

## SERAT OPTIK SEBAGAI SENSOR DETEKSI DENYUT NADI: REVIEW ARTIKEL

Fiona<sup>1</sup>, Halimatus Sa'diyah<sup>2</sup>, Muhammad Yunus<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa PMM-DN Batch 2, Prodi Fisika, FST, Universitas Jambi, Indonesia

<sup>2</sup>Mahasiswa PMM-DN Batch 2, Prodi Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Jember, Indonesia

<sup>3</sup>Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

\*Email: [muhammad.yunus@ung.ac.id](mailto:muhammad.yunus@ung.ac.id)

**ABSTRAK:** Sensor serat optik diimplementasikan untuk mendeteksi denyut nadi telah dikaji berdasarkan review dari beberapa artikel. Metode yang digunakan yaitu mengemukakan intisari dari berbagai artikel yang menyangkut dengan sensor serat optik dalam mendeteksi denyut nadi. Serat optik terdiri dari jenis kaca yang terbuat dari bahan silika dan jenis plastik dari bahan polymer. Beberapa sistem sensor serat optik yang efektif diaplikasikan yaitu *fiber bragg gratings*, *faraday effect fibre-optic current sensors*, dan *hetero-core*. Sistem sensor ini sangat optimal dalam mengukur denyut nadi secara sederhana, akurat, dan murah, dan sensitivitas yang tinggi.

**Kata-kata Kunci:** Sensor, Serat Optik, Denyut Nadi

### PENDAHULUAN

Perkembangan dibidang telekomunikasi untuk transmisi data mengalami kemajuan yang sangat pesat. Salah satu media peningkatan teknologi mentransmisikan data yang dapat diaplikasikan untuk jarak jauh yaitu serat optik. Serat optik merupakan sebuah media transmisi gelombang elektromagnetik yang terbuat dari bahan kaca atau plastik. Serat optik biasanya digunakan untuk menggantikan kabel konvensional yang fungsinya sebagai kabel daya (Indra, 2014) (Yunus, 2018). Saat ini, serat optik banyak dikembangkan berbasis pada sistem sensor. Sensor yang diaplikasikan dari serat optik dapat dijadikan sebagai solusi alternatif yang mampu mengukur berbagai macam besaran fisis seperti tekanan, suhu, gentaran, dan sebagainya (Saputro, 2014)(Setiono, dkk. 2013).

Jenis sensor berbasis serat optik terdiri dari jenis kaca yang terbuat dari bahan silika dan jenis plastik terbuat dari bahan polymer. Keunggulannya yaitu serat optik plastik mempunyai sifat lentur sehingga mudah dilekukan dibandingkan dengan serat optik kaca yang sifatnya mudah patah (Arifin, 2018)(Yunus, 2021).

Penggunaan teknologi sensor serat optik dapat diaplikasikan pada berbagai bidang, salah satunya adalah bidang medis (Chang, 2009). Dalam bidang medis, sensor serat optik sangat dibutuhkan sebagai alat untuk mendiagnosa sebuah penyakit serta memantau kesehatan (Lebang, 2019) (Marzuki, 2016).

Beberapa aplikasinya yaitu mampu mendeteksi kadar urine, darah, saliva, kerja otot, suhu tubuh, jantung, pernapasan, maupun denyut nadi (Budiyanto, 2018) (Yhuwana,2017) (Yoo,2010) (Imran,2017) (Budiyanto, 2018). Penggunaan sensor serat optik

terutama untuk mengukur keadaan detak jantung dan mendeteksi denyut nadi sangat banyak diteliti sekarang ini. Penerapan sensor serat optik yang praktis karena memiliki konsep rambatan, serapan, serta pemantulan gelombang sebagai perangkat instrumentasi yang dibutuhkan (Dave, 2021) (Davey, 2021)(Arifin, 2021).

Sensor serat optik memiliki sensitivitas dan akurasi pengukuran yang tinggi untuk memberikan informasi mengenai diagnostik pada tekanan deyt nadi (Leitão, 2015)(Witt, 2011)(Wang, 2019). Beberapa sistem sensor serat optik yang efektif seperti *fiber bragg gratings*, *hetero-core*, *faraday effect fibre-optic current sensors (FCO)*, *polymer*, dan lain-lain (Liu, 2019)(Gerashchenko, 2019)(Nishiyama, 2016)(Ye, 2020)(Przhiyalkovsky, 2018). Sistem sensor ini untuk pengoptimalisasi dalam mengukur denyut nadi dengan tujuan menyederhanakan perolehan suatu bentuk gelombang pada nadi yang mengalir di arteri karotis (Chertkovt, 2001)(Yeh, 1996)(Chen, 2019).

### METODE PENELITIAN

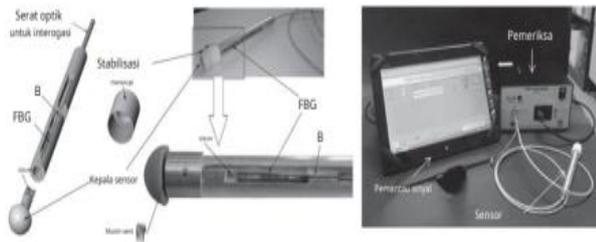
Serat optik terdiri dari jenis kaca yang terbuat dari bahan silika dan jenis plastik dari bahan polymer. Metode yang digunakan yaitu mengemukakan intisari dari berbagai artikel yang menyangkut dengan sensor serat optik dalam mendeteksi denyut nadi. Beberapa sistem sensor serat optik yang efektif diaplikasikan yaitu *fiber bragg gratings (FBG)*, *faraday effect fibre-optic current sensors*, dan *hetero-core*.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### *Fiber Bragg Grating*

*Fiber Bragg Gratings (FBG)* adalah perangkat optik yang pasif jika didasarkan kepada modulasi sebuah periodik dari indeks bias inti serat optik. Prinsip

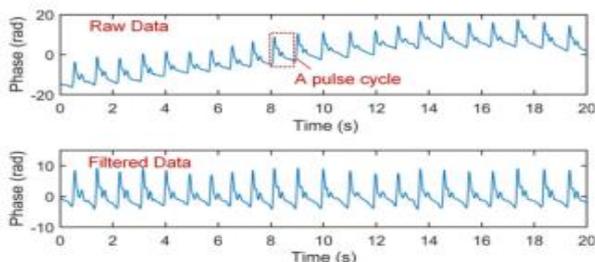
dari sensor *FBG* yaitu memantulkan sebuah cahaya dengan panjang gelombang yang memenuhi sebuah *bragg* orde pertama dengan istilah panjang gelombang *bragg* ( $\lambda_B$ ). Adapun metode yang digunakan oleh peneliti seperti pada Gambar 1 untuk mengukur denyut nadi menggunakan *FBG* yaitu menggabungkan *FBG* sensor ke dalam serat fotosentitif yang memanfaatkan sebuah laser *excimer* UV (Leitão, 2015)(Witt, 2011).



**Gambar 1.** Penggabungan *FBG* sensor kedalam serat fotosentitif (Leitão, 2015)

*FBG* sensor serat optik penggabungan diuji di wilayah arteri karotis menggunakan frekuensi sekitar 10 Hz untuk menghilangkan *noise* menghasilkan sensitivitas  $21,2 \pm 0,04$  pm/ $\mu$ m (Leitão, 2015). Selain itu, metode lain untuk mendeteksi denyut nadi menggunakan *FBG* berbahan silika dan diterapkan pada tekstil yang elastis. Penggabungan *FBG* sensor serat optik ini memiliki refleksitas sekitar 5% pada single-mode fiber (SMF) (Witt, 2011)(Wang, 2019).

*FBG* yang berbahan silika ini berfungsi sebagai titik sebuah pantulan referensi dengan fase tetap. Penjelasan ini membuktikan bahwa gelombang denyut nadi yang pertama kali di sambungkan akan memantulkan sebuah cahaya yang dipantulkan oleh *FBG* sensor serat optik berbahan silika tersebut dan setelah itu ujung sensor nadi yang dipantulkan akan membuat sebuah gangguan ataupun *noise* yang kemudian akan memberikan sinyal frekuensi detak ataupun denyut nadi yang dihasilkan dan akan diterima oleh detektor foto seperti pada gambar 2 yang menggunakan bahan uji oleh seorang pria yang berusia 24 tahun (Witt, 2011)(Wang, 2019).



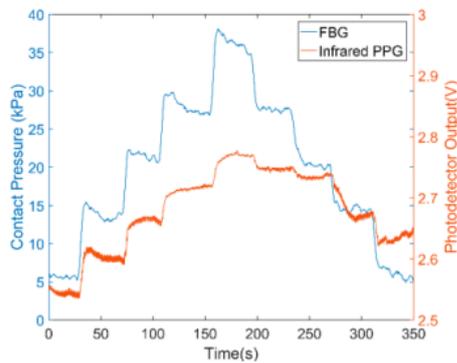
**Gambar 2.** Bentuk gelombang nadi seorang pria berusia 24 tahun, sebelum dan sesudah *high pass filtering* (Wang, 2019)

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa bentuk gelombang nadi dengan fidelitas tinggi yang dapat dipulihkan dengan data baru dan tanpa adanya proses pemfilteran yang dilakukan. Setelah dikaji melalui proses penyaringan *high-pass*, sinyal nadi tanpa adanya sebuah *noise* menunjukkan keseragaman yang lebih baik. Oleh karena itu Denyut jantung (HR) dihitung menjadi sekitar 66 denyut per menit. Pada gambar 3 juga dapat dilihat dengan jelas siklus nadi dan semua karakteristik (Wang, 2019).

Jika ditinjau dari kedua jenis penggabungan antara serat fotosentitif dan *FBG* silika dengan tekstil elastis. Dapat diketahui bahwa ternyata hasilnya serupa dan perbedaan yang dihasilkan tidak terlalu banyak. Karena kedua penggabungan tersebut memiliki tujuan utama yaitu untuk pengukuran yang mendeteksi bentuk gelombang denyut karotis. Hanya yang menjadi pembeda yaitu pada penggabungan dengan *FBG* silika dengan tekstil memberikan sinyal frekuensi detak ataupun denyut nadi yang dihasilkan dan akan diterima oleh suatu detektor foto. Sementara pada penggabungan dengan serat fotosentitif memberikan cara agar menghilangkan *noise* atau gangguan kecil yang terdapat pada gelombang nadi setelah dipantulkan oleh *FBG* sensor serat optik (Witt, 2011)(Wang, 2019).

*FBG* sensor serat optik dapat digunakan untuk mendeteksi lingkungan dan suhu subjek dan mengukur tekanan pada pendeteksi oksigen yang berada didalam tubuh manusia sebagai penambah pada alat *Pulse Oximetry*. Beberapa peneliti mengkaji bahwa pendeteksi oksigen nadi atau dapat disebut sebagai *Pulse Oximetry* biasanya diukur pada salah satu jari tangan seperti jari telunjuk ataupun jari tengah. Pendeteksi tersebut digunakan untuk mengukur kadar  $SpO_2$  yang berada ditubuh manusia dengan melakukan sebuah percobaan yang akan dilakukan oleh sukarelawan. Sukarelawan tersebut akan duduk dan diberikan sebuah perintah untuk bernapas normal terlebih dahulu (Liu, 2018).

Setelah itu *Pulse oximeter* komersial akan merekam  $SpO_2$  dari jari tengah dalam mode transmisi dan memberikan nilai kadar  $SpO_2$ . Dalam hal ini *FBG* sensor serat optik lebih diterapkan untuk memaksimalkan pengiriman dan pengumpulan cahaya dari jaringan untuk setiap serat optik plastik yang digunakan dalam oksimeter nadi dan juga dapat diukur dengan menunjukkan respons oksimetri nadi serat terhadap tekanan yang menggunakan sebuah sinyal PPG inframerah dibawah sebuah tekanan yang berbeda dan diterapkan seperti pada Gambar 3 (Liu, 2018).



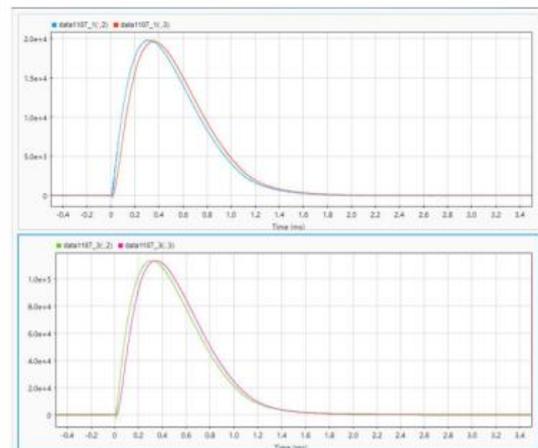
**Gambar 3.** Sinyal PPG inframerah (merah) di bawah tekanan kontak yang berbeda (biru) (Liu, 2018)

*FBG* atau *Fiber Bragg Gratings* sensor serat optik jika ditinjau memiliki banyak kelebihan dan kegunaan yang sangat dibutuhkan dalam bidang kesehatan salah satunya yaitu memiliki sensitivitas yang terbilang cukup tinggi dan memiliki laju pengukuran yang cukup tinggi. Walaupun memiliki banyak kelebihan dan kegunaan *Fiber Bragg Gratings* atau *FBG* ini juga memiliki suatu kelemahan sebagai evaluasi kedepannya. Beberapa penelitian telah mengkaji bahwa kelemahan pada *Fiber Bragg Gratings* atau *FBG* hanya dibagian alat pendukung. Karena alat pendukung yang digunakan dalam *Fiber Bragg Gratings* atau *FBG* ini terbilang cukup mahal serta sulit dalam fabrikasi pemakaiannya tetapi jika ingin mendapatkan hasil yang memuaskan dan murah lebih baik disarankan untuk menggunakan yang berbahan silika ataupun berbahan plastik yang mudah pemakaiannya (Lebang, 2019) (Gerashchenko, 2019).

#### **Faraday Effect Fiber-Optic Current Sensors**

Sensor serat optik merupakan sensor jenis baru yang dapat digunakan untuk penginderaan sebuah arus nadi berdasarkan efek faraday. Efek faraday adalah salah satu jenis efek rotasi magnetik yang digambarkan sebagai interaksi antara medan magnet dan cahaya dalam medium optik. Serat sensor optik efek faraday memiliki karakteristik yang menarik jika ditinjau dari teknik, kinerja dan lingkungan. Oleh karena itu FCOS ini banyak digunakan untuk pengukuran arus dan frekuensi rendah yang akurat dan akan lebih baik jika digunakan dalam pengukuran arus nadi yang besar contohnya dalam akselerator elektron linier tekanan nadi. Prinsip dari FCOS ialah menyematkan selisih antara nilai akumulasi dispersi aktual dan nilai akumulasi dispersi nominal pada interaksi medan magnet dan cahaya pada mediumnya (Ye, 2020) (Przhiyalkovsky, 2018).

Beberapa metode yang dapat digunakan dalam penerapan FCOS salah satunya yaitu metode demodulasi pola interferensi Rayleigh. Metode tersebut juga menarik perhatian beberapa peneliti dikarenakan karena kelebihan yaitu tahan terhadap masalah interferensi fading yang digunakan untuk mendeteksi sebuah gelombang nadi terhadap interaksi dengan gelombang cahaya pada medium. Menurut beberapa peneliti bentuk gelombang nadi dan lebar gelombang nadi dapat memberikan keselarasan yang terbaik dalam penerapan pada FCOS yang menggunakan metode demodulasi pola interferensi Rayleigh. Jika melakukan suatu percobaan dengan mengukur gelombang tersebut dapat memperoleh hasil dengan transformator arus nadi yang berbeda, dimana bentuk gelombang tersebut dapat diukur seperti pada Gambar 4 (Chertkovt, 2001)(Chen, 2019).



**Gambar 4.** Hasil pengukuran dengan menggunakan dua sensor (Ye, 2020)

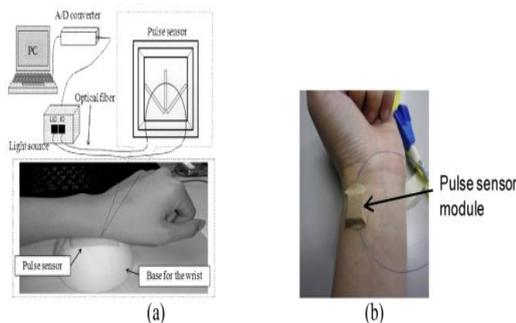
Jika tinjau lebih rinci ternyata pengukuran arus nadi juga penting untuk diteliti. Karena jika arus nadi tidak diteliti lebih rinci maka gelombang nadi yang dikeluarkan melalui sinyal tidak dapat diukur. FOCs merupakan salah satu jenis efek dalam sensor serat optik yang berguna untuk mendeteksi denyut nadi melalui arus dan gelombangnya tentunya dengan bantuan beberapa metode salah satunya metode demodulasi pola interferensi Rayleigh untuk memberikan suatu keselarasan denyut nadi tersebut (Yeh, 1996).

#### **Hetero-Core**

Beberapa sistem sensor serat optik telah banyak digunakan oleh peneliti yakni sensor serat optik fiber bragg grating, faraday effect fibre-optic current sensors, sensor serat optik berbahan silika ataupun plastik tetapi ada salah satu sistem sensor serat optik yang sangat berguna dalam bidang kesehatan yaitu

Sensor serat optik *Hetero-Core*. *Hetero-Core* merupakan sistem sensor serat optik yang dapat mendeteksi suatu pembengkokan sedang dengan sensitivitas yang tinggi terhadap intensitas cahaya optik. Jika dianalisis lebih rinci *Heterocore* sensor serat optik ini terbilang cukup baik karena sensitivitas terhadap gangguannya sangat sedikit. Oleh karena itu sensor serat optik dengan sistem *Hetero-Core* memiliki potensi yang dapat digunakan untuk memantau suatu tekanan nadi dengan rasio sinyal yang tinggi dan stabilitas yang cukup baik terhadap gangguan eksternal (Nishiyama, 2016).

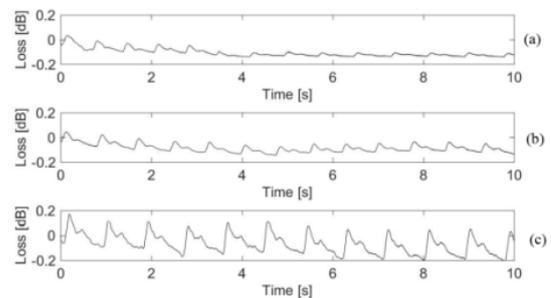
Sensor serat optik *Hetero-Core* Jika dianalisis lebih rinci dapat dilihat pada gambar 6. Pada gambar tersebut menunjukkan sebuah sistem sensor tekanan nadi menggunakan *Hetero-Core* dapat terlihat bahwa pengukuran daya optik digunakan untuk mengukur sumber cahaya dengan panjang gelombang sekitar 1,3  $\mu\text{m}$  light-emitting diode (LED) dan dengan bantuan laser diode (LD) yang digunakan untuk memantau masing-masing serat hetero-core yang berdiameter sekitar 5 dan 3  $\mu\text{m}$  dan P nya sekitar 1 mm dan 0,5 mm. Dimana untuk mengevaluasi sensor denyut nadi dengan tekanan manset yang berada di pergelangan tangan. Sensor tersebut akan diletakkan di dasar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(a). Setelah itu pada Gambar 5(b) menunjukkan suatu pengaturan yang dapat digunakan (Nishiyama, 2016).



**Gambar 5.** Pengaturan eksperimental untuk pemantauan tekanan pulsa serat optik; (a) peralatan pengukuran dan (b) perangkat tekanan nadi yang diminimalkan pada pergelangan tangan (Nishiyama, 2016)

Berdasarkan percobaan yang dilakukan ternyata menunjukkan bahwa sensor optik *Hetero-Core* sangat berguna untuk memantau tekanan nadi. Selain itu, sensor serat optik *Hetero-Core* memiliki beberapa kelebihan sensitivitasnya. Sensor serat optik *Hetero-Core* ini dapat digunakan untuk penggunaan yang praktis dan mudah sebagai perangkat yang dapat digunakan untuk memantau kesehatan seperti aktivitas

berolahraga dan aktivitas fisik yang lainnya. Jika dianalisis dalam sebuah grafik dapat dilihat pada Gambar 6 (Nishiyama, 2016).



**Gambar 6.** Hasil percobaan yang menggunakan modul penginderaan tekanan nadi serat optik hetero inti. Real-time response pada loss untuk posisi bagian hetero-core P = (a) 1 mm, (b) 0,5 mm. (Nishiyama, 2016)

Jika ditinjau pada Gambar 6 menghasilkan bahwa sensitivitas dari sensor tekanan nadi yang diterapkan dapat disesuaikan dengan menggunakan posisi bagian hetero-inti dan kombinasi diameter inti dalam dua serat yang disambung. Dalam percobaan ini sangat praktis karena sensor serat hetero-inti menggunakan beberapa sensor denyut nadi dan dapat disimpulkan bahwa sistem sensor optik *Hetero-Core* dapat digunakan dengan cukup baik untuk memantau tekanan denyut nadi seperti yang sudah dianalisis (Nishiyama, 2016).

## KESIMPULAN

Sensor berbasis serat optik terdiri dari jenis kaca yang terbuat dari bahan silika dan jenis plastik dari bahan polymer. Beberapa sistem sensor serat optik yang efektif diaplikasikan yaitu *fiber bragg gratings*, *hetero-core*, *faraday effect fibre-optic current sensors (FCO)*. Sistem sensor ini sangat optimal dalam mengukur denyut nadi secara sederhana, akurat, dan murah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Indra, A. 2014. Karakterisasi Sistem Sensor Serat Optik Berdasarkan Efek Gelombang Evanescent. *J. Fis. Unand*, vol. 3, no. 1, pp. 8–13.
- Saputro, B. H. 2014. Analisis Pergeseran Mikro Menggunakan Sensor Serat Optik Fd 620-10. *J. Ilmu Fis. Univ. Andalas*, vol. 6, no. 1, pp. 36–39.
- Setiono, D., Hanto, and Widiyatmoko, D. B. 2013. Investigasi Sensor Serat Optik untuk Aplikasi Sistem Pengukuran Berat Beban Berjalan (Weight in Motion System). *TELAHAH J. Ilmu Pengetah. dan Teknol.*, vol. 31, no. 1, pp. 81–86.

- Arifin. 2018. Uji Sensitivitas Sensor pH Berbasis Serat Optik Plastik Konfigurasi U dan Gamma.
- Chang, C. and Mehta, R. 2009. Fiber optic sensors for transportation infrastructural health monitoring. vol. 42, no. 15.
- Lebang, A. K. and Arifin. 2019. Uji Sensitivitas Sensor Denyut Nadi Menggunakan Serat Optik Konfigurasi Sinusoidal.
- Marzuki, A. N. M, A. and M. Yunianto, M. 2016. Desain Sensor Serat Optik Sederhana untuk Mengukur Konsentrasi Larutan Gula dan Garam Berbasis Pemantulan dengan Menggunakan Konfigurasi Jarak Cermin-Fiber Optik Tetap. *Indones. J. Appl. Phys.*, vol. 3, no. 02, p. 163.
- Budiyanto, M., Suhariningsih, S., and Yasin, M. 2018. Potensi Sensor Serat Optik Deteksi Konsentrasi Kolesterol Sebagai Media Pembelajaran Gelombang Dan Optik. *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 2, no. 1.
- Yhuwana, Y. G. Y., Apsari, R., and Yasin, M. 2017. Fiber optic sensor for heart rate detection. *Optik (Stuttg.)*, vol. 134, pp. 28–32.
- Yoo, W. J. *et al.* 2010. Development of respiration sensors using plastic optical fiber for respiratory monitoring inside MRI system. *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 14, no. 3, pp. 235–239.
- Yunus, M., dan Arifin. 2018. Karakterisasi Sensor Kekentalan Oli Berbasis Serat Optik Plastik Menggunakan Metode Back Scattering. *POSITRON* Vol. 8, No. 1.
- Yunus, M., Arifin, A., Fuadi, N., dan Syafar, A. M. 2021. Sensitivity Enhancing of Oil Viscosity Sensor Based on Optical Fiber by Using Bending Angle Method. *INTEK Jurnal Penelitian*, Vol. 8, No. 1, pp. 43-46.
- Imran, A. S. A., Aswar, Pratiwi. 2017. Jurnal Penelitian dan Penalaran. *J. Penelit. dan Penal.*, vol. 4, no. 9, pp. 701–711.
- Budiyanto, M. Yasin, M. and Suhariningsih. 2018. Pengembangan Media Pembelajaran Optik Menggunakan Sensor. *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 3, no. 1, pp. 39–44.
- Dave, P. K. Rojas-Cessa, R. Z. Dong, and Umpaichitra, V. 2021. Survey of saliva components and virus sensors for prevention of COVID-19 and infectious diseases. *Biosensors*, vol. 11, no. 1.
- Davey, C. J., Vasiljevski, E. R., O'Donohue, A. K., Fleming, S. C. and Schindeler, A. 2021. Analysis of muscle tissue in vivo using fiber-optic autofluorescence and diffuse reflectance spectroscopy. *J. Biomed. Opt.*, vol. 26, no. 12, pp. 1–15.
- Arifin, Amaliyah, K. R., Lebang, A. K. Hamrun, N., Dewang, S. and Tahir, D. 2021. Enhance sensitivity of plastic optical fiber sensor by spiral configuration for body temperature applications. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2021.
- Leitão, C., Antunes, P., André, P., Pinto, J. L., and Bastos, J. M. 2015. Central arterial pulse waveform acquisition with a portable pen-like optical fiber sensor. *Blood Press. Monit.*, vol. 20, no. 1, pp. 43–46, 2015.
- Witt, J., Schukar, M., Krebber, K., Demuth, J., and Šašek, L. 2011. Heart rate sensor for integration into personal protective equipment. *POF 2011 20th Int. Conf. Plast. Opt. Fibers - Conf. Proceeding*, pp. 573–577.
- Wang. J. *et al.* 2019. Diaphragm-based optical fiber sensor for pulse wave monitoring and cardiovascular diseases diagnosis. *J. Biophotonics*, vol. 12, no. 10, pp. 1–10.
- Liu, C., Correia, R. G., Ballaji, H. K., Korposh, S., Hayes-Gill, B. R. and Morgan, S. P. 2018. Optical fibre-based pulse oximetry sensor with contact force detection. *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 11.
- Gerashchenko, M., Badeeva, E., Murashkina, T., and Gerashchenko, S. 2019. Medical control of a pulse wave fiber optic sensors. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1421, no. 1.
- Nishiyama, M. Sonobe, M., and Watanabe, K. 2016. Unconstrained pulse pressure monitoring for health management using hetero-core fiber optic sensor. *Biomed. Opt. Express*, vol. 7, no. 9, p. 3675.
- Ye, W., Dong, Z., Ren, R., Liu, J., Huang, K., and Zhang, C. 2020. Application research on fiber-optic current sensor in large pulse current measurement," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1507, no. 7.
- Przhiyalkovsky, Y. V., Gubin, V. P. Starostin, N. I. Morshnev, S. K. and Sazonov, A. I. 2018. Detection of electric current pulses by a fibre-optic sensor using spun fibre. *Quantum Electron.*, vol. 48, no. 1, pp. 62–69.
- Chertkovt, M., Gabitov, I., and Moeser, J. 2001. Pulse confinement in optical fibers with random dispersion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 98, no. 25, pp. 14208–14211.
- Chen, D., Liu, Q., Wang, Y., Li, H., and He, Z. 2019. Fiber-optic distributed acoustic sensor based on a chirped pulse and a non-matched filter. *Opt. Express*, vol. 27, no. 20, p. 29415, 2019.
- Yeh, C., and Bergman, L. 1996. Pulse shepherding in nonlinear fiber optics," *J. Appl. Phys.*, vol. 80, no. 6, pp. 3174–3178.