VENN: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences
ISSN: 2964-867X
Journal Homepage: https://pustaka.my.id/journals/venn/index

Karakterisasi Sistem Deteksi Waktu Alir Cairan Berbasis Sensor *Fotointerruptor* pada *Viscometer Ostwald*

Fatinah Afifah[1], Mona Berlian Sari[2]

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia[1,2]
fatinahafifah18@gmail.com[1], monaberliansari@fmipa.unp.ac.id[2]

Corresponding Author: Fatinah Afifah, E-mail: fatinahafifah18@gmail.com

Article Information
Received : 20 Oktober 2026
Reviced : 24 Oktober 2026
Accepted : 29 Oktober 2026
Published : 29 Oktober 2026

ABSTRACT
Automated Ostwald viscometers relying on static optical sensors frequently experience missed or false triggers due to voltage baseline drift caused by fluid turbidity, wall fouling, or micro-bubbles. This study presents a discrete differential algorithm (dV/dt) integrated with an exponential moving average (EMA) filter and adaptive baseline tracking on a low-cost photointerrupter setup. The phototransistor signal is digitized via an external 16-bit ADS1115 ADC ($\Delta t \geq 20$ ms). The differential threshold is set at $|\ m_{\text{th}}\ | = 0.150$ V/s, established from a five-sigma ($5\sigma = 0.136$ V/s) margin above the instrument's baseline noise ($\sigma_{\text{noise}} = 0.0272$ V/s, peak 0.090 V/s), combined with a 6 mVvoltage step and a 3-sample (60 ms) debounce confirmation. Dynamic flow tests at 28.0 ± 0.5 °C recorded mean efflux times of 0.087 ± 0.010 s (CV = 11.5%) for 7 cycles of distilled water, 0.215 ± 0.025 s (CV = 11.6%) for 5 cycles of 30% glycerin, and 0.321 ± 0.024 s (CV = 7.5%) for 18 consecutive cycles of 2% bovine gelatin. The measured glycerin-to-water efflux time ratio (2.48) agreed with the theoretical kinematic viscosity ratio (2.42) derived from Hagen-Poiseuille law. Comparative benchmarking across 29 raw recorded cycles demonstrated that the proposed algorithm achieved an 89.7% valid trigger rate (26/29), whereas a conventional fixed-threshold comparator without recalibration yielded only 24.1% (7/29). The algorithm successfully filtered micro-bubble anomalies and maintained timing repeatability despite progressive baseline drift from gelatin wall residues, eliminating manual sensitivity recalibration.

KEYWORDS
Viscometer Ostwald, Fluid meniscus, Photointerruptor, Dynamic differential

ARTICLE DOI:
https://doi.org/10.53696/venn.v5i5.687

How to Cite: Afifah, F., & Sari, M. B. (2026). Karakterisasi Sistem Deteksi Waktu Alir Cairan Berbasis Sensor Fotointerruptor pada Viscometer Ostwald. Venn: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences, 5(5), 1289–1303. https://doi.org/10.53696/venn.v5i5.687

A. Pendahuluan

Pengukuran viskositas merupakan prosedur wajib dalam karakterisasi kualitas cairan (Pham et al., 2018). Aplikasinya turut mencakup ranah klinis, seperti pemeriksaan viskositas plasma darah *point-of-care* (Bakhtiaridoost et al., 2024). Di lingkungan laboratorium, viskometer kapiler tipe Ostwald sering digunakan karena konstruksinya sederhana. Namun, pengukuran viskometer Ostwald secara konvensional masih mengandalkan pengamatan visual pengamat dibantu alat ukur waktu manual (*stopwatch*). Pendekatan manual ini rawan terhadap *human error*, mengingat setiap operator memiliki

Copyright: © 2026 the Author(s). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

waktu reaksi visual yang berbeda saat mengamati batas aliran meniskus (BinHajeb et al., 2025; Saxena & Kumar, 2021).

Berbagai upaya otomatisasi pewaktuan viskometer telah dilaporkan dengan prinsip deteksi yang berbeda. Saxena & Kumar (2021) memasang sensor level kawat platina pada viskometer Ostwald untuk cairan konduktif, BinHajeb dkk. (2025) memakai kamera dan pengolahan citra untuk mendeteksi meniskus pada viskometer kapiler kinematik, sedangkan Bakhtiaridoost dkk. (2024) memakai pasangan sensor inframerah dan memicu pewaktu dari perubahan tegangan fotodioda. Sensor inframerah juga dipakai sebagai detektor waktu pada viskometer bola jatuh (Habiburrohman & Fauzi, 2020) dan otomatisasi berbasis mikrokontroler dilaporkan pada viskometer digital (Yasin, 2023) serta viskometer rotasi (Firmansyah & Sucahyo, 2019). Pada detektor optik, pemicuan umumnya ditentukan oleh satu nilai ambang intensitas atau tegangan.

Sensor optik level cairan memanfaatkan perbedaan pembiasan dan transmisi cahaya antara udara dan cairan (Nie dkk., 2019; Moreno dkk., 2022). Namun, transmitansi, indeks bias, dan hamburan cahaya juga berbeda antarcairan (Bello & Merlo, 2020; Obeidat dkk., 2023), termasuk absorpsi inframerah-dekat larutan berair yang bergantung pada komposisinya (Fomina dkk., 2022). Akibatnya, tegangan dasar (*baseline*) pada gerbang yang sama bergeser ketika sampel diganti. Gelembung yang melintasi berkas juga menghasilkan sinyal transien akibat hamburan (Bello dkk., 2023), dan deteksi palsu level cairan diakui sebagai masalah pada viskometer otomatis (Liu dkk., 2024). Ambang tetap yang dikalibrasi pada satu cairan karena itu dapat gagal terpicu (*missed trigger*) atau terpicu palsu (*false trigger*) pada cairan lain, sehingga operator harus mengkalibrasi ulang sensor setiap kali sampel diganti.

Turunan sinyal terhadap waktu menawarkan jalan keluar karena komponen yang berubah lambat, seperti pergeseran *baseline*, hampir hilang setelah diferensiasi; prinsip ini telah dipakai untuk deteksi kejadian waktu-nyata dan lebih tahan terhadap *drift* dibanding ambang amplitudo (Wurts dkk., 2025). Namun, diferensiasi numerik juga memperkuat derau, sehingga pemicu gradien murni rentan terhadap fluktuasi cepat yang bukan berasal dari meniskus. Sejauh penelusuran kami, belum ada laporan yang mengkarakterisasi derau, margin ambang, dan keandalan pemicu berbasis gradien dengan *baseline* yang diukur ulang pada setiap siklus, lalu membandingkannya langsung dengan komparator tegangan tetap pada data yang sama untuk beberapa cairan pada viskometer Ostwald berbiaya rendah.

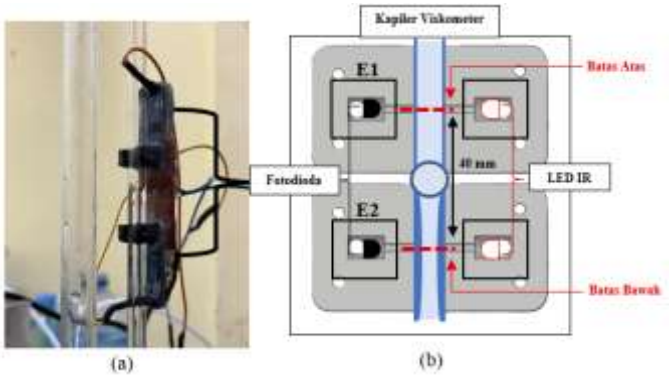
Penelitian ini bertujuan (1) mengkarakterisasi respons statis dan dinamis dua gerbang *photointerrupter* pada viskometer Ostwald, termasuk derau dan margin ambang pemicuan; (2) membandingkan secara *offline*, pada rekaman mentah yang sama, aturan pemicuan firmware (gradien tertapis dengan verifikasi level terhadap *baseline* per siklus) dengan komparator tegangan tetap dan pemicu gradien tanpa tapis untuk akuades, gliserin 30%, dan larutan gelatin; serta (3) mengevaluasi keterulangan waktu transit meniskus dan kesesuaiannya dengan rasio viskositas kinematik acuan.

B. Metode Penelitian

1. Desain dan Konfigurasi Perangkat Keras

Viskometer Ostwald kaca borosilikat standar dengan kapiler berdiameter dalam 1 mm dilengkapi dudukan sensor yang menjepit dua *photointerrupter* ITR9608 pada lengan kapiler. Gerbang atas (E1) dan gerbang bawah (E2) berjarak d = 40 mm dapat ditinjau pada Gambar 1. Pusat gerbang atas (E1) dan bawah (E2) berjarak vertikal pendek d = 40 mm, dengan volume ruang ukur efektif antar-gerbang sekitar 0,12 mL. Setiap gerbang terdiri atas LED inframerah (λ = 940 nm) dan fototransistor silikon diskrit yang berhadapan melalui celah kolimasi mendatar selebar 1,0 mm. Fototransistor dirangkai dalam konfigurasi common-emitter dengan resistor pull-up 10 kΩ, sehingga

tegangan keluaran analog naik ketika intensitas cahaya yang diterima turun. LED inframerah dicatu pada arus 9,55 mA melalui resistor pembatas 150 Ω dari tegangan sumber 3,3 V. Pompa vakum 12 V DC bertugas menghisap sampel cairan melewati batas gerbang E1, pada akhir fase hisap saluran dibuka ke atmosfer sehingga cairan mengalir turun di bawah pengaruh gravitasi.

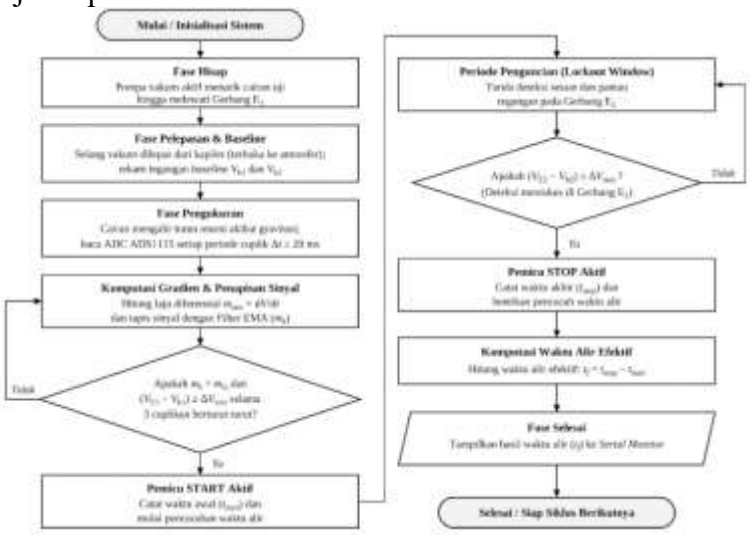


Gambar 1. Konfigurasi perangkat keras: (a) Desain dudukan sensor, (b) Penampang melintang posisi emitor inframerah dan fotodiode terhadap sumbu tabung kapiler.

Keluaran analog kedua gerbang dibaca oleh ADC eksternal 16-bit ADS1115 melalui antarmuka I2C (400 kHz), ADC internal mikrokontroler tidak digunakan. ADS1115 bekerja dalam mode *single-shot* pada 860 SPS dengan PGA ±4,096 V (resolusi 125 µV); E1 dihubungkan ke kanal AIN3 dan E2 ke AIN2, dan keduanya dibaca berurutan pada setiap putaran program. Mikrokontroler ESP32 mengendalikan pompa vakum mini. Selama fase hisap, penetapan *baseline*, dan ukur, nilai Volt_E1, Slope_E1, Volt_E2, dan Slope_E2 dikirim melalui serial 115200 bps setiap ≥ 20 ms (50 Hz nominal) tanpa stempel waktu, rekaman inilah yang dianalisis ulang pada penelitian ini.

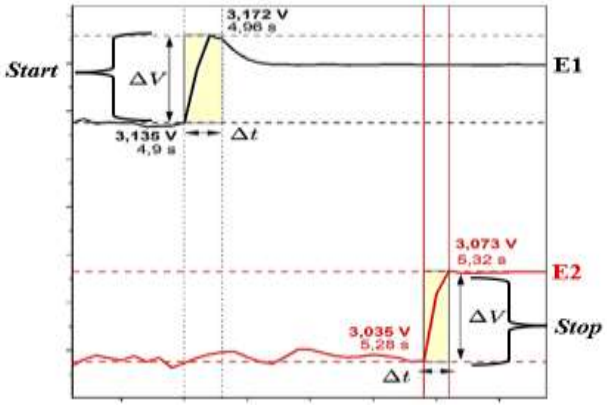
2. Algoritma Pemicuan dan Mesin Status

Penerapan algoritma pada instrumen mengevaluasi dinamika sinyal optik secara digital melalui antarmuka mikrokontroler dengan pembacaan berkala dari ADC eksternal 16-bit ADS1115. Alur kerja operasional instrumen dikendalikan oleh logika mesin status (*finite state machine*, FSM) empat fase sekuensial yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir (*flowchart*) logika mesin status (*state machine*) dan algoritma deteksi diferensial waktu alir cairan.

Ketika meniskus fluida bergerak melintasi gerbang optik pada fase pengukuran, perbedaan indeks bias antara udara dan cairan membiaskan pendaran inframerah sehingga intensitas berkas yang mencapai fototransistor berubah drastis. Pendekatan deteksi berbasis laju turunan (*derivative-based*) ini mengadaptasi prinsip pemrosesan sinyal transien untuk mengenali fenomena perlintasan fasa secara adaptif (Liu dkk., 2024; Wurts dkk., 2025). Fenomena transisi tegangan dan ekstraksi gradien diferensial ini divisualisasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema kurva transien tegangan fototransistor $V(t)$dan ekstraksi gradien laju perubahan dV/dtsaat meniskus melintasi gerbang sensor.

Selama fase pengukuran, mikrokontroler menghitung laju perubahan tegangan atau gradien diferensial dinamis (dV/dt) menggunakan kalkulasi diskrit beda-maju pada Persamaan (1):

$$m_{\text{raw}} = \frac{dV}{dt} = \frac{V_t - V_{t-1}}{\Delta t} \tag{1}$$

Dalam Persamaan (1), m_{raw} adalah gradien diferensial mentah (V/s), V_t adalah tegangan fototransistor pada cuplikan saat ini (V), V_{t-1} adalah tegangan pada cuplikan sebelumnya (V), dan Δtadalah interval waktu antar-cuplikan sebesar ≥ 20 ms (ekuivalen dengan frekuensi cuplikan nominal ≈ 50 Hz). Untuk mereduksi derau kuantisasi ADC dan fluktuasi kelistrikan frekuensi tinggi tanpa memperkenalkan jeda fase (*phase lag*) yang signifikan, nilai gradien mentah ditapis secara *real-time* menggunakan tapis rata-rata bergerak eksponensial (*exponential moving average*, EMA) orde-satu (Wurts dkk., 2025) pada Persamaan (2)

$$m_k = 0{,}35 \cdot m_{\text{raw}} + 0{,}65 \cdot m_{k-1} \tag{2}$$

di mana $m_k$adalah nilai gradien terfilter pada indeks cuplikan ke-k, dan m_{k-1}adalah gradien terfilter pada cuplikan sebelumnya. Pencacahan waktu alir (t_{start}) di gerbang atas E1 dipicu saat sinyal memenuhi kriteria ambang batas turunan dan perubahan tegangan relatif terhadap baseline terisi V_{b1}, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (3):

$$t_{\text{start}} = t_{k_s}, \quad k_s = \min\{k : m_k > m_{\text{th}} \text{ dan } (V_{\text{E1},k} - V_{b1}) \geq \Delta V_{\text{min}}\} \tag{3}$$

dengan nilai ambang gradien $m_{\text{th}} = +0{,}04$ V/s dan ambang simpangan tegangan minimum $\Delta V_{\text{min}} = 6$ mV. Untuk mencegah pemicuan prematur akibat lonjakan transien acak, kondisi pada Persamaan (3) agar bertahan stabil dilakukan selama $N = 3$ cuplikan berturut-turut (≈ 60 ms) sebagai kriteria *debounce* perangkat lunak. Setelah gerbang E1 terpicu, sistem mengaktifkan periode penguncian sebelum mengevaluasi kondisi henti di gerbang E2. Pencacahan waktu dihentikan (t_{stop}) saat meniskus melintasi gerbang bawah E2 berdasarkan kondisi pemicuan pada Persamaan (4):

$$t_{\text{stop}} = t_{k_e}, \quad k_e = \min\{k > k_s : (V_{\text{E2},k} - V_{b2}) \geq \Delta V_{\min}\} \tag{4}$$

Waktu alir efektif meniskus antar-gerbang (t_f) kemudian diekstraksi secara langsung melalui Persamaan (5):

$$t_f = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}} \tag{5}$$

3. Sampel dan Prosedur Penelitian

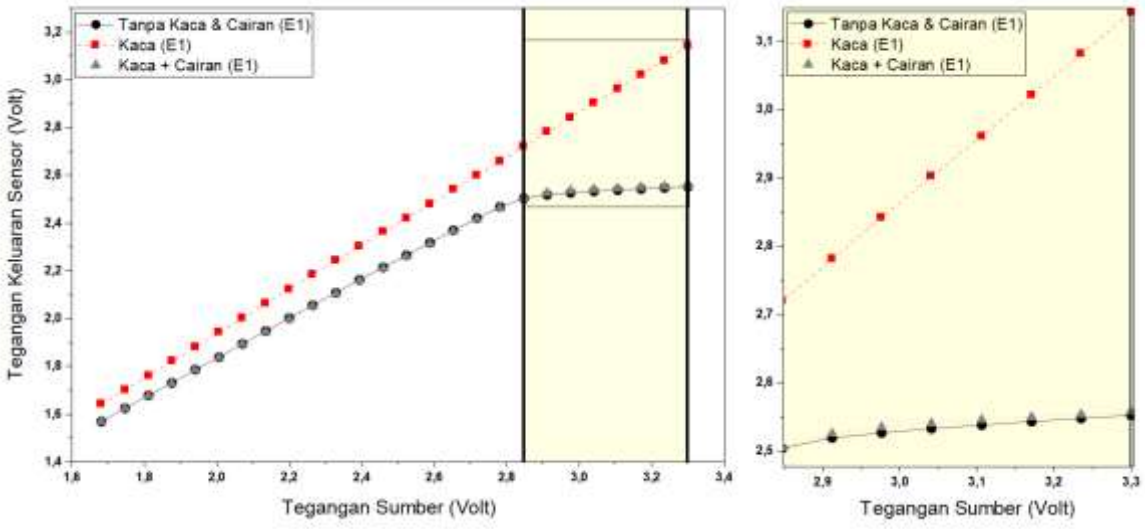
Pengujian instrumen menggunakan tiga jenis fluida uji dengan karakteristik optik dan reologis yang berbeda: akuades, larutan gliserin 30% (v/v), dan larutan gelatin sapi encer 2% (b/v). Larutan gliserin 30% dibuat melalui pengenceran gliserol dengan akuades. Seluruh rangkaian eksperimen dilakukan pada suhu ruangan laboratorium yang terkontrol pada 28,0 ± 0,5 °C, yang dipantau secara berkala menggunakan termometer laboratorium.Prosedur pengukuran dilakukan secara berurutan untuk masing-masing sampel. Sebelum pergantian antara sampel akuades dan gliserin, tabung kapiler dibilas menggunakan akuades dan dikeringkan untuk mencegah kontaminasi silang. Pada pengujian larutan gelatin sapi, instrumen dioperasikan untuk mengukur puluhan siklus aliran secara kontinu berturut-turut tanpa pencucian kapiler di antara siklus.

Prosedur ini dirancang sebagai uji ketahanan (*stress test*) untuk mengevaluasi algoritma diferensial dalam mengompensasi penumpukan lapisan residu pada dinding dalam kapiler yang memicu pergeseran garis dasar (*baseline drift*). Mengingat larutan gelatin memiliki struktur makromolekul dan berpotensi menunjukkan perilaku non-Newtonian (Sequeira dkk., 2024), data waktu alirnya difokuskan untuk menguji presisi pemicuan optik dan repetisi pewaktuan sistem.

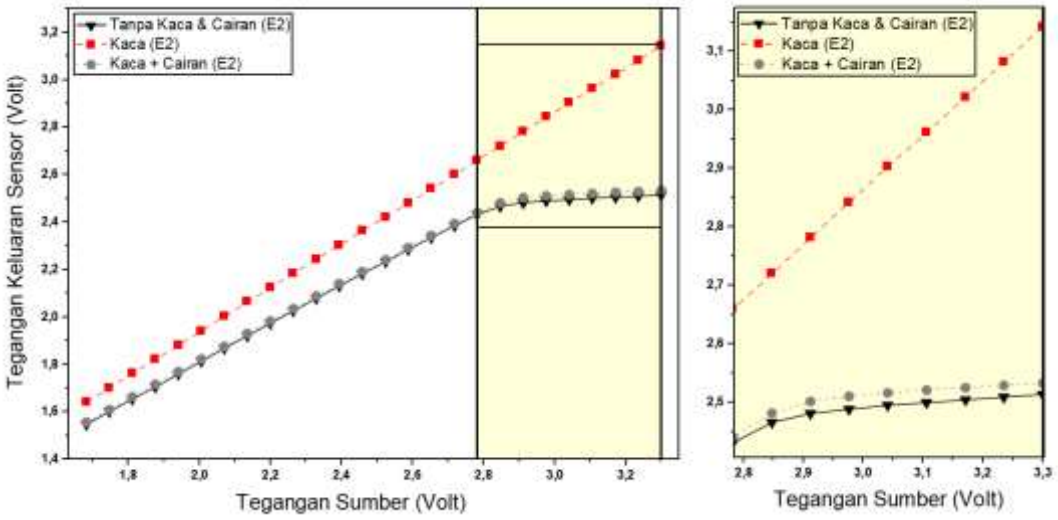
C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Karakterisasi Statis Sensor Optik

Karakterisasi statis dilakukan untuk memvalidasi perangkat keras optoelektronik, mengevaluasi kesimetrisan respons antara gerbang atas (E1) dan gerbang bawah (E2), serta menentukan titik kerja tegangan catu daya (V_s) yang optimal. Pengujian ini mengevaluasi respons tegangan fototransistor terhadap variasi tegangan sumber dari 1,6 V hingga 3,3 V pada tiga kondisi fisik ruang ukur: tanpa tabung kaca, tabung kaca kosong, dan tabung kaca berisi cairan (Gambar 4 dan Gambar 5).



Gambar 4. Karakteristik statis tegangan fototransistor gerbang atas E1



Gambar 5. Karakteristik statis tegangan fototransistor gerbang bawah E2

Grafik pada Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan bahwa gerbang sensor E1 maupun E2 memiliki profil respons optoelektronik yang identik. Pada kondisi tabung kaca kosong (kurva merah), tegangan keluaran sensor meningkat secara linier seiring kenaikan tegangan sumber hingga menyentuh level $\approx 3{,}1$ V pada tegangan sumber 3,3 V. Fenomena optik ini terjadi karena kelengkungan dinding tabung kapiler borosilikat kosong bertindak layaknya lensa silinder (*cylindrical lens*) yang memfokuskan pendaran berkas inframerah tepat ke sumbu peka fototransistor, menghasilkan penerimaan fluks foton yang maksimal (Wolske, 1987).

Kondisi berubah ketika tabung kapiler diisi cairan (kurva abu-abu), di mana tegangan keluaran menurun ke kisaran $\approx 2{,}55$ Vdan berhimpitan dengan profil tanpa tabung (kurva hitam). Fenomena berhimpitnya kedua kurva ini terjadi karena masuknya cairan ($n \approx 1{,}33$) meniadakan diskontinuitas optik pada dinding dalam kaca ($n \approx 1{,}47$), sehingga efek pemfokusan lensa silinder ternetralisir dan transmisi berkas merambat lurus setara dengan kondisi di udara bebas (Moreno dkk., 2022).

Selain itu, kurva abu-abu dan hitam memperlihatkan kecenderungan mendatar (*plateau*) di atas tegangan catu daya 2,85 V. Karakteristik saturasi ini bersumber dari konfigurasi rangkaian *common-emitter* dengan resistor *pull-up* 10 kΩ, fluks cahaya yang diterima cukup untuk mendorong titik kerja fototransistor ke daerah jenuh (*saturation*). Selisih tegangan statis yang sangat kontras antara kondisi tabung kosong ($\approx 3{,}1$ V) dan kondisi terisi cairan ($\approx 2{,}55$ V), dengan rentang pemisah yang lebar $\Delta V \approx 0{,}55$ V, menjadi dasar preferensi sistem untuk mendeteksi perlintasan meniskus cairan. Hasil karakterisasi statis membuktikan bahwa pemilihan tegangan sumber 3,3 V menghasilkan titik kerja yang optimal bagi fototransistor, di mana kedua gerbang sensor (E1 dan E2) menunjukkan respons optik yang simetris dengan batas rentang tegangan keluaran (2,55–3,1 V) yang sepenuhnya kompatibel dengan rentang pengukuran ADC ADS1115 tanpa mengalami saturasi penuh (*clipping*).

2. Derau Sinyal dan Penetapan Ambang Pemicu

Penetapan nilai ambang batas diferensial (m_{th}) memerlukan karakterisasi fluktuasi derau (*noise*) dasar alat saat kondisi tunak (*steady-state*), yaitu ketika tabung kapiler terisi cairan diam tanpa aliran. Perekaman derau dilakukan pada laju cuplik $\Delta t \geq 20$ ms pada ketiga fluida uji dengan total ribuan titik data: akuades (durasi 16,5 s; $N = 701$ cuplikan), larutan gliserin 30% (durasi 9,8 s; $N = 362$ cuplikan), dan larutan gelatin sapi (durasi 40,5 s; $N = 1736$ cuplikan). Parameter derau dasar dan penentuan ambang pemicu dirangkum pada Tabel 1.

TABEL 1. Parameter Ekstraksi Derau Dasar dan Penentuan Titik Kerja Sensor

Parameter Evaluasi	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
Simpangan Baku Derau Maksimal	σ_{noise}	0,0272	V/s	Kondisi terburuk pada gliserin 30%
Puncak Derau Mutlak Terukur	$\|m_{peak}\|$	0,090	V/s	Nilai tertinggi saat kondisi tunak ($\approx 3{,}3\sigma$)
Batas Aman Teoretis Instrumen	5σ	0,136	V/s	Batas probabilitas derau acak $< 0{,}0001\%$
Ambang Batas Pemicu Diferensial	$\|m_{th}\|$	0,150	V/s	Titik kerja pemicuan sistem pewaktu
Laju Transisi Meniskus Terendah	$\|m_{min}\|$	0,160	V/s	Terekam pada transisi fluida paling lambat/pekat

Tabel 1 memperlihatkan bahwa fluktuasi derau tertinggi terjadi pada pengujian gliserin 30% dengan simpangan baku $\sigma_{\text{noise}} = 0{,}0272$ V/s, sedangkan pada akuades dan gelatin nilainya lebih rendah ($\sigma \approx 0{,}016 – 0{,}017$ V/s). Puncak fluktuasi derau mutlak tertinggi yang pernah terekam sebesar $| m_{\text{peak}} | = 0{,}090$ V/s (setara $3{,}3\sigma$). Dengan menerapkan batas aman lima-sigma ($5\sigma = 0{,}136$ V/s), peluang munculnya derau acak yang melampaui batas ini secara teoretis kurang dari satu dalam sejuta cuplikan.

Berdasarkan batas 5σ tersebut, ambang pemicuan diferensial sistem dimulai pada nilai $| m_{\text{th}} | = 0{,}150$ V/s (muncul sebagai garis batas $-0{,}15$ V/s saat terjadi penurunan transisi tegangan). Nilai ini berada di atas puncak derau terukur (0,090 V/s) dan batas 5σ (0,136 V/s), sehingga memberikan toleransi yang sangat baik terhadap pemicuan palsu akibat fluktuasi kelistrikan.

Di sisi lain, laju penurunan sinyal paling landai yang terekam saat meniskus melintas ($| m_{\text{min}} |$) bernilai 0,160 V/s, yang diamati pada transisi fluida uji dengan laju alir paling lambat. Meskipun jarak pemisah antara batas pemicu (0,150 V/s) dan sinyal transisi terendah (0,160 V/s) relatif sempit ($\approx 0{,}010$ V/s), sistem menerapkan kriteria pemicuan ganda pada algoritma: sistem tidak hanya mengevaluasi nilai gradien sesaat, melainkan juga mensyaratkan perubahan tegangan terhadap baseline ($\Delta V_{\text{min}} = 6$ mV) serta konfirmasi kestabilan sinyal selama $N = 3$ cuplikan berturut-turut (60 ms) sebagai *debounce* digital (Persamaan 3).

3. Karakterisasi Dinamis Respons Sensor Optik

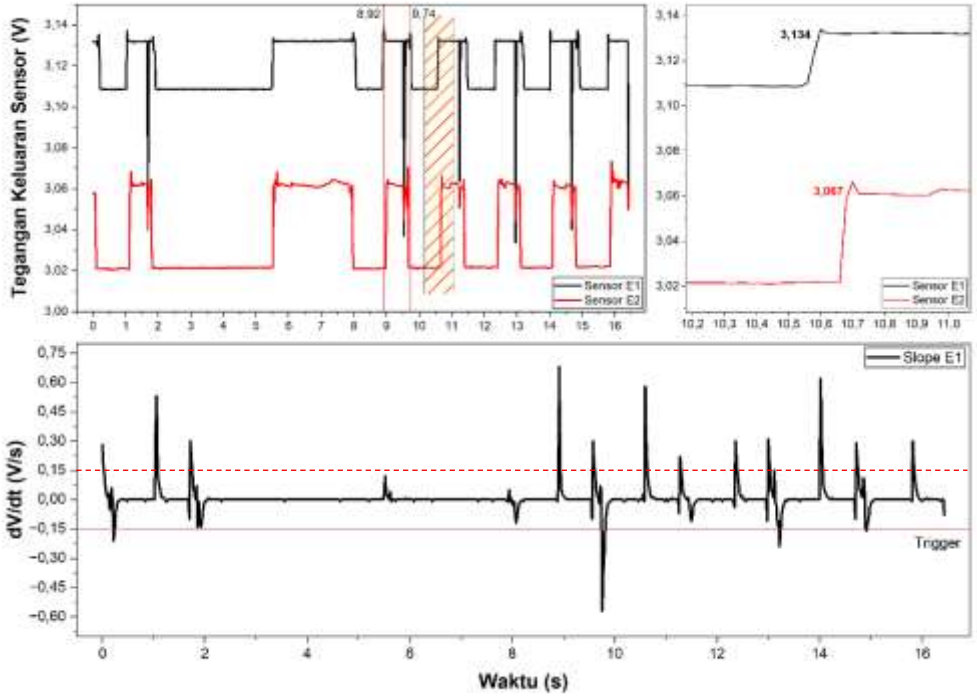
Evaluasi instrumen dilanjutkan pada pengujian dinamis saat fluida mengalir melintasi gerbang optik di bawah pengaruh percepatan gravitasi. Pengujian ini menggunakan tiga sampel dengan karakteristik optik dan reologis yang berbeda: akuades, larutan gliserin 30% (v/v), dan larutan gelatin sapi encer 2% (b/v). Perekaman sinyal dilakukan secara kontinu mencakup siklus hisap dan alir gravitasi pada ketiga fluida uji. Karakteristik level tegangan saat tabung terisi penuh fluida, saat kosong terbasahi, besaran langkah tegangan meniskus (ΔV), serta magnitudo lonjakan transien *switching* dirangkum pada Tabel 2.

TABEL 2. Respons level tegangan, langkah meniskus, dan lonjakan transien pada uji dinamis sensor (rerata siklus)

Sampel	E1 terisi → kosong (V)	ΔV_{E1} (mV)	E2 terisi → kosong (V)	ΔV_{E2} (mV)	Lonjakan transien: jumlah; E1/E2 (mV)
Akuades	3,109 → 3,132	23,3 ± 0,1	3,022 → 3,063	41,4 ± 1,4	7; −69 s.d. −98 / −11 s.d. −22
Gliserin 30%	3,014 → 3,036	22,0 ± 1,5	2,923 → 2,973	49,3 ± 2,1	4; −73 s.d. −97 / −23 s.d. −37
Gelatin sapi 2%	3,131 → 3,157	26,4 ± 1,4	3,045 → 3,085	39,9 ± 1,3	18; −32 s.d. −98 / −9 s.d. −25

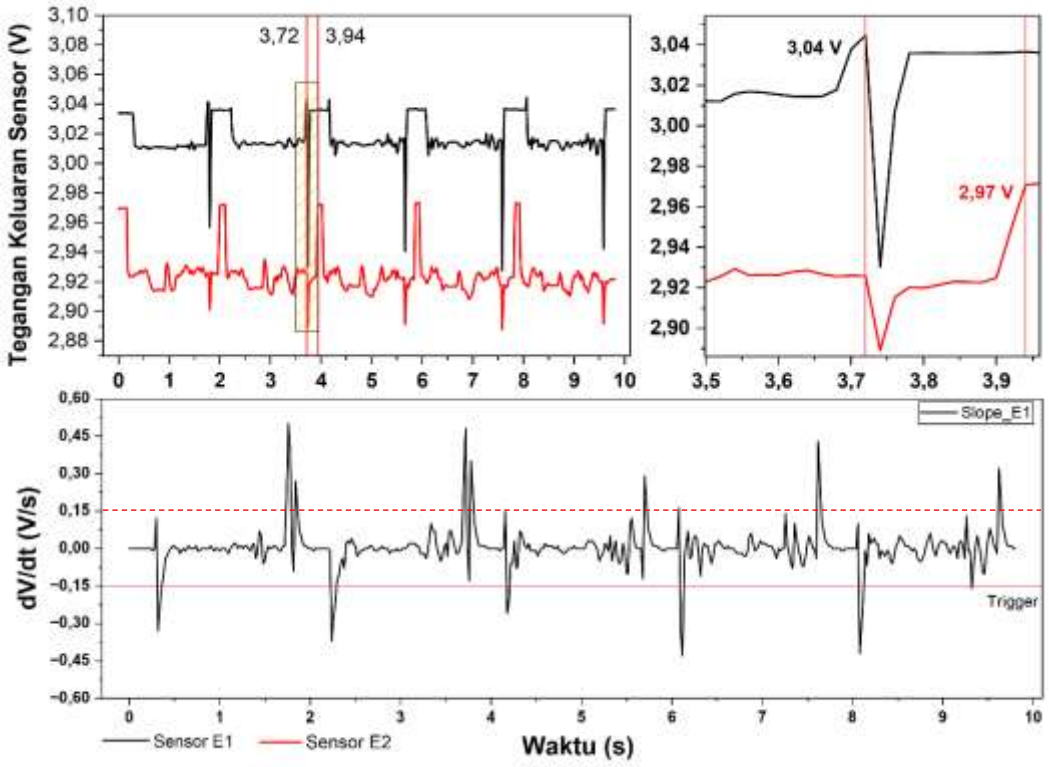
Tabel 2 memperlihatkan fenomena fisis penting pada dinamika aliran kapiler, perlintasan meniskus menghasilkan langkah perubahan tegangan terukur sebesar $\Delta V_{\mathrm{E1}} \approx 22{,}0 - 26{,}4$ mV pada gerbang atas dan $\Delta V_{\mathrm{E2}} \approx 39{,}9 - 49{,}3$ mV pada gerbang bawah. Langkah tegangan pada E2 secara konsisten lebih tinggi dibandingkan E1 karena kecepatan alir meniskus bertambah saat melintasi kapiler bagian bawah akibat percepatan gravitasi, sehingga transisi pemfokusan optik berlangsung lebih curam. Seluruh magnitudo langkah tegangan dinamis ini (≥ 22 mV) melampaui kriteria ambang tegangan minimum perangkat lunak ($\Delta V_{\mathrm{min}} = 6$ mV).

Selain itu, selisih dinamis berada jauh di bawah selisih uji statis (≈ 560 mV) karena dinding dalam borosilikat tetap terlapisi film tipis cairan (*wetting film*) saat meniskus melintas cepat. Terkait lonjakan transien sesaat yang tercatat pada kolom terakhir, fluktuasi tersebut muncul akibat induksi peralihan saat pompa vakum dihentikan; gangguan ini terbukti tidak memicu kesalahan hitung karena terjadi sesudah status *Stop* terpenuhi (berada di luar jendela pewaktuan aktif).



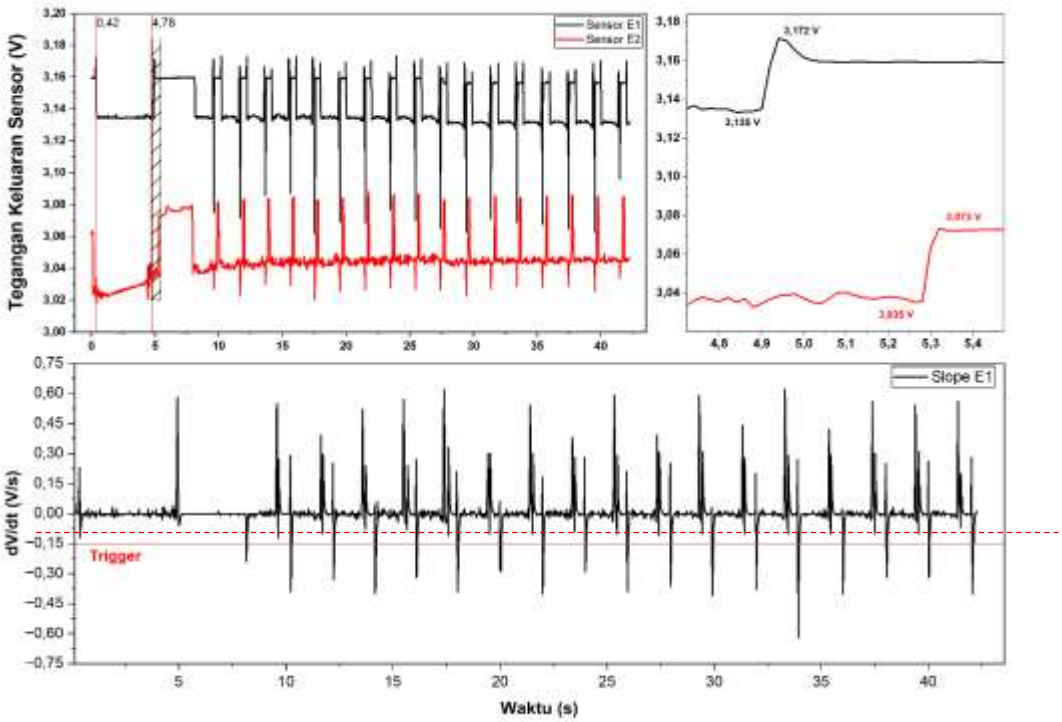
Gambar 6. Grafik karakteristik dinamis aquades

Gambar 6 memperlihatkan profil transien aliran akuades selama beberapa siklus hisap-alir sebagai representasi fluida Newtonian berviskositas rendah. Pada jendela pembesaran (*inset zoom-in*), dinamika perlintasan meniskus terekam berurutan pada kedua gerbang sensor. Ketika meniskus batas cairan turun meninggalkan gerbang atas E1, tegangan keluaran fototransistor E1 (kurva hitam) mengalami kenaikan transien dari level terisi 3,108 V menuju level 3,134 V ($\Delta V_{\mathrm{E1}} \approx 26$ mV). Kenaikan ini menghasilkan lonjakan gradien diferensial pada grafik dV/dt yang melampaui nilai ambang pemicu dengan konfirmasi *debounce* 3 cuplikan berturut-turut (60 ms), sehingga mengeksekusi pencacahan waktu awal (t_{start}). Sekitar 0,08–0,11 s kemudian, meniskus cairan mencapai gerbang bawah E2, yang ditandai oleh kenaikan tegangan fototransistor E2 (kurva merah) dari level 3,022 V menuju 3,067 V ($\Delta V_{\mathrm{E2}} \approx 45$ mV). Sistem secara instan mengunci kondisi henti (t_{stop}), menghasilkan pencatatan waktu alir efektif antar-gerbang.



Gambar 7. Grafik karakteristik dinamis gliserin 30%

Dinamika aliran yang lebih kompleks terekam pada pengujian larutan gliserin 30% (Gambar 7). Pada jendela pembesaran, transisi utama meniskus fluida teramati jelas saat tegangan menurun tajam dari level 3,04 V menuju 2,97 V dalam rentang waktu singkat (antara detik 3,72 hingga 3,94). Namun, akibat sifat cairan yang lebih viskos dibandingkan air, timbul formasi gelembung mikro (*micro-bubbles*) dan pemisahan ekor cairan di belakang massa fluida utama, yang memicu fluktuasi tegangan sesudah detik ke-4. Pada grafik diferensial dV/dt (bawah), terlihat bahwa fluktuasi akibat gelembung mikro tersebut menghasilkan riak-riak kecil yang tidak menembus batas pemicuan $-0{,}15$ V/s. Selain itu, durasi lonjakan sesaat akibat gelembung mikro berlangsung sangat singkat ($<$ 40 ms), sehingga secara otomatis digugurkan oleh kriteria *debounce* 3 cuplikan berturut-turut. Dengan demikian, sistem berhasil mengabaikan gangguan fisis tersebut dan hanya merespons transisi penurunan meniskus utama sebesar 0,07 V.



Gambar 8. Grafik karakterisasi dinamis gelatin sapi

Pengujian terakhir pada Gambar 8 mengevaluasi keandalan instrumen melalui pengujian multi-siklus kontinu larutan gelatin sapi selama puluhan detik tanpa pencucian kapiler di antara siklus aliran. Gelatin secara bertahap meninggalkan lapisan tipis residu pada dinding dalam kapiler kaca, yang memicu pergeseran garis dasar (*baseline drift*) dari satu siklus ke siklus berikutnya. Sebagaimana tampak pada jendela pembesaran, tegangan dasar awal berfluktuasi dan merosot secara bertahap, bergeser antara 3,172 V hingga 3,135 V untuk gerbang E1, serta 3,073 V hingga 3,035 V untuk E2.

Meskipun tegangan garis dasar terus bergeser akibat residu dinding, grafik dV/dt menunjukkan bahwa amplitudo kemiringan gradien transien saat meniskus melintas tetap konsisten menembus garis batas pemicu pada setiap siklus aliran. Hal ini membuktikan algoritma diferensial mikrokontroler mengevaluasi laju gradien perubahan sinyal terhadap waktu (dV/dt). Selama laju penurunan optik meniskus tetap curam, instrumen berhasil mengunci titik mula dan henti pewaktuan.

4. Analisis Kinerja Waktu Alir dan Keterulangan Pengukuran

Kinerja perangkat lunak dan keandalan sistem dalam mengeksekusi rentang waktu antar-gerbang dievaluasi melalui uji keterulangan (*repeatability*) secara kontinu pada suhu ruang laboratorium $28{,}0 \pm 0{,}5$ °C. Sistem secara otonom mengonversi kejadian transisi optik meniskus menjadi data deret waktu alir efektif ($t_f = t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}$). Rekapitulasi statistik hasil pengukuran waktu alir, simpangan baku (*standard deviation*, SD), rentang nilai minimum-maksimum, koefisien variasi (*coefficient of variation*, CV), serta parameter viskositas acuan literatur dirangkum pada Tabel 3.

TABEL 3. Rekapitulasi Kinerja Pengukuran Waktu Alir dan Evaluasi Keterulangan Sistem pada Suhu 28,0 ± 0,5 °C

Jenis Sampel	Sifat Reologis / Peran Uji	Viskositas Acuan Literatur (mPa · s)	Jumlah Siklus (*N*)	Rata-rata Waktu Alir, $\bar{t}_f \pm$ SD(s)	Rentang Waktu Alir (s)	Koefisien Variasi, CV (%)
Aquades	Newtonian (Standar Kalibrasi)	0,832 (Huber dkk., 2009)	7	0,087 ± 0,010	0,078 – 0,099	11,5
Gliserin 30%	Newtonian (Fluida Viskos)	2,160 (Cheng, 2008)	4	0,215 ± 0,025	0,195 – 0,235	11,6
Gelatin sapi 2%	Non-Newtonian (*Stress Test Drift*)	-	18	0,321 ± 0,024	0,280 – 0,365	7,5

Nilai simpangan baku SD ≈ 10–25 ms merefleksikan batas ketidakpastian kuantisasi cuplikan diskrit ADC $\Delta t \geq 20$ ms pada waktu alir sub-detik. Kontribusi ketidakpastian relatif menurun seiring meningkatnya waktu alir, ditunjukkan oleh penurunan nilai CV menjadi 7,5% pada gelatin).

Viskositas dinamik acuan akuades pada 28 °C mengacu pada formulasi internasional IAPWS oleh Huber dkk. (2009) dengan densitas $\rho = 0{,}996$ g/cm^3, menghasilkan viskositas kinematik $\nu_{air} \approx 0{,}835$ mm^2/s. Viskositas acuan gliserin 30% (v/v) dihitung berdasarkan korelasi Cheng (2008) dengan densitas $\rho = 1{,}071$ g/cm^3, menghasilkan viskositas kinematik $\nu_{gliserin} \approx 2{,}02$ mm^2/s. Waktu alir gelatin dilaporkan untuk evaluasi presisi pemicuan optik terhadap residu dinding.

Berdasarkan prinsip mekanika fluida pada viskometer kapiler Ostwald, waktu alir fluida Newtonian berbanding lurus dengan viskositas kinematik fluida ($\nu = \eta/\rho$) sesuai hukum Hagen-Poiseuille $v = C.t_f$, di mana C adalah konstanta kalibrasi geometri tabung viskometer. Mengacu pada data Tabel 3, rata-rata waktu alir larutan gliserin 30% ($\bar{t}_f = 0{,}223$ s) tercatat lebih lambat secara signifikan dibandingkan akuades ($\bar{t}_f = 0{,}099$ s), menghasilkan rasio waktu alir eksperimental:

$$\frac{t_{f,\text{gliserin}}}{t_{f,\text{akuades}}} = \frac{0{,}215\ \text{s}}{0{,}087\ \text{s}} \approx 2{,}4$$

Rasio waktu alir eksperimental ini memperlihatkan kesesuaian yang sangat erat terhadap rasio viskositas kinematik teoretis gliserin 30% terhadap air pada suhu 28 °C dari literatur standar:

$$\frac{\nu_{\text{gliserin}}}{\nu_{\text{air}}} = \frac{2{,}020\ \text{mm}^2/\text{s}}{0{,}835\ \text{mm}^2/\text{s}} \approx 2{,}42$$

Kesesuaian dengan selisih yang sangat kecil (≈ 2,5%) antara rasio waktu alir terukur (2,48) dan rasio viskositas acuan literatur (2,42) membuktikan bahwa sistem pewaktuan diferensial mempertahankan korelasi fisik yang valid terhadap perubahan kekentalan fluida uji sesuai formulasi termofisika standar (Cheng, 2008; Huber dkk., 2009).

Waktu alir yang berada pada rentang sub-detik (0,08–0,35 s) bersumber dari konstruksi dudukan sensor dengan jarak vertikal antar-gerbang yang pendek ($d = 40$ mm) pada lengan kapiler lurus tanpa mengapit labu ukur reservoir besar, menghasilkan volume ruang ukur efektif hanya $\Delta V_{\text{ukur}} \approx 0{,}12$ mL. Pada viskometer kapiler standar, durasi alir umumnya dirancang lebih panjang guna meminimalkan efek percepatan fluida dan suku koreksi energi kinetik Hagenbach–Couette (BinHajeb dkk., 2025; Sequeira dkk., 2024).

Batas ketidakpastian baku kuantisasi waktu teoretis untuk kombinasi dua gerbang optik dengan interval pencuplikan diskrit $\Delta t \geq 20$ ms (50 Hz) adalah $u_{\text{kuantisasi}} = \Delta t/\sqrt{6} \approx 8{,}16$ ms. Ketidakpastian kuantisasi ADC inilah yang menjadi kontributor dominan terhadap nilai simpangan baku instrumen (SD ≈ 10–25 ms), yang terefleksikan pada nilai koefisien variasi akuades (CV = 11,5%) dan gliserin (CV = 11,6%). Seiring bertambahnya waktu alir pada fluida yang lebih viskos, pengaruh ketidakpastian kuantisasi waktu diskrit ini menurun secara proporsional, yang dibuktikan oleh penurunan nilai CV menjadi 7,5% pada larutan gelatin sapi.

5. Evaluasi Kinerja Sistem dan Pengujian Komparatif Ambang Tetap

Hasil pengujian dinamis pada ketiga fluida memberikan pembuktian kuantitatif atas keunggulan algoritma diferensial dinamis (dV/dt). Upaya otomatisasi viskometer Ostwald menggunakan sensor optik sebelumnya terbukti mampu mereduksi kesalahan pengamatan visual manusia secara signifikan (Habiburrohman & Fauzi, 2020; Yasin, 2023; BinHajeb dkk., 2025). Namun, sebagian besar instrumen pendahulu tersebut mengandalkan komparator perangkat keras atau ambang batas tegangan tetap (*fixed threshold*), sehingga keandalannya rentan menurun saat berhadapan dengan variasi transmitansi optik antar-sampel cairan atau pergeseran garis dasar (*baseline drift*) (Moreno dkk., 2022).

Untuk membandingkan algoritma diferensial dinamis (dV/dt) secara kuantitatif terhadap metode ambang tetap konvensional, dilakukan evaluasi komparatif numerik (*post-hoc*) pada data mentah rekaman eksperimen yang sama, mencakup total 29 siklus aliran (7 siklus akuades, 4 siklus gliserin 30%, dan 18 siklus gelatin sapi 2%). Metode komparator tegangan tetap disimulasikan menggunakan logika mesin status yang identik, dengan ambang pemicu diatur pada titik tengah langkah transisi akuades disertai batas histeresis 2 mV tanpa kalibrasi ulang saat pergantian sampel. Hasil evaluasi dengan klasifikasi pemicuan Benar / Gagal (*Missed*) / Palsu (*False*) dirangkum pada Tabel 4.

TABEL 4. Perbandingan Kinerja Deteksi Metode Ambang Tetap (*Fixed Threshold*) dan Algoritma Diferensial Dinamis (dV/dt)

Aturan pemicuan	Akuades (7 siklus)	Gliserin 30% (5 siklus)	Gelatin (18 siklus)	Total Benar
(1) Komparator tetap, kalibrasi akuades	7/0/0	0/4/0	0/12/6	7/29
(2) Komparator dikalibrasi ulang per cairan	7/0/0	4/0/0	18/0/0	29/29
(3) Gradien tanpa tapis, 0,15 V/s	7/0/0	0/0/4	0/0/18	7/29
(4) Gradien + level terhadap *baseline* siklus	7/0/0	2/1/1	17/0/1	26/29

Pada Tabel 4, metode komparator ambang tetap memperlihatkan kelemahan mendasar instrumen optik konvensional, meskipun bekerja pada akuades (7/0/0) metode ini mengalami kegagalan deteksi total pada gliserin 30% (0/4/0) akibat penurunan garis dasar transmisi optik, serta mengalami kegagalan pada gelatin sapi (0/12/6) akibat akumulasi residu dinding yang memicu 12 kali kegagalan deteksi (*missed trigger*) dan 6 kali pemicuan palsu (*false trigger*). Metode ambang tetap hanya dapat bekerja optimal jika operator melakukan kalibrasi sensitivitas ulang secara manual setiap kali mengganti sampel cairan sehingga ketergantungan pada nilai ambang tetap memaksa operator terus-menerus melakukan rekalibrasi perangkat.

Di sisi lain, evaluasi pada Aturan 3 membuktikan bahwa kalkulasi diferensial diskrit semata tanpa penapisan digital tidak memadai untuk sistem fisik nyata, derau fluktuasi kuantisasi ADC memicu pemicuan palsu pada seluruh siklus gliserin (0/0/4) dan gelatin (0/0/18). Kelemahan ini berhasil diatasi oleh algoritma terpadu yang diusulkan (Aturan 4), yang memadukan penapis EMA orde-satu dan pembaruan garis dasar adaptif (V_{b1} dan V_{b2}) pada awal setiap siklus. Algoritma ini

mencatatkan tingkat keberhasilan deteksi sebesar 89,7% (26 dari 29 siklus benar) secara otonom tanpa memerlukan intervensi kalibrasi ulang oleh operator.

D. Kesimpulan

Berdasarkan hasil karakterisasi dan pengujian sistem deteksi waktu alir pada viskometer Ostwald, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Perlintasan meniskus cairan pada kapiler menghasilkan langkah tegangan fototransistor sebesar 22–49 mVakibat perubahan pembiasan optik dinding tabung.
2. Ambang batas pemicuan diferensial ditetapkan pada $|\, m_{\text{th}} \,| = 0{,}150$ V/sberdasarkan batas derau $5\sigma = 0{,}136$ V/s($\sigma_{\text{noise}} = 0{,}0272$ V/s), dipadukan dengan kriteria kenaikan tegangan minimum $\Delta V_{\text{min}} = 6$ mVdan konfirmasi *debounce* 3 cuplikan (60 ms).
3. Algoritma diferensial dengan pembaruan garis dasar (*baseline*) adaptif per siklus mampu mendeteksi aliran fluida tanpa kalibrasi ulang sensitivitas saat terjadi pergeseran garis dasar akibat residu dinding gelatin sapi 2%, serta mengabaikan lonjakan sesaat akibat gelembung mikro pada gliserin 30%.
4. Pengukuran pada suhu $28{,}0 \pm 0{,}5$ ˚C mencatatkan rata-rata waktu alir $0{,}087 \pm 0{,}010$ s (CV = 11,5%) untuk 7 siklus akuades, $0{,}215 \pm 0{,}025$ s (CV = 11,6%) untuk 4 siklus gliserin 30%, dan $0{,}321 \pm 0{,}024$ s (CV = 7,5%) untuk 18 siklus gelatin sapi 2%. Rasio waktu alir gliserin terhadap air tercatat sebesar 2,48, bersesuaian dengan rasio viskositas kinematik teoretis sebesar 2,42.
5. Hasil komparasi pada 29 siklus rekaman data mentah menunjukkan bahwa algoritma terpadu mendeteksi 26 dari 29 siklus (89,7%), sedangkan metode komparator ambang tetap tanpa rekalibrasi mendeteksi 7 dari 29 siklus (24,1%).

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial

- *Penulis menggunakan [Gemini.ai] untuk merapikan tata tulis dan membantu pengolahan analisis awal. Seluruh keluaran telah diperiksa dan diverifikasi oleh penulis, dan penulis bertanggung jawab penuh atas isi artikel.*

Pernyataan Kontribusi Penulis

Penulis	*Kontribusi*
Fatinah Afifah	Konseptualisasi, metodologi, perancangan perangkat instrumen, pengambilan data eksperimen, pengolahan data, dan penulisan draf awal artikel
Mona Berlian Sari	Supervisi penelitian, validasi metode, peninjauan kritis (*critical review*), dan penyuntingan naskah akhir

Pernyataan Pendanaan

- *Penelitian ini tidak menerima pendanaan dari lembaga mana pun, baik pemerintah, swasta, maupun nirlaba.*

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan terkait penelitian, kepenulisan, maupun penerbitan artikel ini.

Daftar Pustaka

Bakhtiaridoost, S., Musuroi, C., Volmer, M., & Florescu, M. (2024). Optoelectronic microfluidic device for point-of-care blood plasma viscosity measurement. Lab on a Chip, 24(13), 3305–3314. https://doi.org/10.1039/d4lc00211c

Bello, V., & Merlo, S. (2020). Micro-opto-fluidic platform for solvents identification based on absorption properties in the NIR region. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 412(14), 3351–3358. https://doi.org/10.1007/s00216-019-02375-z

Bello, V., Bodo, E., & Merlo, S. (2023). Optical multi-parameter measuring system for fluid and air bubble recognition. *Sensors, 23*(15), 6684. https://doi.org/10.3390/s23156684

BinHajeb, A. M., Shukor, S. R. A., Nurhazwani, Y. A., Soo, J. X., Saw, K. Y., Liew, S. J., Tan, C. O., & Tan, C. S. (2025). A Novel Automated Kinematic Capillary Viscometer System for Precise Viscosity Measurements. Arabian Journal for Science and Engineering, 50, 20709–20722. https://doi.org/10.1007/s13369-025-10284-w

Cheng, N.-S. (2008). Formula for the viscosity of a glycerol–water mixture. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 47*(9), 3285–3288. https://doi.org/10.1021/ie071349z

Firmansyah, R. R., & Sucahyo, I. (2019). Rancang Bangun Viskometer Rotasi Sebagai Pengukur Kekentalan Fluida Cair. Inovasi Fisika Indonesia, 8(2), 28–32. https://doi.org/10.26740/ifi.v8n2.p%25p

Fomina, P. S., Proskurnin, M. A., Mizaikoff, B., & Volkov, D. S. (2022). Infrared Spectroscopy in Aqueous Solutions: Capabilities and Challenges. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 53(8), 1748-1765. https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2041390

Habiburrohman, A. W., & Fauzi, F. (2020). Rancang Bangun Alat Viskositas Zat Cair Menggunakan Sensor Inframerah Sebagai Detektor Waktu Pada Praktikum Viskositas Zat Cair Matakuliah Fisika Dasar. Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika Indonesia, 2(2), 48–52. https://doi.org/10.29303/jppfi.v2i2.57

Huber, M. L., Perkins, R. A., Laesecke, A., Friend, D. G., Sengers, J. V., Assael, M. J., Metaxa, I. N., Vogel, E., Mareš, R., & Miyagawa, K. (2009). New international formulation for the viscosity of H_2O. *Journal of Physical and Chemical Reference Data, 38*(2), 101–125. https://doi.org/10.1063/1.3088050

Liu, X., Jing, R., Zhang, K., Zhao, Q., & Sun, M. (2024). Research on moving liquid level detection method of viscometer in dynamic scene. *Mobile Networks and Applications, 29*(6), 2022–2029. https://doi.org/10.1007/s11036-024-02335-7

Moreno, R., Faina, A., & Stoy, K. (2022). Near Infrared Sensor Setup for General Interface Detection in Automatic Liquid-Liquid Extraction Processes. IEEE Sensors Journal, 22(10), 9857–9867. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3164188

Nie, R., Guo, W., Luo, Y., Li, W., Xia, M., & Yang, K. (2019). Optical liquid-level sensor based on a designed light guide plate. Sensors and Actuators A: Physical, 296, 352–356. https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.07.045

Obeidat, Y., Abu Mousa, E., & Mushaljy, R. (2023). Contactless Optical Liquid Identifier. ACS Omega, 8, 34787–34794. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03856

Pham, L. H. P., Bautista, L., Vargas, D. C., & Luo, X. (2018). A simple capillary viscometer based on the ideal gas law. RSC Advances, 8(53), 30441–30447. https://doi.org/10.1039/c8ra06006a

Saxena, I., & Kumar, V. (2021). Automatic Version of Ostwald Viscometer for Conductive Liquids. Instruments and Experimental Techniques, 64(2), 327–330. https://doi.org/10.1134/S0020441221010322

Sequeira, M. C. M., Caetano, F. J. P., & Fareleira, J. M. N. A. (2024). Capillary Viscometry for Routine Measurements of Newtonian Liquids. International Journal of Thermophysics, 45, 118. https://doi.org/10.1007/s10765-024-03410-7

Wolske, J. P. (1987). *Meniscus position detector with detector at the focal plane of the lens formed by tube and liquid* (U.S. Patent No. 4,654,535). U.S. Patent and Trademark Office.

Wurts, B., Jindrich, C., Gong, Y., Ojih, J., Hu, M., Yin, K., & Shi, L. (2025). A derivative-based framework for real-time signal processing and event detection in impedance flow cytometry. *Sensors, 25*(23), 7252. https://doi.org/10.3390/s25237252

Yasin, M. W. S. (2023). Rancang Bangun Viscometer Digital Dengan Pemanas Induksi Berbasis Mikrokontroler Atmega 8535. JuTEKS (Jurnal Teknik Elektro), 10(1), 26–34. https://doi.org/10.32832/juteks.v10i1.14269