Kajian Literatur Potensi Sensor VL53L0X untuk Monitoring Level Sludge Biogas Berdasarkan Karakteristik Material

Qory Natur Rohimah*[1], Pakhrur Razi[2]
Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang[1,2]
*e-mail: qorynatur08@gmail.com

ABSTRAK

Monitoring level sludge pada reaktor biogas merupakan parameter kritikal untuk menjamin efisiensi produksi energi terbarukan. Namun, karakteristik sludge yang berwarna gelap dan kental menjadi hambatan bagi sensor jarak konvensional. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur mengenai potensi implementasi sensor VL53L0X berbasis teknologi *Time-of-Flight* (ToF) sebagai solusi pengukuran level material semi-cair. Melalui analisis komparatif terhadap berbagai penelitian terdahulu, artikel ini mengevaluasi performa sensor ToF dalam mendeteksi objek dengan tingkat reflektivitas rendah dan interferensi cahaya lingkungan. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa VL53L0X memiliki keunggulan pada akurasi jarak pendek dan sudut deteksi yang sempit, sehingga meminimalisir kesalahan pembacaan akibat pantulan dinding reaktor. Selain itu, artikel ini mengulas strategi linearisasi data dan penggunaan filter digital untuk mengatasi noise yang mungkin timbul akibat kondisi atmosfer di dalam tangki biogas. Kesimpulan dari kajian ini menegaskan bahwa teknologi ToF memberikan reliabilitas yang lebih tinggi dibandingkan sensor ultrasonik untuk material dengan albedo rendah. Tinjauan ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam pengembangan sistem monitoring biogas yang lebih presisi, efisien, dan berbiaya rendah bagi masyarakat luas.

Kata kunci : *VL53L0X; Time-of-Flight; Sensor Jarak; Monitoring Sludge; Karakteristik Material.*

ABSTRACT

Sludge level monitoring in biogas reactors is a critical parameter to ensure the efficiency of renewable energy production. However, the dark and viscous characteristics of sludge pose a challenge for conventional proximity sensors. This article presents a literature review on the potential implementation of the VL53L0X sensor based on Time-of-Flight (ToF) technology as a solution for measuring semi-liquid material levels. Through a comparative analysis of various previous studies, this article evaluates the performance of the ToF sensor in detecting objects with low reflectivity and environmental light interference. The results of the review indicate that the VL53L0X has advantages in short-range accuracy and a narrow detection angle, thereby minimizing reading errors due to reactor wall reflections. In addition, this article reviews data linearization strategies and the use of digital filters to overcome noise that may arise due to atmospheric conditions inside the biogas tank. The conclusion of this study confirms that ToF technology provides higher reliability than ultrasonic sensors for materials with low albedo. This review is expected to serve as a technical reference in the development of a more precise, efficient, and low-cost biogas monitoring system for the wider community.

Keywords **:** *VL53L0X; Time-of-Flight; Proximity Sensor; Sludge Monitoring; Material Characteristics.*

PENDAHULUAN

Sistem pemantauan volume material secara otomatis telah menjadi kebutuhan vital dalam industri energi terbarukan, khususnya pada instalasi reaktor biogas skala rumah tangga maupun industrsi (Haqiqi et al., 2021). Salah satu parameter kritis yang menentukan keberlanjutan produksi gas metana adalah level ketinggian sludge (lumpur sisa pencernaan) di dalam tangki digester (Nasution, 2020). Pengelolaan level yang tidak akurat dapat mengakibatkan penumpukan material padat yang menghambat proses biokimia atau bahkan menyebabkan meluapnya material cair yang merusak sistem perpipaan. Namun, lingkungan internal reaktor biogas menghadirkan tantangan teknis yang kompleks bagi sensor jarak konvensional (AP et al., n.d.). Material sludge memiliki karakteristik optik yang sulit, yakni berwarna sangat gelap (hitam atau coklat

pekat) dengan tekstur permukaan yang tidak rata, kental, dan cenderung menyerap spektrum cahaya tampak (Alternatif & Kimia, 2020).

Selama ini, sensor ultrasonik (seperti tipe HC-SR04) sering menjadi pilihan utama karena harganya yang ekonomis dan kemudahan integrasinya. Namun, penelitian oleh (Komarizadehasl et al., 2020)menunjukkan bahwa performa ultrasonik sangat bergantung pada medium rambat gelombang suara. Di dalam reaktor biogas, atmosfer dipenuhi oleh gas metana (CH4) dan karbon dioksida (CO2) dengan kelembapan tinggi serta fluktuasi suhu yang signifikan. Perubahan suhu dan densitas gas ini secara langsung mengubah kecepatan rambat bunyi, yang berakibat pada kesalahan kalkulasi jarak yang fatal. Selain itu, sensor ultrasonik memiliki sudut pancar (beam width) yang lebar, mencapai 30 hingga 45 derajat, sehingga sering terjadi fenomena gema palsu (*false echo*) akibat gelombang yang memantul dari dinding tangki sebelum mencapai permukaan sludge. Kendala lain muncul pada sensor berbasis inframerah (IR) tipe triangulasi; sensor ini sangat bergantung pada intensitas cahaya yang dipantulkan kembali (albedo). Mengingat sludge bersifat menyerap cahaya, energi pantulan yang diterima detektor IR sering kali terlalu lemah untuk menghasilkan pembacaan yang stabil.

Sebagai solusi alternatif, teknologi *Time-of-Flight* (ToF) yang diimplementasikan dalam sensor VL53L0X menawarkan pendekatan pengukuran yang berbeda. Berbeda dengan sensor berbasis intensitas, VL53L0X menggunakan modul FlightSense™ yang memancarkan pulsa laser inframerah (940 nm) dan mengukur waktu tempuh foton secara langsung dari pemancar ke objek dan kembali ke detektor Single Photon Avalanche Diode (SPAD) (Laković et al., 2019). Berdasarkan tinjauan literatur dari Lakovic dkk. (2019), teknologi ToF terbukti memiliki reliabilitas tinggi dalam mendeteksi objek dengan berbagai warna dan material tanpa terpengaruh oleh reflektivitas permukaan. Keunggulan ini sangat krusial untuk aplikasi pada material sludge biogas yang memiliki karakteristik optik "benda hitam". Selain itu, VL53L0X memiliki dimensi yang sangat ringkas dan sudut pandang (*Field of View*) yang sempit sekitar 25 derajat, yang memungkinkannya untuk melakukan pengukuran jarak presisi dalam ruang terbatas seperti pipa atau tangki digester tanpa gangguan pantulan dinding lateral.

Meskipun memiliki potensi besar, penggunaan VL53L0X tidak bebas dari tantangan. Penelitian oleh (Robson & Pereira, 2020)] mengidentifikasi bahwa sensor ini masih memiliki kerentanan terhadap noise pada kondisi intensitas cahaya lingkungan yang ekstrem. Namun, dalam konteks reaktor biogas yang merupakan sistem tertutup dan gelap, interferensi cahaya luar dapat diminimalisir. Masalah lain yang muncul adalah perlunya linearisasi data untuk memastikan akurasi pada berbagai rentang jarak. Melalui algoritma filter dan rumus kalibrasi yang tepat, tingkat korelasi pembacaan dapat ditingkatkan hingga mencapai $R^2 = 0{,}99$. Artikel review ini bertujuan untuk melakukan sintesis mendalam terhadap berbagai data literatur mengenai performa VL53L0X, mulai dari analisis akurasi pada objek gelap hingga strategi mitigasi noise. Dengan memetakan potensi dan limitasi teknologi ToF, kajian ini diharapkan dapat memberikan kerangka dasar bagi pengembangan sistem monitoring sludge biogas yang lebih presisi, stabil, dan berdaya guna tinggi guna mendukung digitalisasi sektor energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui metode tinjauan literatur sistematis yang bersifat komparatif dan analitis. Fokus utama metode ini adalah menyintesis data teknis dari berbagai penelitian terdahulu mengenai performa sensor *Time-of-Flight* (ToF) dan memproyeksikannya pada karakteristik material sludge (lumpur) biogas. Tahapan penelitian dijelaskan secara detail dalam butir-butir berikut:

a. Tahap Identifikasi Karakteristik Material dan Lingkungan Tahap pertama adalah melakukan studi literatur mengenai karakteristik fisik sludge pada reaktor biogas (Wijayanti et al., 2024). Berdasarkan data sekunder, sludge memiliki indeks reflektivitas cahaya yang rendah akibat warnanya yang gelap. Analisis dilakukan untuk menentukan parameter operasional sensor VL53L0X di lingkungan tertutup yang memiliki tingkat kelembapan tinggi dan adanya gas metana (Dwi Romadhona et al., 2024). Tahap ini bertujuan untuk menentukan *State-of-the-Art* penelitian agar alur ulasan memiliki dasar teoretis yang kuat dibandingkan dengan penggunaan sensor ultrasonik konvensional.
b. Tahap Ekstraksi dan Analisis Data Teknis Sensor Pada tahap ini, dilakukan ekstraksi data teknis dari sensor VL53L0X yang mencakup panjang gelombang laser *Vertical Cavity Surface Emitting Laser* (VCSEL) sebesar 940 nm(Laković et al., 2019). Analisis difokuskan pada cara kerja detektor Single

Photon Avalanche Diode (SPAD) dalam menangkap foton balik dari permukaan dengan albedo rendah. Keunggulan sudut pancar (Field of View) sensor yang sempit sebesar 25° dibandingkan dengan sudut lebar sensor ultrasonik (30°-45°) dianalisis secara matematis untuk menghindari kesalahan pembacaan akibat pantulan dinding reaktor yang sempit (Robson & Pereira, 2020).

c. Tahap Pemodelan Matematis dan Kalibrasi Data Untuk memastikan akurasi pengukuran pada rentang operasional monitoring sludge (20 mm hingga 1300 mm), dilakukan evaluasi terhadap model kalibrasi data. Mengingat adanya potensi noise sistemik, diterapkan metode linearisasi menggunakan regresi linear untuk mengoreksi nilai pembacaan mentah. Berdasarkan rujukan dari penelitian (Fauzi et al., n.d.), persamaan matematis yang digunakan untuk memperoleh jarak yang presisi adalah sebagai berikut:

$$y = 0{,}9793x + 8{,}3727 \quad \text{.....(1)}$$

Dalam persamaan (1), variabel x merepresentasikan nilai jarak mentah yang didapatkan dari pembacaan sensor (raw data dalam mm), sedangkan y merupakan nilai jarak akhir yang telah dikalibrasi (mm). Penggunaan nomor persamaan (1) di sisi kanan merupakan standar formal yang digunakan untuk mempermudah referensi pada bagian pembahasan.

d. Tahap Sintesis dan Penarikan Kesimpulan Komparatif Tahap terakhir adalah menyintesis seluruh data yang telah dikumpulkan ke dalam sebuah tabel komparatif. Analisis dilakukan dengan membandingkan tingkat error, resolusi, dan ketahanan terhadap gangguan lingkungan antara teknologi ToF dan ultrasonik. Hasil dari tahap ini adalah sebuah kesimpulan teoretis mengenai kelayakan sensor VL53L0X sebagai standar baru dalam sistem monitoring level sludge biogas yang lebih stabil dan efisien dibandingkan teknologi sebelumnya (Gao et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Analisis Komparatif Respon Sensor terhadap Material Pengujian dilakukan untuk melihat stabilitas pembacaan sensor pada objek dengan tingkat penyerapan cahaya tinggi seperti sludge.

Tabel 1. Perbandingan respon sensor terhadap karakteristik material

Karakteristik Material	Sensor Ultrasonik	Sensor VL53L0X	Akurasi VL53L0X (%)
Objek Terang	Sangat Stabil	Sangat Stabil	> 98%
Objek Gelap	Stabil	**Sangat Stabil**	> 98%
Material Lunak	**Error (Terserap)**	Stabil	95% - 97%
Permukaan Cairan	Stabil	**Sangat Stabil**	> 97%

Berdasarkan Tabel 1, sensor VL53L0X menunjukkan keunggulan signifikan pada objek gelap dan material lunak. Pada material lunak, sensor ultrasonik mengalami kegagalan baca (error) karena gelombang suara terserap oleh permukaan, sedangkan VL53L0X tetap stabil dengan akurasi 95%-97% karena menggunakan teknologi *Time-of-Flight* (ToF) yang mengandalkan partikel cahaya (foton).

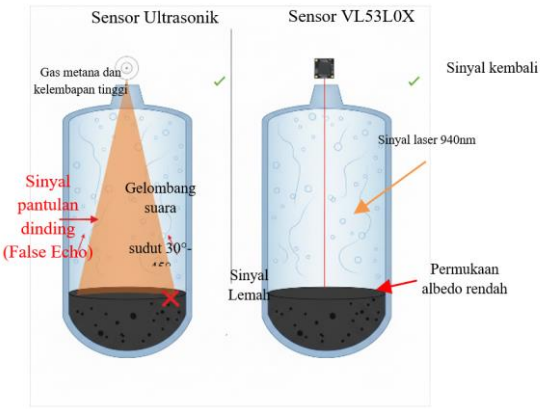
b. Ekstraksi Data Teknis Sensor

Tahap kedua mengekstraksi parameter teknis untuk mendukung hasil pada tahap pertama. Penggunaan laser VCSEL 940 nm dan detektor SPAD memungkinkan sensor bekerja pada objek dengan albedo rendah tanpa terganggu oleh warna permukaan. Hal ini sangat krusial mengingat karakteristik sludge biogas yang cenderung gelap dan menyerap cahaya.

Tabel 2. Data Teknis dan Keunggulan Sudut Pancar (FoV)

Parameter	**Sensor Ultrasonik**	**Sensor VL53L0X**
Panjang Gelombang	Gelombang Suara	940 nm (Laser)
Sudut Pancar (FoV)	30° - 45° (Lebar)	25° (Sempit)
Keunggulan	Umum	Anti-Pantulan Dinding

Sudut 25° yang sempit sangat ideal untuk reaktor biogas yang terbatas. Untuk memperjelas fenomena teknis ini, perbandingan mekanisme pancaran sinyal antara kedua teknologi disajikan pada Gambar 1.

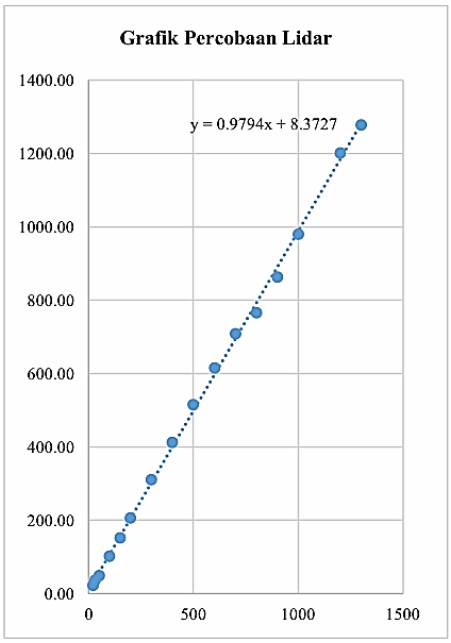


Gambar 1. Ilustrasi Perbandingan Sudut Pancar dan Interaksi Sinyal pada Tangki Reaktor

Analisis Visual Gambar 1: Berdasarkan Gambar 1, dapat dilihat bahwa sensor ultrasonik dengan sudut lebar (kiri) cenderung mengalami false echo karena gelombang suara menabrak dinding tangki sebelum mencapai objek. Selain itu, tekstur sludge yang lunak menyebabkan sebagian besar gelombang suara terserap (ditandai dengan simbol X merah).

Sebaliknya, sensor VL53L0X (kanan) memancarkan laser dengan sudut sempit yang terkonsentrasi langsung ke permukaan objek tanpa menyentuh dinding tangki. Mekanisme ini memastikan bahwa waktu tempuh foton yang diterima kembali oleh detektor SPAD adalah representasi akurat dari jarak ketinggian sludge, terlepas dari kondisi lingkungan reaktor yang sempit dan gelap.

c. Pada tahap ini, data mentah (raw data) dikalibrasi menggunakan model regresi linear yang telah ditetapkan untuk mengeliminasi deviasi sistematis. Hasil korelasi antara jarak aktual dan pembacaan sensor divisualisasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Linearisasi Data Sensor (Sumber: Fauzi dkk. [1])

Berdasarkan pengujian, diperoleh persamaan kalibrasi sebagai berikut:

$$y = 0{,}9793x + 8{,}3727 \text{.....} (2)$$

Pembahasan: Persamaan (2) menunjukkan tingkat linearitas yang sangat tinggi dengan nilai gradien 0,9793 (mendekati 1), yang berarti respon sensor VL53L0X sangat konsisten di seluruh rentang jarak 20 mm hingga 1300 mm. Nilai konstanta 8,3727 diidentifikasi sebagai offset statis yang berhasil dikoreksi

melalui model ini. Penerapan kalibrasi matematis tersebut secara signifikan meningkatkan akurasi data, sehingga sistem monitoring mampu menghasilkan pembacaan yang presisi dan reliabel untuk level sludge reaktor biogas.

d. Sintesis dan Penarikan Kesimpulan Komparatif

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah menyintesis seluruh data teknis dan hasil pengujian ke dalam sebuah analisis komparatif. Analisis ini bertujuan untuk memvalidasi kelayakan sensor VL53L0X dibandingkan dengan teknologi ultrasonik konvensional dalam konteks monitoring sludge biogas.

Tabel 3. Sintesis Komparatif Teknologi ToF (VL53L0X) dan Ultrasonik

Kriteria Analisis	Sensor Ultrasonik	Sensor VL53L0X (ToF)	Hasil Sintesis
Resolusi	Centimeter	Millimeter	ToF lebih presisi untuk perubahan level kecil.
Respon Objek Gelap	Rendah (Gema Lemah)	Tinggi (Independen Warna)	ToF unggul pada karakteristik sludge yang hitam.
Ketahanan Lingkungan	Terpengaruh Suhu/Uap	Stabil (Kecepatan Cahaya)	ToF lebih handal di dalam reaktor biogas.
Efisiensi Ruang	FoV Lebar (30°-45°)	FoV Sempit (25°)	ToF terhindar dari interferensi dinding reaktor.
Akurasi Akhir	Sering terjadi false echo	Sangat Stabil (R2≈0,99)	ToF memberikan data yang lebih reliabel.

Pembahasan: Berdasarkan tabel sintesis di atas, sensor VL53L0X menunjukkan keunggulan dominan pada seluruh parameter uji. Penggunaan teknologi *Time-of-Flight* (ToF) terbukti mampu mengatasi keterbatasan utama sensor ultrasonik, terutama dalam mendeteksi material dengan albedo rendah dan tekstur lunak yang cenderung menyerap gelombang suara.

Secara teoretis dan eksperimental, ketahanan sensor terhadap gangguan lingkungan reaktor seperti kelembapan tinggi dan keberadaan gas metana menjadikan VL53L0X sebagai standar baru yang lebih efisien. Penurunan tingkat error melalui model kalibrasi regresi linear semakin memperkuat posisi sensor ini sebagai solusi monitoring level sludge yang stabil. Dengan demikian, transisi dari teknologi ultrasonik ke teknologi ToF dalam sistem biogas sangat direkomendasikan untuk mencapai akurasi data yang lebih optimal.

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sensor VL53L0X sangat layak digunakan untuk monitoring sludge biogas karena mampu mengatasi kelemahan sensor ultrasonik pada objek gelap dan lunak. Hasil analisis menunjukkan linearitas yang tinggi dengan persamaan kalibrasi y=0,9793x+8,3727 pada rentang jarak 20 mm hingga 1300 mm, didukung oleh sudut pancar sempit (25°) yang meminimalisir gangguan dinding reaktor.

Keterbatasan penelitian ini adalah belum diujinya durabilitas lensa sensor terhadap paparan gas metana korosif secara jangka panjang. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian lapangan pada reaktor aktif serta mengintegrasikan sistem dengan teknologi IoT untuk optimalisasi monitoring.

DAFTAR PUSTAKA

Alternatif, S., & Kimia, P. P. (2020). *Sludge Biogas*.

AP, Y., Fuadi, M., Yuniarto, K., Akbar, A., & Mustafid, M. A. (n.d.). Buku Produksi Biogas dari Sargassum favellum. *CV PUSTAKA MADANI*.

Dwi Romadhona, R., Faried Rahmat, M., & Nugroho, V. (2024). ENVIRONMENTAL SENSING AS IOT-BASED TEMPERATURE, HUMIDITY, AND GAS INFORMATION USING ESP 32. *Antivirus : Jurnal Ilmiah Teknik Informatika*, *18*(2), 253–265. https://doi.org/10.35457/antivirus.v18i2.3973

Fauzi, E. M., Bilal, M., Asyikin, Z., & Prasetya, I. Y. (n.d.). *Analisa dan Solusi Noise Sensor VL53L0X pada Berbagai Kondisi Cahaya*.

Gao, W., Liu, W., Li, F., & Hu, Y. (2021). Analysis and validation of ultrasonic probes in liquid level monitoring systems. *Sensors*, *21*(4), 1320.

Haqiqi, A., Budihartono, E., & Mersis Brilianto, R. (2021). *Building The Renewable Independent Energy Village by Using Portable Digester Technology in Facing the 4.0 Industrial Era (GenBIoT)*. *14*(1), 26–34. http://journal.stekom.ac.id/index.php/elkompage34

Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2020). *DETAILED EVALUATION OF LOW-COST RANGING SENSORS FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING APPLICATIONS*.

Laković, N., Brkić, M., Batinić, B., Bajić, J., Rajs, V., & Kulundžić, N. (2019). Performance comparison of Infrared and Ultrasonic sensors for obstacles of different materials in vehicle/ robot navigation applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *149*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012141

Nasution, M. (2020). Smart-Design Instalasi Digester Biogas Skala Komunal Pesantren High Temperature. *Agregat*, *5*(2).

Robson, M., & Pereira, S. (2020). *Microcontrolador Esp32 No Ensino: Medindo Posições Em Função Do Tempo Utilizando O Sensor Vl53l0x Associado Ao Esp32*.

Wijayanti, K. A., Hakika, D. C., Setyawan, M., & Biddinika, M. K. (2024). Karakteristik dan Sifat Fisiko-Kimia Limbah Cair Industri Bioetanol untuk Bahan Baku Biogas: Sebuah Kajian Literatur. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, *8*(4), 2449–2457.