

Jenis Fiber Optik Berdasarkan Jumlah Mode dan Indeks Bias: Tinjauan dan Perbandingan

Riki Perdana¹ Riwayani² Heru Kuswanto³

^{1,2,3}Universitas Negeri Yogyakarta

Email: ¹rikiperdana@uny.ac.id, ²riwayani.2022@student.uny.ac.id, ³herukus61@uny.ac.id

Abstract

Many types of fiber optics have been developed and used by researchers to create best fiber. This study aimed to provide an overview of the the type of fiber optics based on the number of mode and refractive index. Also the study provide a breif comparison of these types with their strengths and weakness. A total 30 article published (from the year 2016 to 2020) in main journals wew investigated thoroughly through document analysis method. The study reveals. However, each types has some advantages as well as disadvantages over the others that should be kept in mind in their usages. A carefull user, such as researcher or others would be aware of the types and select the most effective one for his/her purposes.

Keywords: Fiber optics, number of mode, refractive index

Abstrak

Banyak jenis fiber optik telah dikembangkan dan digunakan oleh para peneliti untuk menghasilkan jenis terbaik. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang jenis fiber optik berdasarkan jumlah mode dan indeks biasnya. Studi ini juga memberikan perbandingan singkat dari jenis-jenis ini dengan kelebihan dan kekurangannya. Sebanyak 30 artikel yang diterbitkan (dari tahun 2016 hingga 2020) di jurnal-jurnal utama yang telah diteliti secara menyeluruh melalui metode analisis dokumen. Studi ini mengungkapkan kelebihan dan kekurangan setiap jenis fiber optik. Namun, masing-masing jenis memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan dibandingkan yang lain yang harus diingat dalam penggunaannya. Pengguna yang berhati-hati, seperti peneliti atau orang lain akan menyadari jenisnya dan memilih yang paling efektif sesuai dengan tujuan penggunaan.

Kata-kata kunci: Fiber optic, jumlah mode, dan indeks bias

PENDAHULUAN

Fiber optik merupakan salah satu teknologi baru yang akhir-akhir ini mendapat perhatian lebih dalam pengembangan reservoir inkonvensional (Amini et al., 2017). Fiber optik mampu mengirimkan informasi dengan kecepatan tinggi, kapasitas besar, dan redaman yang rendah (Ikhsan et al., 2018). Fiber optik merupakan media transmisi yang saat ini paling baik untuk transmisi data, bahkan suara dan video dapat ditransmisikan (Mansuan et al., 2018). Fiber optik juga sebagai media pemandu gelombang cahaya yang berbentuk silinder (Prasetyo et al., 2017). Sistem fiber optik bekerja berdasarkan reflektometri domain waktu optik, di mana pemancar mengirimkan pulsa cahaya ke dalam fiber; pengotor yang melekat pada inti kaca, menghamburkan kembali cahaya ke arah detektor (Ghahfarokhi et al., 2018). Ini adalah media yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya yang umumnya terbuat dari silika dengan doping germanium dioksida (Pradhan et al., 2019). Struktur ini membuat fiber optik terus dimanfaatkan hingga saat ini.

Beberapa peneliti telah menjelaskan manfaat atau kelebihan dari sensor fiber optik. Sensor berbasis fiber memiliki beberapa keunggulan spesifik seperti kemampuan pemantauan jarak jauh, daya tahan terhadap lingkungan ekstrim dan interferensi anti-elektromagnetik (Gao et al., 2020). Sensor fiber optik yang terdistribusi dapat mengumpulkan hubungan regangan *pole-stress* dan pemindaian laser tiga dimensi sehingga dapat memberikan informasi lokasi (Seo, 2020). Fiber optik telah berhasil menjadi

sensor cairan minyak jagung dan mampu berkinerja tinggi saat menggunakan panjang gelombang dengan sumber cahaya 1550 nm dan mengukur konsentrasi lebih dari 85% (Md Johari et al., 2017). Bahkan, teknologi sensor fiber optik baru mampu melakukan pengukuran masuknya air terdistribusi juga telah ditemukan (Thomas & Helevang, 2020). Oleh karena itu fiber optik memberi banyak manfaat bahkan di berbagai bidang kehidupan.

Fiber optik memiliki material unik yang mampu menghasilkan manfaat bagi manusia. Pemancar ultrasonik optik yang dibangun di atas substrat kaca dimungkinkan untuk menerapkan struktur dan bahan yang mirip dengan fiber optik dan oleh karena itu, memiliki beberapa keunggulan: (1) resolusi spasial yang tinggi karena ukuran fiber optik yang kecil; (2) kemampuan penginderaan jauh; (3) semua operasi optik yang akan menghilangkan interferensi elektromagnetik (Wu et al., 2016). Ada beberapa jenis fiber optik yang didukung oleh prinsip kerja yang berbeda, dan biasanya dibagi menjadi dua kelompok: (i) intrinsik, dimana fiber optik merupakan elemen penginderaan; dan (ii) ekstrinsik, di mana fiber optik hanyalah media untuk membawa cahaya ke dan dari elemen atau ruang yang terpisah (Udd & Spillman, 2011). Diantara sekian banyak fiber optik, ada beberapa yang digunakan untuk pengukuran suhu selama perlakuan panas, yaitu: Sensor Fiber Bragg Grating (FBGs) dan sensor fluoroptik (Schena et al., 2016). Sensor gas fiber optik bekerja berdasarkan prinsip variasi intensitas perambatan cahaya melalui inti fiber ketika gas berinteraksi pada suhu sekitar, dengan bagian fiber yang dilapisi (Rao et al., 2020). Kondisi ini menguntungkan para teknisi geologi dalam memahami gejala gas di dalam tanah.

Ada banyak cara untuk meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor fiber optik. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah melalui penyambungan fiber tipis dan pelapis sensitif, yang merupakan teknik penginderaan gelombang cepat (Eanes) (Jiao et al., 2020). Banyak teknik didasarkan pada menciptakan lebih banyak tumpang tindih antara mode pandu gelombang dan media di sekitarnya dengan menggunakan variasi geometri pada sensor probe (Datta & Saha, 2020). Bahan tersebut seperti struktur yang dipoles samping (Jing et al., 2015), fiber berbentuk D (De-Jun et al., 2014), pandu gelombang *multi-mode* berbentuk labu (Tian et al., 2017) dan struktur fiber yang mempertahankan polarisasi terkorosi (Dong et al., 2019). Untuk itu, penting bagi peneliti untuk menentukan jenis yang tepat untuk disintesis guna menghasilkan fiber yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang jenis-jenis dalam pemanfaatan fiber optik.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, artikel yang diterbitkan di sejumlah jurnal bidang fisika material dan diindeks di database utama diselidiki secara menyeluruh untuk mendapatkan data tentang jenis fiber optik. Untuk mengidentifikasi penelitian yang relevan dalam literatur kami melakukan pencarian sistematis terhadap 4 database dengan metode analisis dokumen. Kami membatasi pencarian pada studi dalam bahasa Inggris yang diterbitkan antara tahun 2010 dan 2020 untuk mendapatkan sebagian besar studi tentang jenis fiber optik. Proses multistap diikuti di mana setiap artikel dibaca dan informasi dari artikel diidentifikasi dan didiskusikan antara kedua peneliti. Setelah mempersempit dari 100 artikel yang awalnya diidentifikasi dengan pencarian kata kunci abstrak, penelitian ini mencakup total 30 artikel penelitian yang abstraknya mengungkapkan fokus pada jenis fiber optik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk membuat fiber optik, berbagai jenis telah dikembangkan dan digunakan berdasarkan jumlah mode dan indeks bias. Berdasarkan jumlah modenya, ada dua jenis yaitu *single-mode* dan *multi-mode*. Juga berdasarkan indeks bias ada dua jenis yaitu *step-index* dan *graded-index*. Jumlah mode dan indeks bias ditemukan umum digunakan dalam penelitian fisika untuk membuat fiber optik. Namun, masing-masing jenis memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan dibandingkan yang lain seperti yang dibahas dalam beberapa penelitian.

Di segmen dasar, penggunaan komponen fiber single-mode, menggabungkan sinyal propagasi menjadi fiber *single-mode* sangat disukai (Lim et al., 2019). Salah satu keunggulan *single-mode* adalah dapat digunakan untuk data link hingga ~100 km dan memiliki *bandwidth* yang jauh lebih tinggi dibandingkan MMF (M.-J. Li et al., 2019). Fiber *single-mode* diperlukan untuk menghindari distorsi modal karena fiber akan mengalami distorsi modal jika lebih dari satu mode cahaya merambat melalui inti (Habib & Anower, 2019).

Ada banyak keuntungan dari laser fiber *single-mode* berdaya tinggi, seperti kualitas sinar dengan keterbatasan difraksi, stabilitas tinggi, dan efisiensi konversi elektro-optik yang tinggi dan (Yu et al., 2020). Profil *single-mode* sederhana dan biasanya fiber *single-mode* standar dirancang dengan profil *step-index* dengan nilai α lebih besar dari 5 (M.-J. Li et al., 2020). Fiber *single-mode* diperlukan untuk mengembangkan osilator laser, seperti laser fiber frekuensi tunggal dan ultrafast (Peiwen Kuan et al., 2016). Oleh karena itu, sistem laser fiber memiliki keunggulan output mode tunggal, kemampuan pembentukan pulsa serbaguna, stabilitas yang baik, volume kecil, dan bebas perawatan, yang dapat digunakan di banyak aplikasi (Zhang et al., 2018). Fiber *single-mode* pengkondisian modal khusus juga dapat dirancang untuk integrasi dalam adaptor kompak (Chen et al., 2020). Fiber *single-mode* digunakan di pusat data untuk aplikasi jarak pendek dan jarak jauh karena transmisi mode tunggal (SM) mampu menghasilkan *bandwidth* sistem yang tinggi dan jangkauan yang lebih jauh, pusat data berskala besar dan besar cenderung mengadopsi fiber mode tunggal standar sebagai media transmisi tunggal (Chen et al., 2019).

Fiber optik *multi-mode* telah dipelajari sebagai platform yang kuat dan praktis untuk aplikasi optik nonlinier dan optik kuantum. Fiber optik *multi-mode* standar biasanya mendukung transmisi lebih dari 100 mode (Markiewicz et al., 2020). Keunggulan fiber *multi-mode* adalah tingkat masukan cahaya yang lebih tinggi dan peningkatan efisiensi penangkapan (Murray et al., 2018). Kinerja transmisi fiber optik *multi-mode* sangat dipengaruhi oleh mode kopling. Kopling tersebut mewakili transfer daya antara mode yang berdekatan (Djordjević & Savović, 2017).

Perambatan cahaya dalam fiber optik *multi-mode* biasanya memberikan pengacakan spasial dan temporal dari bidang yang ditransmisikan mirip dengan perambatan melalui media hamburan (Florentin et al., 2017). Sinyal dari fiber optik *multi-mode* digunakan untuk mengekstraksi deformasi dari sinyal yang dihasilkan oleh kabel monomode (Lirola et al., 2016). Fiber optik *multi-mode* semakin diminati untuk transmisi kecepatan data yang lebih tinggi (Cottrell & Davis, 2019). Generasi pasangan foton dalam fiber optik *multi-mode* menunjukkan potensi yang cukup besar untuk menghasilkan foton yang direkayasa untuk komunikasi kuantum dan aplikasi pemrosesan informasi kuantum (Pourbeyram & Mafi, 2016). Tabel 1 menunjukkan kelebihan dan kekurangan fiber *single-mode* dan *multi-mode* (Badhon et al., 2018):

Tabel 1. Kelebihan dan kekurangan Fiber optik

Jenis Fiber	Kelebihan	Kekurangan
<i>Single-mode</i>	• Increase bandwidth capacity • Limited Data Dispersion & External Interference. The single input mode allows SMF to limit light scattering, which in turn reduce light waste and increase data transmission data. • Fast Transmission Speed. Single-mode fiber cable can support data transmission speed up to 10Gbps.	Although it has better performance in long runs transmission than <i>multi-mode</i> fiber cable, single-mode fiber cables often cost more
<i>Multi-mode</i>	• In compared with single-mode fiber cable, it is less expensive and are easier to work • In addition, <i>multi-mode</i> fiber	However, <i>multi-mode</i> fiber cable has high dispersion and attenuation rate, the quality of optical signals is reduced as the

cable also provides high speed and high bandwidth over short distances. And they allows several mode optical signals transmitted at the same time.	transmission distance is getting longer. Therefore, <i>multi-mode</i> fiber cable is often used in data and audio/video applications in LANs.
--	---

Fiber *step-index* adalah fiber optik yang memiliki profil indeks bias yang ditandai dengan indeks bias yang seragam di dalam inti dan penurunan indeks bias yang besar pada jarak antarmuka kelongsong inti sehingga memiliki indeks bias yang lebih rendah (Moore, 2019).). Kualitas permukaan antarmuka inti / kelongsong dari fiber *step-index* merupakan parameter penting yang harus dipertimbangkan saat membuat perangkat optik, karena sangat memengaruhi kehilangan energi (Ceci-Ginistrelli et al., 2016). Indeks bias inti fiber *step-index* lebih besar daripada *cladding*, yang memungkinkannya memandu cahaya melalui pantulan internal total (Ren, 2019).

Fiber *step-index* selalu menghasilkan efisiensi kopling yang besar di setiap perangkat kopling karena nilai indeks biasnya yang konstan di wilayah inti (Maiti et al., 2019). Perilaku modal fiber *step-index* adalah parameter kritis dan harus dirancang dengan hati-hati untuk fiber yang dimaksudkan agar mampu menghasilkan daya rata-rata dalam rentang multi-kW (Beier et al., 2017). Fiber ini dapat dioptimalkan terkait kompatibilitas dengan komponen fiber optik lain yang digunakan dan biasanya fiber *step-index* sederhana sudah cukup baik (Arshad et al., 2019). Fiber *step-index* umumnya digunakan untuk tujuan komunikasi (Sadhu & Sarkar, 2016). Fiber *step-index* sudah tersedia untuk digunakan sebagai fiber komunikasi, sehubungan dengan efisiensi kopling maksimum terbaik, sertifikasi manfaatnya baik untuk dua panjang gelombang kepentingan praktis (Mukhopadhyay, 2017).

Fiber *step-index* jarang diguanakn dalam beberapa pemakaian. Salah satu kelemahan fiber *step-index* adalah profil atenuasinya yang tinggi dan dispersi modal yang tinggi membatasi jarak dan kapasitas tautan komunikasi (Kruglov et al., 2016). Fiber *multi-mode graded-index* menggunakan variasi dalam komposisi inti untuk mengkompensasi panjang jalur mode yang berbeda. Ini menawarkan bandwidth ratusan kali lebih banyak daripada fiber *step-index* (Mohapatra et al., 2017). Namun biaya pembuatan fiber *graded-index* lebih besar dibandingkan fiber *step-index* (Raju & Arunachalam, 2019). Kehilangan tekukan dari dua mode fiber indeks bergradasi setara lebih kecil daripada fiber *step-index* (Y. Li et al., 2020). Dibandingkan dengan fiber *step-index*, fiber *graded-index* memiliki beberapa keunggulan seperti transmisi optik yang lebih tinggi dan kehilangan energi yang lebih rendah (S. Li & Li, 2019). Profil indeks bias yang paling umum untuk fiber *graded-index* hampir parabola (Prottasha et al., 2017). Jadi, bagian pendek fiber indeks bergradasi dapat digunakan sebagai lensa mikro untuk meningkatkan kontras pinggir dari pola spektral interferensi (Guo et al., 2019).

Berdasarkan penelusuran literatur yang komprehensif terkait dengan penelitian fiber optik, para peneliti telah melaporkan berbagai macam jenis fiber optik. Namun, temuan ini belum mencapai kesimpulan akhir mengenai jenis terbaik untuk tujuan tertentu. Pemilihan jenis fiber tu tergantung pada konteks variabel yang akan diselidiki, karakteristik objek yang ingin diselidiki, dan kemampuan serta sumber daya peneliti.

SIMPULAN

Kesimpulannya dalam penelitian ini ialah terdapat beberapa jenis fiber optik, namun semua jenis memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Kelebihan dan kekurangannya berdasarkan analisis beberapa artikel penelitian dalam ruang lingkup penelitian ini. Peneliti yang bertujuan untuk menggunakan fiber harus berhati-hati tentang masalah pemilihan jenis ini dan menggunakan jenis tepat sesuai tujuan mereka.

DAFTAR PUSTAKA

- Amini, S., Kavousi, P., & Carr, T. R. (2017). Application of fiber-optic temperature data analysis in hydraulic fracturing evaluation: A case study in Marcellus Shale. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference 2017*. <https://doi.org/10.15530/urtec-2017-2686732>
- Arshad, M. A., Hartung, A., & Jäger, M. (2019). A stimulated Stokes Raman scattering-based approach for continuous wave supercontinuum generation in optical fibers. *Laser Physics Letters*. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaff53>
- Badhon, A. I., Prapty, H. A., Amin, K. Bin, & Hossain, M. A. (2018). Analysis of coupling coefficient and crosstalk in a homogenous multicore optical fiber. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*. <https://doi.org/10.23919/ICACT.2018.8323860>
- Beier, F., Hupel, C., Kuhn, S., Hein, S., Nold, J., Proske, F., Sattler, B., Liem, A., Jauregui, C., Limpert, J., Haarlammert, N., Schreiber, T., Eberhardt, R., & Tünnermann, A. (2017). Single mode 43 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier. *Optics Express*. <https://doi.org/10.1364/oe.25.014892>
- Ceci-Ginistrelli, E., Pugliese, D., Boetti, N. G., Novajra, G., Ambrosone, A., Lousteau, J., Vitale-Brovarone, C., Abrate, S., & Milanese, D. (2016). Novel biocompatible and resorbable UV-transparent phosphate glass based optical fiber. *Optical Materials Express*. <https://doi.org/10.1364/ome.6.002040>
- Chen, X., Himmelreich, J. E., Hurley, J. E., Zhou, C., Jiang, Q., Qin, Y., Li, J., Wu, C., Chen, H., Coleman, D., & Li, M. J. (2019). Universal fiber for short-distance optical communications. *Journal of Lightwave Technology*. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2886954>
- Chen, X., Li, K., Zakharian, A. R., Hurley, J. E., Stone, J. S., Coleman, D., Liu, J., Wu, Q., & Li, M. J. (2020). A fiber modal adapter for upgrading 850 nm multimode fiber links to 1310 nm single-mode transmission. *Optical Fiber Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102210>
- Cottrell, D. M., & Davis, J. A. (2019). Simulation of multimode optical fibers using the angular spectrum algorithm and a Fourier analysis. *Applied Optics*. <https://doi.org/10.1364/ao.58.004585>
- Datta, A., & Saha, A. (2020). Realization of a highly sensitive multimode interference effect-based fiber-optic temperature sensor by radiating with a Vortex beam. *Optik, 165006*.
- De-Jun, F., Mao-Sen, Z., Liu, G., Xi-Lu, L., & Dong-Fang, J. (2014). D-shaped plastic optical fiber sensor for testing refractive index. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2301911>
- Djordjevich, A., & Savović, S. (2017). Mode coupling in 340 μm GeO₂ doped core-silica clad optical fibers. *Optics and Laser Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.10.009>
- Dong, C., Jiang, Y., Ye, S., Xing, R., Wu, Y., & Jian, S. (2019). Liquid refractive index and temperature sensor using multimode interference-based corroded polarization-maintaining fiber. *Journal of Nanophotonics*. <https://doi.org/10.1117/1.jnp.13.016007>
- Florentin, R., Kermene, V., Benoist, J., Desfarges-Berthelemot, A., Pagnoux, D., Barthélémy, A., & Huignard, J. P. (2017). Shaping the light amplified in a multimode fiber. *Light: Science and Applications*. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.208>

- Gao, S., Ji, C., Ning, Q., Chen, W., & Li, J. (2020). High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique. *Optical Fiber Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102202>
- Ghahfarokhi, P. K., Carr, T., Bhattacharya, S., Elliott, J., Shahkarami, A., & Martin, K. (2018). A fiber-optic assisted multilayer perceptron reservoir production modeling: A machine learning approach in prediction of gas production from the Marcellus shale. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference 2018, URTC 2018*. <https://doi.org/10.15530/urtec-2018-2902641>
- Guo, T., Li, P., Zhang, T., & Qiao, X. (2019). Compact fiber-optic ultrasonic sensor using an encapsulated micro-cantilever interferometer. *Applied Optics*. <https://doi.org/10.1364/ao.58.003331>
- Habib, M. A., & Anower, M. S. (2019). Design and numerical analysis of highly birefringent single mode fiber in THz regime. *Optical Fiber Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.11.006>
- Ikhsan, R., Syahputra, R. F., Saktioto, & Okfalisa. (2018). Performance control of semiconductor optical amplifier and fiber raman amplifier in communication system. *Proceedings - 2018 IEEE/ACIS 19th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD 2018*. <https://doi.org/10.1109/SNPD.2018.8441122>
- Jiao, L., Zhong, N., Zhao, X., Ma, S., Fu, X., & Dong, D. (2020). Recent advances in fiber-optic evanescent wave sensors for monitoring organic and inorganic pollutants in water. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115892>
- Jing, N., Zheng, J., Zhao, X., & Teng, C. (2015). Refractive Index Sensing Based on a Side-Polished Macrobending Plastic Optical Fiber. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2385308>
- Kruglov, R., Loquai, S., Vinogradov, J., Ziemann, O., Bunge, C. A., Bruederl, G., & Strauss, U. (2016). 10.7 Gb/s WDM transmission over 100-m SI-POF with discrete multitone. *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, OFC 2016*. <https://doi.org/10.1364/ofc.2016.w4j.5>
- Li, M.-J., Chen, X., Li, K., Hurley, J. E., & Stone, J. (2019). *Optical fiber for 1310nm single-mode and 850nm few-mode transmission*. <https://doi.org/10.1117/12.2516013>
- Li, M.-J., Li, K., Chen, X., Mishra, S. K., Juarez, A. A., Hurley, J. E., & Stone, J. S. (2020). *Single-Mode VCSEL Transmission Over Graded-index Single-Mode Fiber Around 850 nm*. <https://doi.org/10.1364/ofc.2020.w4d.4>
- Li, S., & Li, X. (2019). A simulation study on chaotic behavior of light propagation in graded index fiber under random perturbation. *Optical and Quantum Electronics*. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1780-5>
- Li, Y., Wang, X., Zheng, H., Li, X., Bai, C., Hu, W., & Dong, Q. (2020). A novel six-core few-mode fiber with low loss and low crosstalk. *Optical Fiber Technology*, 5, 102211.
- Lim, C. B., Conan, J. M., Michau, V., Vedrenne, N., Montmerle-Bonnefois, A., Petit, C., Sauvage, J. F., Meimon, S., Perrault, P., Mendez, F., Fleury, B., & Montri, J. (2019). Single-Mode Fiber Coupling with Adaptive Optics for Free-Space Optical Communication under Strong Scintillation. *2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, ICSOS 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICSOS45490.2019.8978978>
- Lirola, F., Pionetti, F. R., Agoumi, J., & Sundermann, A. (2016). Development and qualification of an innovative and cost efficient heat traced flowline optimized for J-laying. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/27044-ms>

- Maiti, S., Biswas, S. K., & Gangopadhyay, S. (2019). Study of coupling optics involving graded index fiber excitation via upside down tapered parabolic microlens on the fiber tip. *Optik*. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163318>
- Mansuan, M. S., Soewito, B., & Hamdani, M. (2018). Designing Fiber Optic Network using Voronoi Diagram Approach. *Procedia Computer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.145>
- Markiewicz, K., Kaczorowski, J., Yang, Z., Szostkiewicz, L., Dominguez-Lopez, A., Wilczynski, K., Napierala, M., Nasilowski, T., & Thévenaz, L. (2020). Frequency scanned phase sensitive optical time-domain reflectometry interrogation in multimode optical fibers. In *APL Photonics*. <https://doi.org/10.1063/1.5138728>
- Md Johari, M. A., Mohd Azize, A., Mohd Said, R., Ngatiman, N. A., & Zaine, N. (2017). Corn Oil Concentrations Detection for Food Industry Research Development by Using Application of Fiber Optic Liquid Sensor Concept. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701108>
- Mohapatra, B. N., Jonaid, M., & Routray, A. (2017). Audio Transmitter and receiver System using Fiber Optic Cable. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*, 5(5).
- Moore, S. (2019). *Composite graded-index fiber mode field adaptor for high-aspect-ratio core optical fibers*.
- Mukhopadhyay, S. (2017). Laser diode to circular core graded index single mode fiber excitation via quadric interface microlens on the fiber tip and identification of the suitable refractive index profile for maximum coupling efficiency with optimization of structure parameter. *Journal of Optics (India)*. <https://doi.org/10.1007/s12596-016-0358-x>
- Murray, M. J., Davis, A., & Redding, B. (2018). Multimode fiber Φ -OTDR with holographic demodulation. *Optics Express*. <https://doi.org/10.1364/oe.26.023019>
- Peiwen Kuan, P. K., Xiaokang Fan, X. F., Wentao Li, W. L., Xueqiang Liu, X. L., Chunlei Yu, C. Y., Lei Zhang, L. Z., & and Lili Hu, and L. H. (2016). High-efficiency $\sim 2 \mu\text{m}$ laser in a single-mode Tm-doped lead germanate composite fiber. *Chinese Optics Letters*. <https://doi.org/10.3788/col201614.081601>
- Pourbeyram, H., & Mafi, A. (2016). Photon pair generation in multimode optical fibers via intermodal phase matching. *Physical Review A*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.023815>
- Pradhan, S., Patnaik, B., & Panigrahy, R. (2019). Hybrid Multiplexing (OTDM/WDM) Technique for Fiber Optic Communication. *2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences, ICETAS 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2018.8629159>
- Prasetyo, E., Gitrin, M. P., Marzuki, A., & Suryanti, V. (2017). Biochemical fiber sensor based on evanescent field for detection persistent organic pollutants (POPs). *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/795/1/012028>
- Prottasha, S. N., Ahmed, N. N. N., & Afroj, J. (2017). *Comparative Study of Dispersion and Other Losses including Nonlinear Impairments of Different Models of Photonic Crystal Fiber (PCF) by Varying Geometrical Shapes*. Military Institute of Science and Technology (MIST).
- Raju, S., & Arunachalam, M. (2019). Performance of Fiber with Elevated Refractive Index at Core Axis. *IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing, INCOS 2019*. <https://doi.org/10.1109/INCOS45849.2019.8951402>

- Rao, S. K., Priya, A. K., Kamath, S. M., Karthick, P., Renganathan, B., Anuraj, S., & Gopalakrishnan, C. (2020). Unequivocal evidence of enhanced room temperature sensing properties of clad modified Nd doped mullite Bi₂Fe₄O₉ in fiber optic gas sensor. *Journal of Alloys and Compounds*, 155603.
- Ren, Y. (2019). *Specially Shaped Optical Fiber Probes: Understanding and Their Applications in Integrated Photonics, Sensing, and Microfluidics*. Worcester Polytechnic Institute.
- Sadhu, A., & Sarkar, S. (2016). A straightforward approximate analysis of Kerr nonlinear processes in sub-wavelength diameter optical fiber with better accuracy over variational technique. *Optics Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.01.008>
- Schena, E., Tosi, D., Saccomandi, P., Lewis, E., & Kim, T. (2016). Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: An overview. In *Sensors (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/s16071144>
- Seo, H. (2020). Monitoring of CFA pile test using three dimensional laser scanning and distributed fiber optic sensors. *Optics and Lasers in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106089>
- Thomas, P. J., & Hellevang, J. O. (2020). A distributed fibre optic approach for providing early warning of Corrosion Under Insulation (CUI). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104060>
- Tian, K., Farrell, G., Wang, X., Yang, W., Xin, Y., Liang, H., Lewis, E., & Wang, P. (2017). Strain sensor based on gourd-shaped single-mode-multimode-single-mode hybrid optical fibre structure. *Optics Express*. <https://doi.org/10.1364/oe.25.018885>
- Udd, E., & Spillman, W. B. (2011). Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists: Second Edition. In *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781118014103>
- Wu, N., Zou, X., Zhou, J., & Wang, X. (2016). Fiber optic ultrasound transmitters and their applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.10.002>
- Yu, Z., Zhao, P., Lian, H., Hou, J., Chen, B., Zhao, N., & Chen, J. (2020). 3.3 kW high power single mode fiber laser. *Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications*, 1145544. <https://doi.org/10.1117/12.2564807>
- Zhang, R., Tian, X., Zhou, D., Xu, D., Zong, Z., Li, H., Fan, M., Zhu, N., Su, J., Zhu, Q., & Jing, F. (2018). Single-mode millijoule fiber laser system with high pulse shaping ability. *Optik*. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.198>