

Optimasi Material Inti Waveguide Optik Berbasis Expanded Polystyrene (EPS) dan Unsaturated Polyester Resin (UPR)

Nishfa Mufatihah*, Ian Yulianti*, Agus Yulianto, Mahardika Prasetya Aji

Prodi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Indonesia, 502291

*nishfa_mufatihah1@students.unnes.ac.id, ianyulianti@mail.unnes.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 August 2025

Revised 01 October 2025

Accepted 07 January 2026

Available online 15 January 2026



This is an open access article under the [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license. Copyright © 2025 by Author. Published by Physical Society Indonesia

ABSTRACT

Waveguides are widely used in optical systems due to their robust structure, lightweight nature, and ability to guide light in chip-based formats. As core materials for waveguides, Unsaturated Polyester Resin (UPR) and Polystyrene (PS) have been extensively studied. However, UPR tends to exhibit relatively high power loss, ranging from approximately 7.89 dB to 13.85 dB. On the other hand, waveguides made from Expanded Polystyrene (EPS) demonstrate lower power loss but require a longer fabrication time. Therefore, in this study, optimization of waveguide core materials was carried out by combining EPS and UPR to reduce both fabrication time and power loss. The waveguide was fabricated by carving the center of a polymethylmethacrylate (PMMA) substrate using a computer numerical control (CNC) milling machine, with a cross-sectional dimension of $1 \times 1 \text{ mm}^2$. The carved section of PMMA was then

filled with the core material. At both ends of the PMMA sheet, polymer optical fibers (POF) were attached as a medium to connect the waveguide to the light source and detector. An uncarved PMMA sheet was used as the top cladding. Six variations of EPS and UPR concentrations were used. Characterization was carried out by transmitting red LED light with a wavelength of 660 nm through the waveguide. The output voltage of the waveguide was measured using a photodiode detector connected to a multimeter. The results showed that the waveguide with the lowest power loss was the one with an EPS:UPR concentration of 70%:30%. Meanwhile, the fastest drying time was observed in the waveguide with a concentration ratio of 20%:80%.

Keywords: Waveguide; Expanded Polystyrene; Unsaturated Polyester Resin

ABSTRAK

Waveguide digunakan secara luas dalam sistem optik karena strukturnya yang kuat, ringan, dan mampu memandu cahaya dalam bentuk chip. Sebagai material inti waveguide, Unsaturated Polyester Resin (UPR) dan polystyrene (PS) telah banyak diteliti. Namun, UPR menghasilkan rugi daya yang relatif tinggi, yaitu sekitar 7,89 dB hingga 13,85 dB. Sementara itu, waveguide berbahan Expanded Polystyrene (EPS) memiliki rugi daya lebih rendah, namun proses fabrikasi yang lebih lama. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, telah dilakukan optimasi material inti waveguide dengan mengkombinasikan EPS dan UPR untuk menurunkan waktu fabrikasi dan rugi daya. Fabrikasi waveguide dilakukan dengan memahat polymethylmethacrylate (PMMA) sebagai substrat dibagian tengah menggunakan mesin pahat computer numerical control (CNC) dengan ukuran melintang $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Selanjutnya, bagian PMMA yang telah dipahat diisi dengan material inti. Pada kedua ujung lembar PMMA dipasang polymer optical fiber (POF) sebagai media untuk menghubungkan waveguide dengan sumber cahaya dan detektor. Sebagai selubung atas, digunakan PMMA yang tidak dipahat. Enam variasi konsentrasi EPS dan UPR telah digunakan. Karakterisasi dilakukan dengan cara melewatkan cahaya LED berwarna merah dengan panjang gelombang 660 nm ke dalam waveguide. Pengukuran tegangan keluaran pada waveguide dilakukan menggunakan detektor fotodiode yang disambungkan dengan multimeter. Ada campuran EPS dan UPR terjadi pergeseran serta penurunan intensitas puncak, dengan munculnya puncak baru di sekitar 1700 cm^{-1} (C=O) dan $1100\text{--}1300 \text{ cm}^{-1}$ (C-O), menandakan interaksi kimia antar material. Korelasi menunjukkan semakin tinggi konsentrasi UPR, waktu pengeringan semakin singkat ($r = 0,9767$) namun rugi daya meningkat ($r = 0,969$).

Kata Kunci: Waveguide; Expanded Polystyrene; Unsaturated Polyester Resin

1. PENDAHULUAN

Fiber optik merupakan media transmisi berbentuk silinder yang mulai dikembangkan sejak akhir 1960-an dan digunakan untuk mentransmisikan gelombang cahaya. Teknologi ini memiliki banyak keunggulan, seperti ukuran yang kecil, kecepatan tinggi, serta sensitivitas yang baik terhadap variasi lingkungan (Mathews, 2014). Seiring perkembangan teknologi fotonik, waveguide baik tipe planar maupun non-planar telah digunakan secara luas dalam sistem optik karena kemampuannya dalam membimbing cahaya secara efisien melalui jalur yang ditentukan. Struktur waveguide yang kokoh, ringan, dan kompatibel dengan desain chip menjadikannya solusi ideal untuk pengintegrasian sistem optik modern (Yulianti et al., 2018). Selain itu, waveguide berperan penting sebagai jalur kontrol cahaya dan banyak diaplikasikan dalam perangkat seperti laser semikonduktor, optical switch, hingga sensor optik (Du & Zhao, 2014; Ismanto & Alaydrus, 2013).

Sebagai sensor optik (SO), waveguide telah dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti pendeteksian indeks bias, temperatur, tekanan, regangan, vibrasi, kelembapan, hingga kadar glukosa (Jiang et al., 2011; Woyessa et al., 2016; Hassan et al., 2016). Waveguide umumnya terdiri dari dua bagian utama, yaitu inti (core) dan selubung (cladding). Berbagai material telah digunakan sebagai bahan waveguide, seperti polimer yang dikombinasikan dengan substrat silikon, kuningan, maupun material konjugat seperti MEH-PPV (Bahtiar & Kurniawati, n.d.; Mahmudin & Wijayanto, n.d.). PMMA (Polymethyl Methacrylate) merupakan salah satu bahan populer untuk selubung karena memiliki rugi daya optik yang rendah, harga yang relatif ekonomis, serta ketahanan terhadap kelembapan (Prajzler et al., 2014; Kumar et al., 2015).

Untuk material inti, Unsaturated Polyester Resin (UPR) dan polystyrene (PS) telah banyak diteliti karena memiliki indeks bias yang sesuai untuk guiding mode dalam waveguide. Namun, UPR diketahui menghasilkan rugi daya yang relatif tinggi, yakni antara 7,89 dB hingga 13,85 dB (Kurniansyah, 2019). Di sisi lain, polystyrene memiliki indeks bias sebesar 1,59 dan banyak digunakan dalam struktur planar waveguide (Sanjaya, 2012). Hasil penelitian Mufatihah (2022) menunjukkan bahwa penggunaan Expanded Polystyrene (EPS) sebagai inti waveguide dapat menurunkan rugi daya hingga 3,98 dB, namun dengan konsekuensi waktu pengeringan yang lebih lama.

Seiring dengan kebutuhan akan waveguide yang efisien dan mudah difabrikasi, pendekatan kombinasi material UPR dan EPS menjadi menarik untuk diteliti lebih lanjut. Potensi sinergi antara EPS yang memiliki karakter optik baik dan UPR yang menawarkan kekuatan mekanik lebih tinggi dapat menghasilkan material inti waveguide yang optimal. Penelitian ini berfokus pada pengembangan waveguide berbahan EPS dan UPR, dengan tujuan untuk mengurangi rugi daya sekaligus mempercepat waktu fabrikasi, yang pada akhirnya dapat mendukung pengembangan sistem optik terintegrasi berbasis polimer secara lebih luas.

2. METODE

Tahapan fabrikasi waveguide berbasis PMMA dengan inti material gabungan EPS dan Unsaturated Polyester Resin (UPR) terdiri dari dua bagian utama, yaitu pembuatan selubung (cladding) dan inti waveguide. Selubung dibuat menggunakan Polymethyl Methacrylate (PMMA) berukuran 4×2 cm dengan ketebalan 2 mm yang kemudian dipahat menggunakan mesin CNC sedalam 1 mm untuk membentuk rongga inti. Rongga ini berfungsi sebagai wadah bagi material inti yang nantinya akan diisi campuran EPS dan UPR. Untuk transmisi cahaya, ujung serat optik plastik (POF) sepanjang 17 cm dikupas pada bagian ujungnya untuk disambungkan ke system.

Pembuatan material inti dimulai dengan pemanasan EPS hingga mencair pada suhu 210°C. Setelah mengkristal, EPS dihaluskan menjadi bubuk dan dicampur dengan toluene dalam rasio 1 gram bubuk terhadap 3 ml pelarut. Larutan EPS kemudian dicampur dengan UPR sesuai variasi konsentrasi yang telah ditentukan. Campuran ini diisikan ke dalam rongga PMMA dan dibiarkan mengering di udara terbuka agar mengeras dan melekat sempurna pada selubung. Proses ini memungkinkan terbentuknya waveguide padat dengan integrasi POF yang baik untuk kebutuhan karakterisasi optik.

Karakterisasi dilakukan dengan menghubungkan ujung input POF ke sumber cahaya LED biru (660 nm), sementara ujung output disambungkan ke detektor intensitas. Tujuannya untuk mengukur rugi daya (loss) cahaya berdasarkan variasi konsentrasi material inti. Nilai rugi daya dihitung menggunakan rumus dengan intensitas input dan output diperoleh dari detektor dalam bentuk tegangan. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk grafik, yang kemudian dianalisis untuk menentukan komposisi inti waveguide dengan rugi daya terendah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sintesis Inti Material

Sintesis material inti dimulai dengan menyiapkan dua larutan utama. Larutan pertama dibuat dengan mencampurkan 100 mL Unsaturated Polyester Resin (UPR) dengan 3 mL katalis ke dalam wadah plastik sekali pakai. Larutan kedua diperoleh dengan melarutkan 1 Gram bubuk Expanded Polystyrene (EPS) ke dalam 3 mL

toluena hingga seluruh EPS larut sempurna. Proses ini dilakukan secara terpisah dalam gelas ukur untuk memastikan konsistensi larutan.

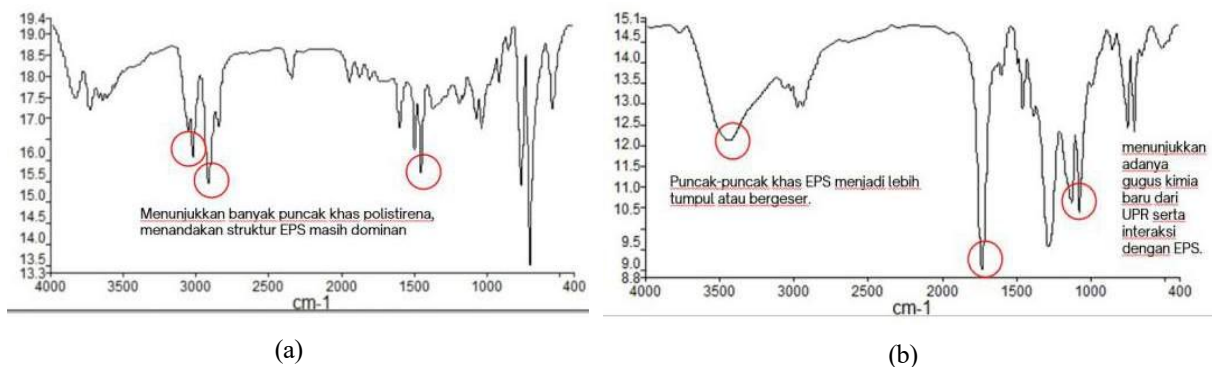
Selanjutnya, kedua larutan dicampurkan sesuai rasio komposisi yang telah ditentukan dalam penelitian. Campuran diaduk secara merata selama kurang lebih 3 menit hingga homogen menggunakan batang pengaduk. Alur pembuatan ditampilkan pada Gambar 1. Hasil akhir dari pencampuran ini merupakan bahan inti waveguide yang akan digunakan dalam proses fabrikasi selanjutnya. Proses pencampuran ini penting untuk memastikan distribusi material yang seragam, yang akan mempengaruhi performa optik waveguide.



Gambar 1. Pembuatan inti material

3.2. Karakterisasi Inti Material

Pengujian menggunakan spektroskopi FTIR (Fourier Transform Infrared) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia dan potensi interaksi antara material EPS dan UPR. Pada spektrum FTIR serbuk EPS murni (kiri), terlihat beberapa puncak serapan yang khas dari struktur polistirena, seperti puncak pada daerah sekitar $3000\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$ (gugus C-H aromatik) dan $1600\text{--}1450\text{ cm}^{-1}$ (getaran cincin aromatik), yang menandakan bahwa struktur EPS masih dominan.



Gambar 2. Hasil Pengujian FTIR Inti Material (a) Hasil Spektrum EPS, (b) Hasil Spektrum Campuran EPS dan UPR

Namun, pada spektrum campuran EPS dan UPR Gambar 2b, terjadi beberapa perubahan penting. Terlihat adanya pergeseran puncak dan penurunan intensitas pada beberapa pita serapan khas EPS, yang menunjukkan terjadinya gangguan atau interaksi struktur. Selain itu, muncul puncak baru pada sekitar 1700 cm^{-1} yang diasosiasikan dengan gugus karbonil (C=O), serta pita pada $1100\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan keberadaan gugus ester (C-O). Kedua fitur ini mengindikasikan adanya kontribusi kimia dari resin UPR dan kemungkinan terjadinya interaksi kimia antara UPR dan EPS, baik melalui pembentukan ikatan baru maupun pencampuran secara fisik yang menghasilkan perubahan struktur molekular.

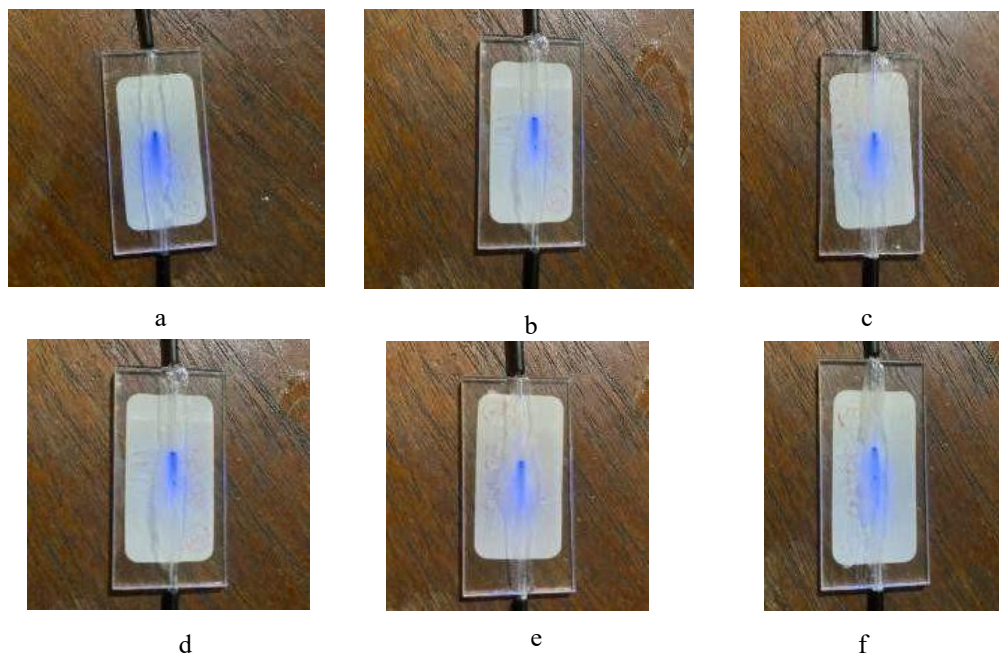
3.3. Fabrikasi Waveguide

Telah dilakukan fabrikasi waveguide dengan variasi konsentrasi EPS dan UPR yaitu Sampel A, Sampel B, Sampel C, Sampel D, Sampel E, Sampel F, dengan variasi konsentrasi seperti di tunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Konsentrasi Campuran EPS dan UPR

Variasi	EPS	UPR
1	20%	80%
2	30%	70%
3	40%	60%
4	50%	50%
5	60%	40%
6	70%	30%

Hasil permukaan sampel ditunjukkan pada Gambar 3 berikut. Permukaan waveguide yang telah difabrikasi menunjukkan morfologi yang halus, rata, dan bebas dari gelembung udara. Hal ini menandakan bahwa proses pencampuran material inti dan selubung berjalan homogen sehingga menghasilkan struktur optik dengan kualitas yang baik. Kehalusan permukaan sangat penting karena dapat mengurangi rugi daya akibat hamburan cahaya pada batas antar material. Tidak adanya gelembung juga memastikan tidak terjadi scattering tambahan yang dapat mengganggu propagasi cahaya di dalam waveguide.

**Gambar 3.** Struktur permukaan waveguide yang sudah di fabrikasi (a) Sampel A, (b) Sampel B, dan seterusnya hingga (f) Sampel F

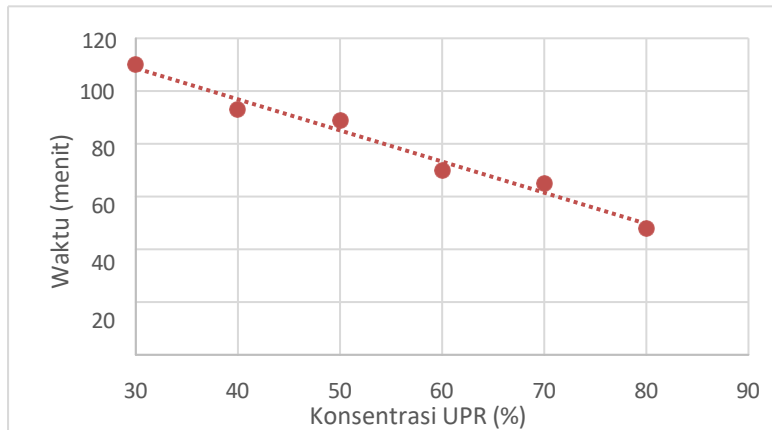
Pada proses fabrikasi waveguide perhitungan waktu pengeringan pada masing masing sampel. Berikut hasil waktu pengeringan pada masing-masing sampel ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu pengeringan sampel

Sampel	Waktu (Menit)
A	48
B	65
C	70
D	89
E	93
F	110

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa semakin besar konsentrasi UPR pada waveguide maka waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan akan semakin cepat. Hal ini dikarenakan UPR merupakan material yang mudah mengering. Jika dibandingkan dengan sampel yang lain, sampel A hanya membutuhkan waktu 48 menit hingga

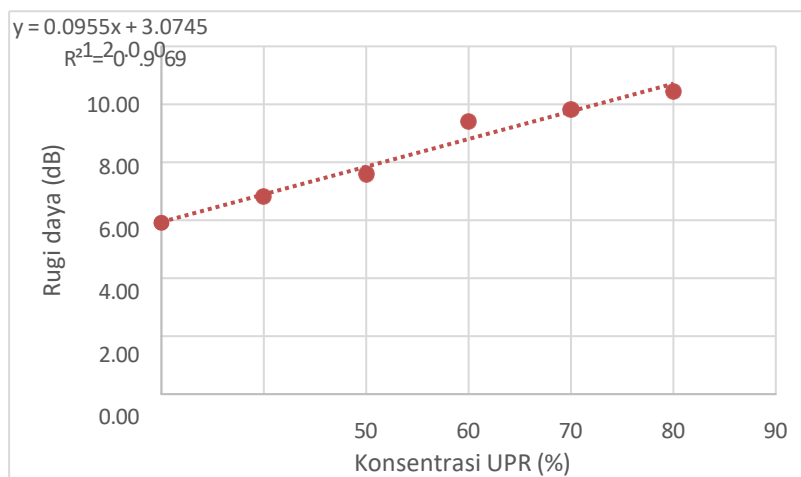
sampel mengering sempurna. Dan untuk sampel F membutuhkan waktu 110 menit agar sampel bisa kering dengan sempurna.



Gambar 4. Grafik waktu pengeringan tiap sampel

3.4. Karakterisasi Waveguide

Perhitungan tegangan masukan dan keluaran cahaya pada waveguide dilakukan menggunakan detektor photodiode yang sudah dikalibrasi komponennya dan dihubungkan pada multimeter digital. Perbandingan tegangan input dan keluaran cahaya pada waveguide digunakan untuk perhitungan rugi daya keluaran waveguide. Setelah dilakukan pengukuran tegangan input LED pada masukan waveguide adalah 4,795 volt. Hasil karakterisasi waveguide dengan variasi konsentrasi inti material ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik rugi daya tegangan waveguide

Dari karakterisasi terhadap enam sampel waveguide dengan variasi konsentrasi EPS dan UPR, diketahui bahwa peningkatan kandungan UPR dalam material inti menyebabkan kenaikan signifikan pada nilai rugi daya. Hal ini mengindikasikan bahwa UPR memiliki sifat serapan atau hamburan cahaya yang lebih besar dibanding EPS, sehingga tidak ideal digunakan dalam jumlah dominan untuk aplikasi waveguide yang efisien.

Sampel dengan konsentrasi UPR 30% (atau EPS 70%) menunjukkan nilai rugi daya terendah di antara seluruh sampel, menjadikannya kombinasi paling optimal dari segi efisiensi transmisi cahaya. Sebaliknya, pada konsentrasi UPR 80%, rugi daya mencapai titik tertinggi, memperkuat kesimpulan bahwa peningkatan UPR berdampak negatif terhadap performa optik waveguide. Dengan demikian, komposisi material inti harus dioptimalkan untuk menyeimbangkan waktu fabrikasi dan minimisasi rugi daya.

4. KESIMPULAN

Pada campuran EPS dan UPR terlihat pergeseran dan penurunan intensitas puncak, munculnya puncak baru di sekitar 1700 cm^{-1} (gugus karbonil C=O) dan $1100\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ (gugus ester C-O), yang menunjukkan adanya kontribusi kimia dari resin UPR dan kemungkinan interaksi antara kedua material. Nilai korelasi antara waktu pengeringan sampel terhadap konsentrasi UPR adalah 0,9767 dengan gradien -1.18 menit/%. Semakin tinggi

konsentrasi UPR, waktu pengeringan semakin singkat. Nilai korelasi antara rugi daya terhadap konsentrasi UPR adalah 0,969 dengan gradien 9.55×10^{-2} dB/%. Semakin tinggi konsentrasi UPR, rugi daya semakin besar.

REFERENCES

- Bahtiar, A., & Kurniawati, Y. (n.d.). Efek jenis pelarut pada sifat optiko-morfologi, loss dari pandu permukaan dan koefisien waveguide. *Jurnal Optoelektronika dan Aplikasinya*, 4(1), 2–6.
- Du, W., & Zhao, F. (2014). Surface plasmon resonance based silicon carbide optical waveguide sensor. *Materials Letters*, 115, 92–95. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.035>
- Hidayati, Y., & Rohedi, A. (2013). Sensor temperatur menggunakan pandu gelombang slab berbahan polymethyl methacrylate (PMMA) sebagai hasil fabrikasi dengan metode spin coating. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 2(1), B59–B62.
- Ismail, M. M., & Zainudin, M. N. S. (2011). Numerical method approaches in optical waveguide modeling. *Applied Mechanics and Materials*, 52–54, 2133–2137. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.2133>
- Ismanto, T., & Alaydrus, M. (2013). Perancangan transisi koaksial ke waveguide WG8. *Jurnal Ilmiah Elektro dan Telekomunikasi*, 4(2), 36–43.
- Jiang, L., Yang, J., Wang, S., Li, B., & Wang, M. (2011). Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity. *Optics Letters*, 36(19), 3750–3752.
- Kumar, D., Anandan, R., & Ekanthamoorthy, J. (2015). Advances in dental-PMMA based artificial teeth through rapid prototyping technology. *Biomedical Research*, 26(Special Issue), S6–S8.
- Kurniansyah, K. E. (2019). Fabrikasi dan karakterisasi buried waveguide menggunakan polymethyl methacrylate untuk operasi pada daerah cahaya tampak [Skripsi Sarjana, Universitas Negeri Semarang].
- Mahmudin, D., & Wijayanto, N. (n.d.). Pemandu gelombang optik polimer pada substrat silikon dioksida untuk panjang gelombang $1,55 \mu\text{m}$. *Jurnal Fotonik*, 2(1), 18–23.
- Mathews, A. J. (2014). Object-based spatiotemporal analysis of vine canopy vigor using an inexpensive unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 085199. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.8.085199>.
- Prajzler, V., Maštera, R., & Jeřábek, V. (2014). Large core planar 1×2 optical power splitter with acrylate and epoxy resin waveguides on polydimethylsiloxane substrate. *Proceedings of the Czech Technical University in Prague*, 4(1), 29–33.
- Sanjaya, E. (2012). Fabrikasi dan karakterisasi film tipis polystyrene untuk aplikasi gelombang planar [Skripsi Sarjana, Universitas Negeri Semarang].
- Siyu, E., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2019). Fiber optic surface plasmon resonance temperature sensor based on hollow core fiber. *Fourier Transform Spectroscopy*, JTh2A–10.
- Woyessa, G., Nielsen, K., Stefani, A., Markos, C., & Bang, O. (2016). Temperature insensitive hysteresis-free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor. *Optics Express*, 24(2), 1206–1213. <https://doi.org/10.1364/OE.24.001206>.
- Yulianti, I., Ngurah Made, D. P., Lestiyanti, Y., & Kurdi, O. (2018). Optimization of ridge waveguide structure for temperature sensor application using finite difference method. *MATEC Web of Conferences*, 159, 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815902020>
- Zhang, H., Zhang, G., Li, J., Fan, X., Jing, Z., Li, J., & Shi, X. (2017). Lightweight, multifunctional microcellular PMMA/Fe₃O₄@MWCNTs nanocomposite foams with efficient electromagnetic interference shielding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.009>