* 19(10).
- Li, H., Honary, F., Wu, Z., Shang, Q. & Bai, L. 2018. Reflection, transmission, and absorption of vortex beams propagation in an inhomogeneous magnetized plasma slab. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66(8): 4194–4201.
- Liu, Y., Ying, Y., Ouyang, A. & Li, Y. 2007. Measurement of internal quality in chicken eggs using visible transmittance spectroscopy technology. *Food Control* 18(1): 18–22.
- Muhammad Abdullah, A.Z. 2024. Monitoring For Strain-Based Railway Structure Assessment Approach Using Optical Fibre Sensor. *Jurnal Kejuruteraan* 36(2): 793–799.
- Porto, I.S.A., Santos Neto, J.H., dos Santos, L.O., Gomes, A.A. & Ferreira, S.L.C. 2019. Determination of ascorbic acid in natural fruit juices using digital image colorimetry. *Microchemical Journal* 149(May).
- Qiang, Z., Junyang, L., Yanling, Y., Libo, G. & Chenyang, X. 2014. Micro double tapered optical fiber sensors based on the evanescent field-effect and surface modification. *Optik* 125(17): 4614–4617.
- Rajan, G. & Iniewski, K.K. 2017. Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications. *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*: 1–559.
- Raji, Y.M., Lin, H.S., Ibrahim, S.A., Mokhtar, M.R. & Yusoff, Z. 2016. Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature. *Optics and Laser Technology* 86: 8–13.
- Salleh, W.S., Muhamat, W.F., Nurulain, S., Salim, M.R. & Manap, H. 2023. A spectroscopy study of heated palm cooking oil using an open path optical method for Free Fatty Acids concentration measurement. *Materials Today: Proceedings*.
- Sulaiman, R., Azeman, N.H., Mokhtar, M.H.H., Mobarak, N.N., Abu Bakar, M.H. & Bakar, A.A.A. 2024. Hybrid ensemble-based machine learning model for predicting phosphorus concentrations in hydroponic solution. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 304(August 2023).
- Taha, B.A., Mashhadany, Y. Al, Mokhtar, M.H.H., Zan, M.S.D. Bin & Arsad, N. 2020. An analysis review of detection coronavirus disease 2019 (Covid-19) based on biosensor application. MDPI AG.:
- Tapfuma, A., Akdogan, G., Luckay, R.C. & Tadie, M. 2024. Investigation of gold-amino acid interactions using Fourier Transform Infrared spectroscopy and correlation with gold dissolution ; Studies at different pH values. *Minerals Engineering* 209(September 2023): 108633.
- Wang, P., Zhao, H., Wang, X., Farrell, G. & Brambilla, G. 2018. A review of multimode interference in tapered optical fibers and related applications. *Sensors (Switzerland)* 18(3).
- Wei, Y., Wang, X., Jiang, T., Liu, C., Liu, C., Shi, C., Yang, M., Chen, L., Wang, R. & Liu, Z. 2023. High Sensitivity Interference Torsion Sensor Based on Dumbbell Fiber. *IEEE Sensors Journal* 23(20): 24552–24557.
- Weiland, J., Luber, M., Seewald, R., Schiebahn, A., Engelbrecht, R. & Reisinger, U. 2020. Structural health monitoring of adhesively bonded joints: Proposing a new method by use of polymer optical fibers. *Procedia Structural Integrity* 28(2019): 1249–1257.
- Yadav, T.K., Narayanaswamy, R., Abu Bakar, M.H., Kamil, Y.M. & Mahdi, M.A. 2014. Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and its application to protein sensing. *Optics Express* 22(19): 22802.
- Zhao, X., Yao, N., Zhang, X., Zhang, L., Tao, G., Li, Z., Liu, Q., Zhao, X. & Xu, Y. 2022. Optimizing Evanescent Efficiency of Chalcogenide Tapered Fiber. *Materials* 15(11): 1–11.