

Plastic Optical Fiber as Water-Level Sensor *Serat Optik Plastik sebagai Sensor Level Air*

Bakti Dwi Waluyo
Joni Syafrin Rambey
Muhammad Aulia Rahman S

Universitas Negeri Medan
Universitas Negeri Medan
Universitas Negeri Medan

This research presents a low-cost sensor for measuring liquid levels using plastic optical fibers (POF). The sensor reduces the scattering-based optical losses in the fiber, which increase linearly with the liquid height. A U-bent fiber probe and photodetector are used to detect the change in optical intensity. The U-bent probe serves as a test probe for measuring the liquid level. The voltage response difference of the photodetector provides liquid level measurement. This study demonstrates the sensor's responsiveness to liquid level fluctuations above 55 cm at varying temperatures. Sensitivity levels of 1.4 and 3.3 mV/mm were achieved for water level fluctuations below and above 45 cm, respectively. Furthermore, the sensor demonstrated consistently stable responsiveness over multiple cycles.

Plastic Optical Fiber as Water-Level Sensor

Serat Optik Plastik sebagai Sensor Level Air

Bakti Dwi Waluyo¹*) , **Joni Syafrin Rambey**²) , **Muhammad Aulia Rahman S**³)

^{1,2,3)} Department of Electrical Engineering Education, Universitas Negeri Medan, Indonesia

(1) bakti_dw@unimed.ac.id(2) (3)

Abstract _ *This research presents a low-cost sensor for measuring liquid levels using plastic optical fibers (POF). The sensor reduces the scattering-based optical losses in the fiber , which increase linearly with the liquid height. A U-bent fiber probe and photodetector are used to detect the change in optical intensity. The U-bent probe serves as a test probe for measuring the liquid level. The voltage response difference of the photodetector provides liquid level measurement. This study demonstrates the sensor's responsiveness to liquid level fluctuations above 55 cm at varying temperatures. Sensitivity levels of 1.4 and 3.3 mV/mm were achieved for water level fluctuations below and above 45 cm, respectively. Furthermore, the sensor demonstrated consistently stable responsiveness over multiple cycles.*

Keywords: *Real-time Liquid Level Measurement; Plastic Optical Fiber Sensor; U-bent Fiber Optic Probe*

Abstrak Penelitian ini mengembangkan sensor berbasis serat optik plastik (platic optical fiber, POF) berbiaya rendah untuk mengukur level air. Sensor ini bekerja dengan mengurangi kerugian optik berbasis hamburan dalam serat optik dengan mengubah ketinggian air. Sensor ini menggunakan probe serat bengkok berbentuk U dan foto detektor untuk mengukur perubahan intensitas optik. Probe U-bengkok dipasang sebagai probe uji untuk mengukur level air. Perbedaan respons tegangan dari fotodetektor memberikan ukuran level air. Penelitian ini menunjukkan bahwa sensor ini responsif terhadap naik dan turunnya level air pada ketinggian lebih dari 55 cm dengan suhu antara 16°C sampai 70°C. Sensitivitas diperoleh 1,4 mV/mm pada perubahan level air dibawah 45 cm, dan 3,3 mV/mm diperoleh untuk perubahan level air di atas 45 cm. Selain itu,

sensor ini menunjukkan respons yang stabil dan dapat direproduksi selama beberapa siklus pengukuran.

Kata kunci: Pengukuran Level Cairan Secara Langsung; Sensor Serat Optik Plastik; Probe Serat Optik Bengkok-U

Pemantauan level air secara real-time menjadi penting dalam berbagai proses dalam industri, salah satunya industri bahan kimia yang membutuhkan penyimpanan dalam jumlah besar untuk air, minyak, dan bahan kimia [1]. Berbagai jenis sensor level untuk cairan yang tersedia di pasaran sebagian besar berbasis mekanikal atau konvensional [2], ultrasonik [3], dan listrik [4], namun memiliki keterbatasan dalam ukuran, rentan terhadap noise, dan tidak dapat diaplikasikan untuk jenis-jenis cairan konduktif yang dapat memicu ledakan. Oleh karena itu, sensor optik telah diusulkan sebagai solusi yang lebih baik. Dengan menggunakan sensor optik, keamanan dapat ditingkatkan, biaya perawatan menjadi lebih rendah, komponen yang bergerak secara mekanis menjadi lebih sedikit, dan pengukuran level dapat dilakukan secara terus menerus. Penelitian mengenai sensor level cairan berbasis optik terus dilakukan untuk memperbaiki kinerjanya dan menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk pemantauan level cairan dalam industri kimia.

Dalam rentang waktu tiga dekade terakhir, telah ada pengembangan berbagai skema sensor serat optik yang ringkas dan handal. Sebagian besar sensor ini bergantung pada perubahan indeks bias di sekitar elemen penginderaan akibat perubahan level cairan. Beberapa konfigurasi sensor serat optik berdasarkan prinsip perambatan panjang gelombang atau fase cahaya diantaranya adalah fiber Bragg grating [5], multimode fiber [6], long period grating [7], D-shaped fiber [8], modal interference using few-mode fiber [7], dan polarization-maintaining fiber [9]. Sensor-sensor tersebut telah dijelaskan di dalam literatur bahwa hanya dapat mengindera level cairan pada kisaran < 20 cm. Meskipun sensor-sensor ini memiliki sensitivitas yang tinggi, namun memiliki beberapa keterbatasan seperti membutuhkan konektor optik yang tepat dan skema fotodeteksi yang mahal. Oleh karena itu, sensor serat optik berbasis Evanescent wave (EW) menjadi alternatif yang lebih murah untuk penginderaan level berdasarkan modulasi intensitas. Namun, banyak konfigurasi EW menggunakan serat optik silika yang rapuh dan tidak cocok untuk rentang pengukuran yang lebih luas.

Sensor berbasis POF atau plastic optical fiber telah menjadi pilihan alternatif dibandingkan dengan serat silika karena harganya lebih murah, kemudahan dalam instalasi dan penggabungan optik (coupling), serta kekuatannya [10]. POF yang dibengkokkan dalam bentuk elemen penginderaan sistem diskrit yang dipasang secara heliks pada penyangga telah dibuat dalam penelitian ini [11]. Dalam laporan lain, kopling optik yang digunakan pada media cair antara sepasang POF yang dibengkokkan juga telah didemonstrasikan [12]. Selain itu, lubang mikro [13] atau alur-V [14] dalam serat yang disangga juga telah dieksploitasi untuk penginderaan level air. Jangkauan dinamis sebagian besar skema penginderaan di atas ditemukan sekitar 50 cm. Dalam sebuah studi terpisah, telah ditunjukkan bahwa penginderaan level cairan menggunakan POF yang digabungkan dengan LED dan dioda PIN dapat mencapai jangkauan dinamis yang lebih besar, yaitu 200 cm, tetapi dengan sensitivitas yang rendah yaitu 12mV/m [15].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sensor yang sensitif, andal, ringkas, dan hemat biaya untuk pemantauan level air secara kontinu menggunakan sensor POF dengan sepasang LED dan fotodioda. Sensor POF diuji pada air dengan ketinggian lebih dari 50 cm dari dasar wadah.

- PENDAHULUAN
- DESAIN SENSOR

Serat optik plastik yang digunakan sebagai penginderaan atau bagian sensor probe memiliki panjang 100 cm (Gambar 1). Probe ditahan dengan sebuah penyangga agar bentuknya tidak berubah (tetap lurus). Setiap 10 cm dibuka bagian jacket dan *cladding*, jadi probe sensor memiliki

20 bagian yang digunakan sebagai pengindera. Setiap bagian penginderaan apabila terkena air akan mengakibatkan terjadinya perubahan tegangan akibat rugi daya yang terjadi di dalam serat optik. Rugi daya tiap bagian yang terbuka (probe) diukur dengan detektor cahaya, sehingga diketahui hubungan antara rugi daya dengan jumlah probanya. Selanjutnya 20 bagian ini nantinya akan mewakili level air yang ada pada drum pengujian.

Pengupasan jacket serat optik plastik dilakukan dengan menggunakan pisau dan tatakan yang sudah dimodifikasi sesuai ukuran diameter serat optik plastik. Sedangkan untuk mengupas bagian *cladding* dilakukan dengan cara mengamplas dengan ukuran mesh 1200. Untuk memastikan bagian *cladding* sudah terkelupas sempurna adalah dengan memberikan cahaya laser pada salah satu ujung serat optik plastik. Jika cahaya tidak merata keluar, maka lapisan *cladding* belum bersih. Cara lain membuka pembungkus *cladding* adalah menggunakan cairan aseton.

[Figure 1 about here]

III. MATERIAL DAN METODE

Plastic Optical Fiber (dengan diameter 0,5 mm, type SK20) terdiri dari bahan polymethylmethacrylate pada bagian *core* dan bahan fluorinated polymer bagian *cladding* dengan relative indeks bias masing-masing 1,49 dan 1,41 berasal dari Mitsubishi Rayon Co., Ltd. Green LED dan photodetectors (PD) dibeli dari Digikey Inc. Data acquisition system (DAQ) dengan resolusi 16-bit dari National Instruments, USA digunakan untuk memperoleh data dari photodetectors.

Probe POF dibengkokkan menjadi bentuk U sepanjang 2 meter. Selanjutnya digunakan wadah box plastik, sirkuit optoelektronik, DAQ, dan wadah penampungan air (Gambar 2). Box plastik dirancang khusus untuk tempat LED, dua PD, serta probe POF. Rangkaian LED dan PD menggunakan sumber tegangan 5 Volt. Selanjutnya sinyal tegangan diumpungkan ke DAQ, dan sinyal dari PD dimonitor menggunakan NI-DAQ.

Probe POF ditempatkan dalam wadah kaca berbentuk tabung dengan dilengkapi katup pembuangan di bagian bawah. Dimensi wadah kaca masing-masing memiliki diameter 60 cm dan tinggi 60 cm. Pengujian ini dilengkapi dengan pompa air yang digunakan untuk mengisi air pada wadah pengujian serta untuk menyesuaikan level cairan ke nilai yang diinginkan. Selang dari pompa air ditempatkan di bagian bawah untuk menghindari terbentuknya gelembung udara di dalam wadah pengujian selama pengujian.

[Figure 2 about here.]

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan untuk menguji kemampuan sensor serat optik dalam mengukur perubahan level cairan secara real-time pada ketinggian 55 cm. Pengisian air pada wadah pengujian dari 0 cm hingga 55 cm dengan laju volume 3 mL/detik selama 8 menit dan selanjutnya pengurasan pada laju aliran 2 mL/detik selama 10 menit.

Gambar 3 menunjukkan respon sensor yang diplot terhadap level air berdasarkan tegangan yang direkam selama fase pengisian. Dimana berdasarkan Gambar 3, sensitivitas level air pada kesesuaian linier ditentukan antara 0-45 cm dengan sensitivitas 1,4 mV/mm, dan antara 45-55 cm dengan sensitivitas 3,3 mV/mm, dengan perubahan tegangan masing-masing 0,21 mm dan 0,09 mm.

[Figure 3 about here.]

Variasi suhu dapat mempengaruhi indeks bias dari media cairan yang diamati, sehingga akan

mempengaruhi pengukuran level oleh sensor serat optik. Selain itu, perubahan suhu pada media cairan diharapkan dapat merubah RI inti serat optik, sehingga menyebabkan perubahan signifikan pada NA inti serat optik dan media cairan. POF dapat digunakan secara normal pada suhu dibawah 80°C [16]. Oleh karena itu, kinerja POF yang diteliti menggunakan suhu 16, 25, 40, 60, dan 70°C. Respon sensor yang telah dilakukan normalisasi selama fase pengisian dan pengurasan air ditunjukkan pada Gambar 4a. Perbandingan sensitifitas sensor dengan air dalam suhu yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4b. Penurunan sensitivitas terjadi secara bertahap dengan meningkatnya suhu hingga 60°C, dan kemudian mengalami peningkatan dua kali lipat secara tiba-tiba pada suhu 70°C. Pada kondisi ini, nilai indeks bias air dari 1,33 menjadi 1,32 dan Polymethyl Methacrylate (PMMA) dari 1,49 menjadi 1,487 3,63 (diukur dengan refraktometer digital Atago PAL1).

[Figure 4 about here.]

Salah satu keterbatasan sensor optik adalah konsumsi daya yang lebih tinggi dari pada sensor yang menggunakan sumber listrik. Hal ini menjadi masalah utama, terutama dalam perangkat yang menggunakan baterai. Oleh karena itu, salah satu persyaratan penting dari sensor level adalah kemampuannya untuk mengukur level secara akurat saat dinyalakan, tanpa dipengaruhi oleh perubahan level cairan sebelumnya. Gambar 5 menunjukkan respon sensor untuk beberapa siklus on/off selama 30 menit saat level air diatur pada 8, 44, dan 55 cm. Dibutuhkan waktu 60 detik agar respon sensor kembali stabil setiap kali perangkat dinyalakan. Stabilitas sensor juga diuji dengan mengulangi percobaan sebanyak tiga kali dan mencatat responnya selama 12 jam. Kesalahan yang ditemukan hingga $\pm 9\text{mV}$ (0,3% dari nilai skala penuh, yaitu 3 V) disebabkan oleh penguapan air dalam wadah.

[Figure 5 about here.]

V. KESIMPULAN

Studi ini mengamati peningkatan kopling daya optik pada PD dalam sensor level air berbasis serat optik polymer (POF) ketika level cairan meningkat. Untuk memahami fenomena ini, pemeriksaan dilakukan pada POF ukuran pendek yang ditempatkan diatas kapiler kaca dan diberi cahaya warna hijau. Ditemukan bahwa ketika kapiler kaca diisi dengan air, terjadi penurunan substansial dalam cahaya yang terhambur. Studi ini memberikan pemahaman lebih lanjut tentang fenomena optik pada sensor level air berbasis POF dan dapat membantu dalam pengembangan teknologi sensor yang lebih canggih.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi permukaan serat polimer optik (POF) yang telah dideklasifikasi dan dilapisi. Hasil pengamatan dengan menggunakan mikroskop gaya atom (AFM) menunjukkan bahwa permukaan POF yang telah dideklasifikasi memiliki kekasaran lengan sekitar 80 nm, sedangkan permukaan POF yang telanjang tetap halus (Gambar 6). Hal ini menunjukkan adanya cacat yang bisa menyebabkan hamburan cahaya pada permukaan serat yang tidak dilapisi. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan bahwa kerugian optik pada sensor berbasis POF disebabkan oleh hamburan cahaya. Penting untuk dicatat bahwa penelitian sebelumnya telah mempelajari sensor refraktif indeks (RI) berbasis POF yang memanfaatkan fenomena energi yang dipantulkan (EWA), di mana hamburan cahaya bisa diabaikan. Namun, penelitian ini menunjukkan bahwa deklasifikasi POF dengan waktu yang lebih lama menghasilkan kerugian hamburan yang lebih tinggi, yang disebabkan oleh kondisi deklasifikasi yang berbeda.

Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan sensitivitas dan rentang sebesar 10 kali lipat dan 1,5 kali lipat. Meskipun sensor ini memiliki resolusi yang baik, penelitian ini mengusulkan penggunaan sensor level serat optik yang dibuat lebih mudah dan lebih cepat dengan konfigurasi POF sederhana yang dideklasifikasi secara lurus. Sensor ini memiliki interaksi optik yang efisien pada permukaan serat dideklasifikasi, serta memiliki daya optik yang cukup pada PD dalam sensor yang diusulkan sehingga rasio signal-to-noise lebih baik. Pengukuran kehilangan intensitas optik

dilakukan dengan LED dan dua fotodetektor yang harganya terjangkau. Keuntungan sensor ini adalah peningkatan rentang dinamis untuk pengukuran level dengan memilih diameter yang lebih besar. POF berdiameter hingga 2,5 mm tersedia secara komersial dengan rentang dinamis yang dapat ditingkatkan hingga 5 kali lipat. Sensor level POF ini juga dapat digunakan dengan probe referensi sebagai sensor titik sensitif. Sensor ini sangat cocok untuk beberapa aplikasi, seperti tangki penyimpanan air dan minyak bumi.

[Figure 6 about here.]

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Dana PNPB Universitas Negeri Medan Tahun Anggaran 2023 sesuai dengan Surat Keputusan Ketua LPPM UNIMED Nomor: 0138/UN33.8/KPT/PD/2023.

REFERENSI

- K. Loizou and E. Koutroulis, "Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system," *Measurement*, vol. 89, pp. 204–214, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>.
- H. H. P. Wu, C. W. Hung, S. H. Chang, and Z. H. Yang, "Analysis and Implementation of Noncontact Level Sensing for a Pressurized Cylinder," *J Sens*, vol. 2016, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/5027916>.
- P. Li, Y. Cai, X. Shen, S. Nabuzaale, J. Yin, and J. Li, "An accurate detection for dynamic liquid level based on MIMO ultrasonic transducer array," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 64, no. 3, pp. 582–595, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2357586>.
- B. Kumar, G. Rajita, and N. Mandal, "A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 47, no. 7. SAGE Publications Ltd, pp. 219–224, Sep. 08, 2014. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294014546943>.
- C. Mou, K. Zhou, Z. Yan, H. Fu, and L. Zhang, "Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating," *Opt Commun*, vol. 305, pp. 271–275, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.019>.
- J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, P. Likamwa, and D. A. May-Arrijoja, "Fiber-optic sensor for liquid level measurement," *Opt Lett*, vol. 36, no. 17, pp. 3425–3427, 2011, doi: <https://doi.org/10.1364/OL.36.003425>.
- X. Liang, G. Ren, Y. Li, Z. Liu, H. Wei, and S. Jian, "In-fiber liquid-level probe based on Michelson interferometer via dual-mode elliptical multilayer-core fiber," *J Mod Opt*, vol. 63, no. 13, pp. 1254–1259, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/09500340.2015.1137367>.
- Y. Dong, S. Xiao, H. Xiao, J. Liu, C. Sun, and S. Jian, "An optical liquid-level sensor based on d-shape fiber modal interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1067–1070, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2700623>.
- W. Lou, D. Chen, C. Shen, Y. Lu, H. Liu, and J. Wei, "An optical liquid level sensor based on core-offset fusion splicing method using polarization-maintaining fiber," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2016. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/680/1/012018>.
- L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, and R. Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, pp. 12184–12207, Sep. 2012. doi: <https://doi.org/10.3390/s120912184>.
- N. Jing, C. Teng, J. Zheng, G. Wang, Y. Chen, and Z. Wang, "A liquid level sensor based on a race-track helical plastic optical fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 1, pp. 158–160, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2630730>.
- H. Zhang et al., "Optical fiber liquid level sensor based on macro-bending coupling," *Optical Fiber Technology*, vol. 24, pp. 135–139, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.05.012>.
- J. Park, Y. J. Park, and J. D. Shin, "Plastic optical fiber sensor based on in-fiber microholes

for level measurement," Jpn J Appl Phys, vol. 54, no. 2, Feb. 2015, doi:
<https://doi.org/10.7567/JJAP.54.028002>.

- P. Antunes, J. Dias, T. Paixão, E. Mesquita, H. Varum, and P. André, "Liquid level gauge based in plastic optical fiber," Measurement (Lond), vol. 66, pp. 238-243, 2015, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.030>.
- F. Pérez-Ocón, M. Rubiño, J. M. Abril, P. Casanova, and J. A. Martínez, "Fiber-optic liquid-level continuous gauge," Sensors and Actuators, A: Physical, vol. 125, no. 2. pp. 124-132, Jan. 10, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.07.019>.
- E. Mesquita et al., "Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber," Sens Actuators A Phys, vol. 240, pp. 138-144, Apr. 2016, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.01.042>.

*Correspondent e-mail address

Peer reviewed under reponsibility of Universitas Negeri Medan, Indonesia

© 2023 Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, All right reserved, This is an open access article under the CC BY license(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Received: 2023-10-18

Accepted: 2023-10-24

Published: 2023-10-31

DAFTAR GAMBAR

Figure 1 . Probe Sensor Serat Optik Plastik

Figure 2 . Skema Blok Diagram Eksperimental Terdiri dari POF Berbentuk U

Figure 3 . Hubungan Respon Sensor antara Tegangan Output dan Level Air

Figure 4 . (a) Hubungan antara Tegangan yang Dinormalisasi, Level Air, dan Variasi Suhu 16°C, 25°C, 40°C, 60°C, dan 70°C; (b) Hubungan antara Suhu dan Sensitifitas 1,9 , 1,8 , 1,4 , dan 3,6 mV/mm Secara Berurutan

Figure 5 . Respon Sementara Sensor Selama Empat Jam, dengan Sensor Dinyalakan (on) selama 30 menit dan kemudian dimatikan (off) selama 30 menit berikutnya untuk Berbagai Level Air yang Berbeda

Figure 6 . AFM dari (a) Decladded POF; (b) Bare POF

References

1. K. Loizou and E. Koutroulis, "Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system," *Measurement*, vol. 89, pp. 204-214, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>.
2. H. H. P. Wu, C. W. Hung, S. H. Chang, and Z. H. Yang, "Analysis and Implementation of Noncontact Level Sensing for a Pressurized Cylinder," *J Sens*, vol. 2016, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/5027916>.
3. P. Li, Y. Cai, X. Shen, S. Nabuzaale, J. Yin, and J. Li, "An accurate detection for dynamic liquid level based on MIMO ultrasonic transducer array," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 64, no. 3, pp. 582-595, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2357586>.
4. B. Kumar, G. Rajita, and N. Mandal, "A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level," *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 47, no. 7. SAGE Publications Ltd, pp. 219-224, Sep. 08, 2014. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294014546943>.
5. C. Mou, K. Zhou, Z. Yan, H. Fu, and L. Zhang, "Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating," *Opt Commun*, vol. 305, pp. 271-275, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.019>.
6. J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, P. Likamwa, and D. A. May-Arrijoja, "Fiber-optic sensor for liquid level measurement," *Opt Lett*, vol. 36, no. 17, pp. 3425-3427, 2011, doi: <https://doi.org/10.1364/OL.36.003425>.
7. X. Liang, G. Ren, Y. Li, Z. Liu, H. Wei, and S. Jian, "In-fiber liquid-level probe based on Michelson interferometer via dual-mode elliptical multilayer-core fiber," *J Mod Opt*, vol. 63, no. 13, pp. 1254-1259, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/09500340.2015.1137367>.
8. Y. Dong, S. Xiao, H. Xiao, J. Liu, C. Sun, and S. Jian, "An optical liquid-level sensor based on d-shape fiber modal interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1067-1070, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2700623>.
9. W. Lou, D. Chen, C. Shen, Y. Lu, H. Liu, and J. Wei, "An optical liquid level sensor based on core-offset fusion splicing method using polarization-maintaining fiber," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2016. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/680/1/012018>.
10. L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, and R. Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 12, no. 9. pp. 12184-12207, Sep. 2012. doi: <https://doi.org/10.3390/s120912184>.
11. N. Jing, C. Teng, J. Zheng, G. Wang, Y. Chen, and Z. Wang, "A liquid level sensor based on a race-track helical plastic optical fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 1, pp. 158-160, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2630730>.
12. H. Zhang et al., "Optical fiber liquid level sensor based on macro-bending coupling," *Optical Fiber Technology*, vol. 24, pp. 135-139, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.05.012>.
13. J. Park, Y. J. Park, and J. D. Shin, "Plastic optical fiber sensor based on in-fiber microholes for level measurement," *Jpn J Appl Phys*, vol. 54, no. 2, Feb. 2015, doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.028002>.
14. P. Antunes, J. Dias, T. Paixão, E. Mesquita, H. Varum, and P. André, "Liquid level gauge based in plastic optical fiber," *Measurement (Lond)*, vol. 66, pp. 238-243, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.030>.
15. F. Pérez-Ocón, M. Rubiño, J. M. Abril, P. Casanova, and J. A. Martínez, "Fiber-optic liquid-level continuous gauge," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 125, no. 2. pp. 124-132, Jan. 10, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.07.019>.
16. E. Mesquita et al., "Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber," *Sens Actuators A Phys*, vol. 240, pp. 138-144, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.01.042>.