Hello World
Jurnal Ilmu Komputer
https://jurnal.ilmubersama.com/index.php/hello_world

Artikel Penelitian

Pengembangan dan Evaluasi Awal Prototipe Pemantauan Termal Berbasis IoT Menggunakan Analisis Rate-of-Rise Suhu dan Monitoring Web

Dedy Kiswanto[1], Nurul Maulida Surbakti[2], Said Iskandar AL Idrus[3], Hermawan Syahputra[4]

[1,3,4] *Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia*
[2] *Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia*
Jl. Willem Iskandar, Pasar V, Medan Estate, Kota Medan, Sumatera Utara, Indonesia
E-mail: dedykiswanto@unimed.ac.id, nurulmaulida@unimed.ac.id, saidiskandar@unimed.ac.id, hsyahputra@unimed.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 00 Januari 00
Revisi Akhir: 00 Februari 00
Diterbitkan *Online*: 00 Maret 00

KATA KUNCI

Internet of Things; peringatan dini; rate-of-rise; Simple Moving Average; monitoring web

KORESPONDENSI

Phone: xxxxx
E-mail: dedykiswanto@unimed.ac.id

A B S T R A K

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi fungsi awal prototipe pemantauan termal berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan rate-of-rise (RoR) suhu sebagai indikator perubahan temperatur. Prototipe mengintegrasikan Arduino Uno, sensor DHT11, alarm lokal, komputer gateway, dan dashboard web. Data temperatur diproses menggunakan Simple Moving Average (SMA) lima sampel, kemudian RoR diestimasi melalui beda hingga dengan interval pembacaan nominal sekitar satu detik. Ambang RoR 0,8 °C/s digunakan sebagai parameter demonstrasi, bukan ambang detektor kebakaran tersertifikasi. Pengujian awal mendokumentasikan integrasi pembacaan suhu, pemrosesan, perubahan status, aktuasi lokal, dan pemantauan web. Ringkasan pengujian sebelumnya melaporkan rerata waktu aktivasi 2,4 detik pada konfigurasi RoR dan 7,1 detik pada pembanding suhu tetap; selisih aritmetis 4,7 detik (66,2%) tidak dapat dianggap sebagai bukti keunggulan karena ambang pembanding, kondisi pengujian, dan log setiap pengulangan belum tersedia. Penilaian awal lima responden menghasilkan rata-rata 4,16 dari skala 5 untuk aspek pengalaman penggunaan. Analisis matematis menunjukkan bahwa dengan interval sampel tepat satu detik, SMA lima sampel dan ambang 0,8 °C/s mensyaratkan perubahan suhu terukur sedikitnya 4 °C dalam lima interval; keterbatasan DHT11 menuntut validasi ulang terhadap dinamika tersebut. Hasil penelitian mendukung kelayakan integrasi fungsional sebagai proof-of-concept pemantauan termal, bukan validasi akurasi deteksi kebakaran atau kesiapan sebagai perangkat keselamatan.

PENDAHULUAN

Kebakaran merupakan kejadian dengan dinamika termal yang dapat berkembang cepat sehingga keterlambatan pada tahap deteksi memperbesar waktu antara awal anomali dan tindakan respons. Pada detektor panas konvensional, keputusan dapat dibangun berdasarkan suhu tetap atau perubahan suhu terhadap waktu. Pendekatan suhu tetap sederhana dan stabil, tetapi karakteristik *thermal lag* membuat elemen sensor memerlukan waktu untuk mengikuti perubahan temperatur lingkungan. Kajian sensor kebakaran modern menempatkan detektor suhu tetap dan *rate-of-rise* sebagai dua mekanisme dasar yang saling melengkapi, sedangkan penelitian terbaru mengarah pada integrasi sensor, komputasi, dan komunikasi untuk memperoleh deteksi yang lebih cepat serta informasi yang lebih kaya [1].

Perkembangan *Internet of Things* memperluas fungsi sistem deteksi dari alarm lokal menjadi sistem yang mendukung akuisisi data, pemrosesan, pencatatan, dan observasi jarak jauh. Arsitektur berbasis sensor terdistribusi telah digunakan untuk memantau peristiwa termal pada lingkungan industri dan lokasi berisiko, dengan perhatian khusus pada kontinuitas pengukuran, keandalan komunikasi, dan waktu respons [2]. Studi lain menunjukkan bahwa pengolahan multi-parameter

https://doi.org/10.56211/helloworld Attribution-ShareAlike 4.0 International Some rights reserved

dan logika keputusan pada sistem IoT dapat menekan ketergantungan pada satu indikator serta menyediakan pola sinyal yang lebih informatif untuk proses klasifikasi [3]. Survei terkini juga menegaskan bahwa detection *latency*, akurasi, konsumsi energi, dan kualitas komunikasi merupakan indikator penting ketika sistem IoT dirancang untuk peringatan dini [4]. Walaupun pendekatan multi-sensor dan *machine learning* mampu meningkatkan kemampuan diskriminasi, kompleksitas tersebut tidak selalu ideal untuk prototipe berbiaya rendah atau perangkat dengan sumber daya komputasi terbatas. Salah satu alternatif adalah mengekstraksi fitur temporal sederhana yang dapat dihitung langsung dari aliran data sensor. Pada penelitian ini, fitur yang digunakan adalah laju kenaikan temperatur atau *rate-of-rise* (RoR). RoR tidak hanya mempertimbangkan nilai suhu saat ini, tetapi juga seberapa cepat suhu berubah. Dengan demikian, sistem dapat memberikan peringatan ketika pola kenaikan menjadi tidak wajar meskipun suhu absolut belum mencapai *set point* yang digunakan oleh *baseline*.

Pada data sensor diskrit, diferensiasi numerik dapat memperbesar fluktuasi pembacaan. Penelitian ini menggunakan Simple Moving Average (SMA) lima sampel sebelum estimasi RoR dan menghubungkannya dengan aktuasi lokal serta tampilan web. Tujuan penelitian dibatasi pada perancangan sistem, demonstrasi keterpaduan komponen, evaluasi pengguna awal, dan telaah kewajaran angka ringkasan waktu aktivasi yang sudah tersedia. Artikel tidak menguji akurasi pengenalan peristiwa kebakaran atau membuktikan keunggulan komparatif RoR terhadap detektor suhu tetap.

TINJAUAN PUSTAKA

Rate-of-Rise Suhu sebagai Indikator Dinamis

Deteksi panas dapat menggunakan nilai temperatur absolut maupun karakteristik perubahan temperatur. Pada pendekatan ambang tetap, alarm aktif ketika T(t) mencapai nilai tertentu. Pada pendekatan RoR, informasi utama berasal dari gradien temperatur terhadap waktu sehingga sistem lebih sensitif terhadap perubahan cepat. Kajian sensor kebakaran menjelaskan bahwa heat detector berbasis laju perubahan digunakan untuk merespons pertumbuhan panas yang cepat, sedangkan karakteristik lingkungan tetap menentukan pemilihan parameter aktivasi [1]. Penelitian ultra-early fire detection yang lebih baru juga memperlihatkan bahwa laju perubahan temperatur tetap menjadi fitur pembanding penting ketika algoritma yang lebih kompleks dievaluasi [5].

Pada prototipe ini, RoR direpresentasikan sebagai turunan pertama suhu terhadap waktu. Besaran tersebut tidak digunakan untuk menyatakan tingkat kebakaran secara absolut, tetapi sebagai sinyal perubahan yang digunakan oleh logika keputusan lokal.

$$r(t) = dT(t) / dt \qquad (1)$$

dengan T(t) adalah temperatur pada waktu t dalam derajat Celsius dan r(t) adalah laju perubahan temperatur dalam °C/s. Nilai r(t) yang positif dan besar menunjukkan pemanasan yang berlangsung cepat. Karena sistem menggunakan sensor digital diskrit, bentuk kontinu pada Persamaan (1) diaproksimasi menggunakan beda hingga.

Simple Moving Average dan Turunan Numerik

Perubahan kecil pada data sensor dapat menghasilkan variasi yang besar pada turunan numerik. Untuk mengurangi sensitivitas terhadap fluktuasi antar-sampel, penelitian menggunakan *Simple Moving Average* dengan jendela lima data. SMA dipilih karena kebutuhan komputasinya rendah dan dapat diterapkan pada mikrokontroler tanpa pustaka pemrosesan sinyal yang kompleks. Nilai rata-rata bergerak pada sampel ke-k dirumuskan pada Persamaan (2).

$$\bar{T}_k = (1/n) \sum_{i=0}^{n-1} T_{(k-i)}, \quad n = 5 \qquad (2)$$

Setelah nilai rata-rata bergerak diperoleh, estimasi RoR dihitung sebagai beda hingga dua nilai SMA berturutan dibagi selang waktu aktual antarpembacaan. Frekuensi nominal program sekitar 1 Hz merupakan pengaturan sistem, bukan bukti bahwa pengukuran fisik DHT11 selalu diperbarui setiap detik; timestamp dan karakteristik pembacaan perlu diverifikasi pada implementasi.

$$r_k = (\bar{T}_k - \bar{T}_{k-1}) / (t_k - t_{k-1}) \qquad (3)$$

Jendela SMA n=5 merupakan kompromi prototipe antara peredaman noise dan keterlambatan. Jendela yang terlalu kecil kurang efektif mereduksi variasi, sedangkan jendela yang terlalu panjang dapat memperlambat respons terhadap perubahan cepat. Oleh karena itu, nilai n pada penelitian ini tidak diposisikan sebagai parameter universal dan perlu ditentukan ulang apabila sensor, frekuensi sampling, atau lingkungan penggunaan berubah.

IoT untuk Monitoring dan Peringatan Dini Kebakaran

Riset IoT untuk keselamatan kebakaran berkembang dari monitoring temperatur sederhana menuju jaringan multi-sensor, cloud monitoring, protokol ringan, dan analitik cerdas. Hajovsky et al. menunjukkan penggunaan IoT untuk pemantauan kejadian termal dengan kebutuhan transmisi data dan pengawasan jarak jauh [2]. Park et al. menggunakan pola sinyal pada sistem deteksi kebakaran berbasis IoT dan fuzzy logic untuk membedakan kondisi yang diamati [3]. Pada domain kebakaran hutan, integrasi sensor dan *machine learning* digunakan untuk memantau temperatur serta memberikan peringatan [6].

Morchid et al. mengembangkan sistem *real-time* yang menggabungkan embedded system, sensor, Flask, dan antarmuka web [7], kemudian memperluas integrasi IoT untuk deteksi dini pada smart agriculture [8]. Udurume et al. menekankan komunikasi berlatensi rendah melalui MQTT dan ESP-NOW pada lingkungan industri [9]. Sementara itu, studi gedung dan sistem indoor menunjukkan bahwa IoT dapat dipakai sebagai lapisan pemantauan risiko dan integrasi data sensor [10], [11]. Literatur tersebut menunjukkan dua arah utama: peningkatan kecerdasan melalui lebih banyak sensor/algoritma dan peningkatan observabilitas melalui komunikasi serta *dashboard*. Penelitian ini menempati ruang yang lebih sederhana dengan mempertahankan komputasi lokal yang ringan dan menggunakan web sebagai lapisan observasi.

Tabel 1. Posisi penelitian terhadap beberapa studi terkini mengenai deteksi dan monitoring kebakaran.

Penelitian	Fokus	Teknologi utama	Relevansi terhadap penelitian
Hajovsky et al. [2]	Kejadian termal pada area industri/limbah	IoT monitoring, sensor terdistribusi	Menunjukkan pentingnya pemantauan kontinu dan pengiriman data pada kejadian termal.
Park et al. [3]	Pengenalan pola sinyal kebakaran	IoT, fuzzy logic	Menegaskan bahwa pola perubahan sensor dapat menjadi dasar keputusan, bukan hanya nilai tunggal.
Morchid et al. [7]	Deteksi kebakaran real-time	Embedded system, Flask, web	Mendukung pemisahan fungsi akuisisi/pemrosesan dan monitoring web.
Chan et al. [4]	Survey IoT untuk early wildfire detection	Ground sensing, IoT, analitik	Menempatkan latency, akurasi, energi, dan komunikasi sebagai isu desain utama.
Udurume et al. [9]	Monitoring kebakaran industri	MQTT, ESP-NOW, REM	Menunjukkan arah komunikasi IoT rendah-latensi dan skalabel.
Qin et al. [5]	Ultra-early detection dan lokalisasi	Algoritma deteksi dini, parameter termal	Menunjukkan relevansi temperature-rise rate sebagai pembanding pada peringatan sangat dini.

Celah Penelitian dan Posisi Kontribusi

Penelitian sistem deteksi kebakaran berbasis IoT telah memanfaatkan sensor majemuk, logika fuzzy, analitik cerdas, dan jaringan komunikasi [2]–[13]. Akan tetapi, integrasi analitik temporal sederhana dan keputusan lokal dengan pemantauan berbasis web masih relevan bagi prototipe yang dibatasi biaya dan sumber daya. Penelitian ini memusatkan kontribusi pada implementasi pipeline akuisisi suhu–SMA–RoR–alarm lokal–gateway–dashboard serta evaluasi fungsional dan penerimaan awal. Prinsip RoR bukan temuan baru; nilai tambah yang ditawarkan adalah integrasi arsitektur dan pembahasan keterbatasan pemrosesan temporal pada sensor beresolusi rendah.

METODOLOGI

Desain Penelitian dan Arsitektur Sistem

Penelitian memakai pendekatan pengembangan dan evaluasi awal prototipe. Tahapannya mencakup perancangan rangkaian Arduino Uno–DHT11, implementasi komputasi SMA dan RoR, pengaturan alarm lokal, perantara data melalui host, serta visualisasi pada dashboard web. Interval pembacaan pada program dinyatakan nominal sekitar satu detik, tetapi pembaruan aktual sensor belum dibuktikan dengan log bertimestamp. Karena itu, hasil yang ditampilkan adalah bukti demonstrasi integrasi dan dokumentasi evaluasi awal, bukan penilaian performa sistem keselamatan.

Rancangan evaluasi mencakup pengujian fungsional rangkaian, peninjauan urutan pemrosesan, perbandingan deskriptif catatan waktu aktivasi metode RoR dan pembanding suhu tetap, serta kuesioner penerimaan awal. Dokumentasi pengujian yang tersedia memuat angka ringkasan, namun tidak mencakup set point suhu pembanding, log tiap pengulangan, kondisi termal terukur, atau pasangan timestamp yang diperlukan untuk membuktikan kesetaraan skenario. Karena itu, perbandingan waktu diperlakukan sebagai pengamatan pendahuluan dan tidak digunakan untuk menyimpulkan keunggulan algoritma secara statistik.

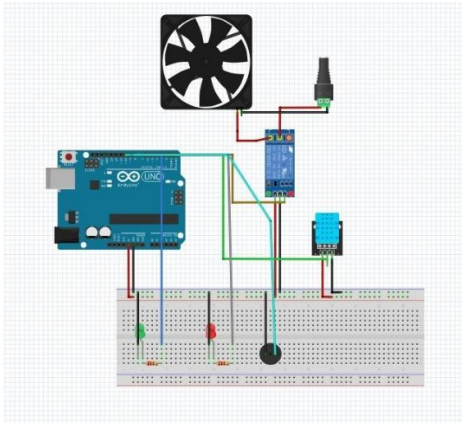
Dalam desain validasi yang dapat direplikasi, latensi didefinisikan sebagai selisih antara saat alarm aktif dan saat sumber pemanasan diaktifkan secara independen, yaitu $L_i = t_alarm,i - t_{o},i$. Dua algoritma sebaiknya dijalankan pada aliran sensor identik dengan titik awal t_{o},i yang sama; sumber panas, posisi sensor, ventilasi, dan kondisi awal dipertahankan setara. Persyaratan tersebut menjadi acuan interpretasi dan validasi lanjutan, bukan prosedur yang diklaim telah dibuktikan dengan log penelitian ini.

Keputusan alarm ditempatkan pada sisi perangkat agar tidak bergantung pada koneksi maupun kecepatan rendering *dashboard*. Ketika kondisi bahaya terpenuhi, buzzer dan LED diaktifkan, sedangkan relay mengendalikan aktuator demonstrasi. Kipas pada rangkaian hanya digunakan sebagai beban/aktuator untuk memverifikasi fungsi relay dan tidak

dimaknai sebagai metode pemadaman kebakaran. Pada implementasi keselamatan nyata, jenis aktuator harus ditentukan sesuai rancangan proteksi kebakaran dan karakteristik ruang. Arduino Uno tidak memiliki konektivitas jaringan bawaan; karena itu, pada prototipe ini komputer *host* berfungsi sebagai *gateway* antara perangkat dan antarmuka web. Konfigurasi tersebut tetap memungkinkan observasi berbasis jaringan pada lapisan aplikasi, tetapi berbeda dari node IoT mandiri seperti ESP32/MQTT. Batasan arsitektur ini dinyatakan secara eksplisit agar klaim sistem sesuai dengan implementasi yang tersedia.

Rancangan Perangkat Keras

Sensor DHT11 terhubung pada pin digital 2 Arduino Uno. Relay dikendalikan melalui pin 7, LED hijau pin 8, LED merah pin 9, dan buzzer pin 10. Sensor dipilih karena biaya dan kemudahan integrasinya, bukan karena memenuhi kebutuhan deteksi kebakaran yang tersertifikasi. Datasheet DHT11 menyebut resolusi suhu 1 °C, akurasi sekitar ±2 °C, rentang ukur 0–50 °C, dan respons termal yang dapat berlangsung beberapa hingga puluhan detik menurut kondisi pengujian [14]. Interval sampling yang diprogram pada kisaran satu detik perlu dibedakan dari waktu tanggap fisik sensor. Dengan demikian, klaim deteksi sejak sumber panas pertama diaktifkan harus memeriksa dinamika sensor, timestamp dan cache pustaka pembacaan; asumsi bahwa setiap pembacaan mewakili suhu lingkungan terbaru tidak dapat diterima tanpa verifikasi.

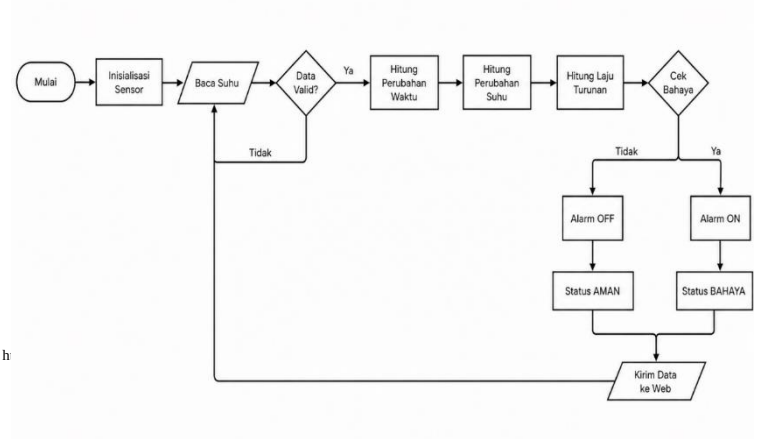


Gambar 1. Rancangan perangkat keras prototipe berbasis Arduino Uno, DHT11, relay, LED, buzzer, dan aktuator demonstrasi.

Algoritma Pemrosesan dan Logika Keputusan

Pada rancangan algoritma, sampel suhu yang berhasil dibaca dimasukkan ke buffer untuk memperoleh SMA lima sampel. Estimasi RoR dari dua SMA berturutan mengikuti Persamaan (3). Jika hasil estimasi mencapai 0,8 °C/s, perangkat dirancang mengubah status alarm dan mengaktifkan indikator lokal. Ambang ini hanya parameter demonstrasi yang belum dikalibrasi terhadap kejadian kebakaran atau standar detektor panas. Tanpa log serial mentah, belum dapat dipastikan apakah pemeriksaan keunikan pembacaan dan pemakaian timestamp aktual selalu terlaksana pada tiap siklus. Identitas aljabar untuk SMA berjendela lima sampel dengan interval konstan Δt memperlihatkan bahwa $r_k = (T_k - T_{k-5})/(5\Delta t)$; artinya RoR dari dua SMA berurutan bergantung pada dua sampel suhu mentah yang terpisah lima interval, bukan hanya perubahan dua suhu terbaru. Pada Δt=1 s, pemicu $r_k \geq 0{,}8$ °C/s mensyaratkan $T_k - T_{k-5} \geq 4$ °C. Dengan pembacaan DHT11 beresolusi 1 °C, gradien hasil perhitungan berubah dalam langkah sekitar 0,2 °C/s untuk interval yang benar-benar satu detik. Implikasi ini perlu dicocokkan dengan deret waktu asli. Jika interval tidak seragam, persamaan penyederhanaan di atas tidak berlaku persis dan Persamaan (3) dengan timestamp sebenarnya harus digunakan.

Dengan buffer kosong, sedikitnya enam sampel valid diperlukan untuk memperoleh dua SMA penuh yang berturutan. Oleh karena itu, waktu pemanasan buffer harus dibedakan dari waktu antara kejadian termal dan aktivasi alarm. Ringkasan 2,4 detik tidak dapat dievaluasi konsistensinya tanpa informasi keadaan buffer pada awal pengujian, t_0, pembaruan fisik sensor, dan log peristiwa. Naskah ini tidak mengasumsikan bahwa respons tersebut telah tervalidasi.



Gambar 2. Flowchart akuisisi suhu, smoothing, perhitungan RoR, keputusan lokal, dan pengiriman data ke web.

Antarmuka Monitoring Web

Dashboard web dirancang sebagai lapisan observabilitas. Informasi utama meliputi suhu aktual, nilai RoR, status sistem, grafik *time-series*, dan log peristiwa. Pemisahan fungsi ini penting: *dashboard* menyediakan pemantauan dan interpretasi, sedangkan alarm dasar tetap diputuskan pada mikrokontroler. Dengan demikian, kegagalan atau keterlambatan pada sisi antarmuka tidak mengubah logika aktivasi lokal. Arsitektur seperti ini sejalan dengan prinsip bahwa fungsi keselamatan kritis sebaiknya tidak sepenuhnya bergantung pada layanan visualisasi jarak jauh.

Prosedur Pengujian dan Evaluasi

Pengujian fungsional dilakukan pada demonstrasi perubahan suhu dan pengamatan status alarm serta dashboard. Laporan awal mencantumkan rerata respons 2,4 detik untuk konfigurasi RoR dan 7,1 detik untuk konfigurasi pembanding berbasis suhu tetap. Nilai ambang pembanding, jumlah pengulangan, karakteristik pemanasan, serta catatan waktu individual tidak disertakan dalam dokumen eksperimen. Oleh sebab itu, kedua rerata disajikan sebagai data laporan awal, bukan estimasi performa yang telah diverifikasi melalui uji berpasangan.

Perbedaan kedua rerata yang dilaporkan ialah 4,7 detik dan besaran reduksi relatif yang dihitung terhadap rerata pembanding adalah 66,2%. Keduanya merupakan besaran turunan aritmetis, bukan nilai signifikansi statistik ataupun estimasi efektivitas deteksi kebakaran. Tanpa log per pengulangan, ukuran sampel, dan definisi awal pencatatan yang dapat diaudit, ketidakpastian dan reprodusibilitas perbandingan belum dapat dinilai.

Perhitungan deskriptif dilakukan menggunakan Persamaan (4), dengan t_b untuk rerata waktu respons pembanding dan t_r untuk rerata waktu respons RoR. Tidak dilakukan uji hipotesis, estimasi interval kepercayaan, atau penghitungan sensitivitas maupun false alarm rate karena data yang dibutuhkan tidak tersedia.

$$R_resp = ((t_b - t_r) / t_b) \times 100\% \qquad (4)$$

Selain pengujian teknis, dilakukan evaluasi pengguna awal terhadap lima responden menggunakan skala 1–5. Aspek yang dinilai adalah kecepatan sistem menurut persepsi pengguna, ketepatan peringatan menurut persepsi pengguna, kemudahan penggunaan, kejelasan *dashboard*, dan kesesuaian prototipe untuk ruang yang memerlukan pemantauan termal. Evaluasi ini diperlakukan sebagai penilaian awal terhadap fungsi dan antarmuka, bukan validasi ahli maupun pengukuran akurasi deteksi.

Kerangka Validasi dan Keterlacakan Metrik

Keterlacakan dibagi menjadi: (i) konfigurasi yang diklaim—interval baca nominal 1 Hz, jendela SMA n=5, dan ambang RoR 0,8 °C/s; (ii) angka ringkasan terlapor—2,4 s pada RoR dan 7,1 s pada baseline; (iii) hasil hitung dari ringkasan—selisih 4,7 s, reduksi 66,2%, dan rasio 2,96; serta (iv) penilaian persepsi lima pengguna dengan rerata 4,16/5. Kategori (ii) belum dapat diverifikasi dari rekaman per-trial maupun konfigurasi baseline; kategori (iii) hanya benar sebagai operasi aritmetika atas (ii). Data persepsi tidak digunakan untuk menyimpulkan sensitivitas, spesifisitas, atau keamanan deteksi.

Kriteria rekayasa yang dapat dibahas dari demonstrasi prototipe meliputi aliran sensor–pemrosesan–alarm lokal–gateway–dashboard dan kemampuan menampilkan suhu, RoR, status serta log. Kriteria validasi komparatif yang belum terpenuhi adalah set point baseline eksplisit, timestamp awal bersama, rincian kondisi eksperimen, data pembacaan asli, status buffer, bukti pembaruan suhu aktual, dan hasil trial berulang. Oleh sebab itu demonstrasi integrasi perangkat tidak boleh digabungkan dengan klaim bahwa algoritma telah terbukti unggul secara eksperimental.

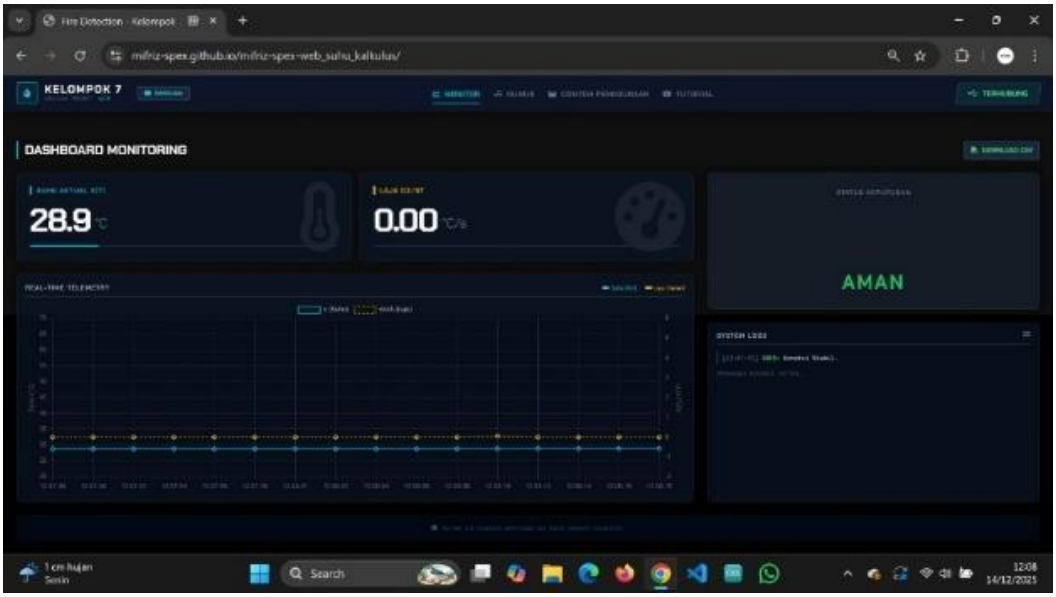
Analisis inferensial tidak diterapkan karena log per-trial, simpangan baku, distribusi latency, dan jumlah pengulangan yang lengkap tidak tersedia pada dataset eksperimen yang didokumentasikan. Oleh sebab itu, artikel menggunakan ukuran efek deskriptif dan membatasi kesimpulan pada konfigurasi serta skenario uji yang tersedia. Sensitivity, specificity, precision, false-positive rate, false-negative rate, dan confusion matrix juga tidak dihitung karena penelitian belum memiliki ground truth kelas kebakaran/non-kebakaran yang memadai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem dan Dashboard Monitoring

Implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen utama dapat bekerja dalam satu alur yang konsisten: sensor menghasilkan data temperatur, mikrokontroler menjalankan *smoothing* dan perhitungan RoR, logika keputusan

mengubah status, aktuator lokal memberikan indikator, dan *host* menampilkan hasil pada *dashboard* web. Integrasi ini penting karena nilai tambah sistem tidak hanya berada pada satu komponen, tetapi pada keterhubungan antara sensing, analitik, keputusan, dan observasi. Pada kondisi normal, *dashboard* menampilkan temperatur aktual dan RoR mendekati nol, sedangkan status berada pada keadaan AMAN. Tampilan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



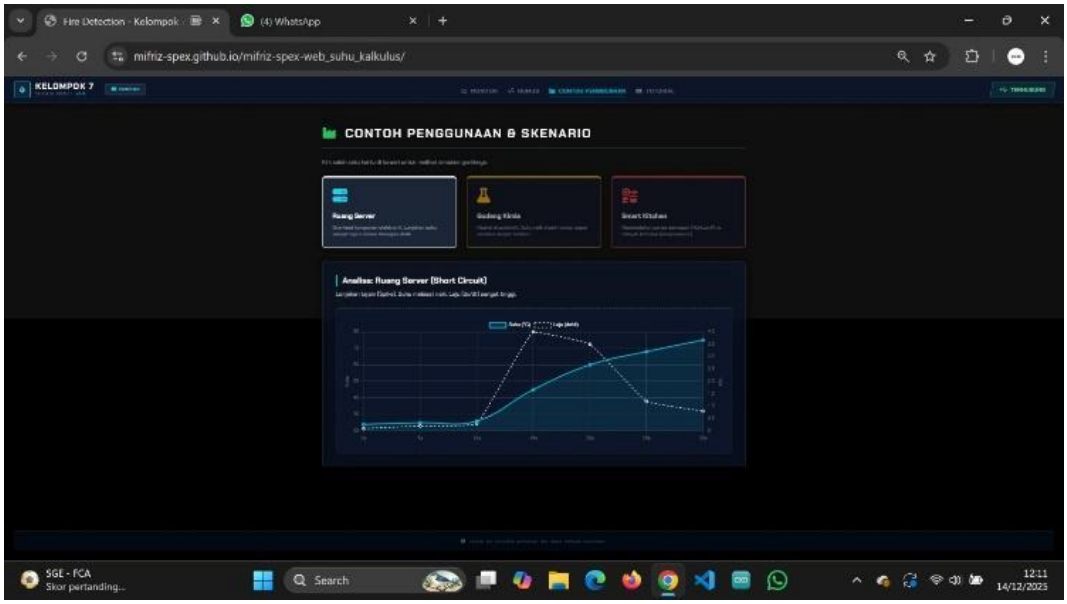
Gambar 3. Dashboard monitoring yang menampilkan suhu aktual, RoR, status, grafik, dan log sistem.

Dari sisi rekayasa perangkat lunak, keberadaan nilai RoR membuat antarmuka tidak sekadar menampilkan angka suhu. Pengguna dapat melihat dua konteks secara bersamaan: keadaan termal saat ini dan dinamika perubahannya. Dua temperatur yang sama dapat memiliki makna berbeda apabila salah satunya stabil dan yang lain sedang meningkat cepat. Informasi temporal tersebut menjadi argumen utama penggunaan RoR sebagai fitur tambahan. Dalam prototipe ini, *dashboard* berfungsi sebagai alat bantu interpretasi dan audit visual terhadap keputusan yang telah dibuat oleh mikrokontroler.

Arsitektur *host* sebagai *gateway* juga memiliki implikasi praktis. Kelebihannya adalah prototipe dapat dibangun dengan Arduino Uno tanpa menambah modul jaringan, sehingga biaya dan kompleksitas implementasi rendah. Kelemahannya adalah komputer *host* harus aktif agar monitoring web tersedia. Kondisi ini berbeda dari rancangan berbasis ESP32 atau node MQTT yang dapat berkomunikasi langsung melalui jaringan. Dengan demikian, istilah IoT pada prototipe merujuk pada arsitektur sensing-pemrosesan-*gateway*-aplikasi, bukan pada konektivitas nirkabel langsung dari Arduino Uno. Penegasan ini membuat ruang kontribusi penelitian lebih jelas dan menghindari generalisasi arsitektur yang tidak sesuai perangkat.

Karakteristik RoR pada Skenario Kenaikan Suhu

Gambar 4 merupakan ilustrasi visualisasi perubahan termal pada antarmuka. Dokumen awal menyebut rentang suhu sekitar 28–35 °C dalam skenario demonstrasi, tetapi tidak memberikan deret waktu mentah untuk memastikan kapan dan bagaimana ambang RoR tercapai. Pada interval sampel yang seragam sebesar satu detik, SMA lima sampel dengan ambang 0,8 °C/s membutuhkan selisih T_k dan T_{k-5} sekurang-kurangnya 4 °C. Pernyataan tersebut adalah konsekuensi matematis konfigurasi, bukan hasil pengukuran tambahan.



Gambar 4. Contoh visualisasi skenario kenaikan suhu dan perubahan laju pada antarmuka sistem.

Gambar 4 menggambarkan cara antarmuka menyajikan data suhu dan fitur laju perubahan secara bersamaan. Visualisasi ini mendukung keterbacaan keputusan prototipe, tetapi tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan ketepatan waktu alarm atau karakteristik gradien fisik tanpa deret data sumber yang dapat diaudit. Prinsip rate-of-rise pada literatur sensor panas [1], [5] menjadi dasar konseptual, bukan validasi ambang yang diterapkan pada DHT11.

SMA n=5 meredam variasi pembacaan tetapi juga mengintroduksi efek perataan waktu. Pada implementasi ini, selisih dua SMA setara dengan perbedaan T_k dan T_{k-5} yang dibagi lima interval bila sampling seragam. Oleh sebab itu, ambang 0,8 °C/s harus dibahas sebagai lonjakan terukur empat derajat dalam lima interval, bukan sebagai estimasi presisi dinamika kebakaran aktual. Ukuran jendela belum dioptimasi dan pengaruhnya terhadap false alarm serta delay belum diuji secara terpisah.

Ketelitian pembacaan suhu DHT11 yang diskrit (resolusi 1 °C) dan respons termalnya yang lambat [14] membatasi reliabilitas estimasi gradien per detik. Ambang RoR 0,8 °C/s tidak boleh dikonversi begitu saja menjadi karakteristik fisik per menit karena respons termal dan efek SMA tidak linear terhadap dinamika sesungguhnya. Selain itu, angka 2,4 s harus dicermati: jika dihitung sejak awal paparan sumber panas, kecepatan tersebut perlu bukti timestamp dan profil suhu yang kuat; jika dihitung sejak pembacaan mulai melonjak, ia mengukur keterlambatan keputusan setelah sensor merespons, bukan keseluruhan *time-to-detection*. Perbedaan definisi ini menentukan makna hasil.

Evaluasi Waktu Respons terhadap Baseline Ambang Tetap

Ringkasan terdahulu mencantumkan rerata waktu aktivasi 2,4 detik (RoR) dan 7,1 detik (ambang suhu tetap). Selisihnya 4,7 detik dan perbandingan aritmetis terhadap angka pembanding adalah 66,2%. Namun, tidak terdapat set point suhu pembanding, definisi t_0 yang seragam, jumlah dan pasangan ulangan, maupun rekaman pengukuran individual. Karena itu, angka tersebut dilaporkan untuk transparansi dokumentasi awal saja dan tidak dijadikan bukti peningkatan performa atau kesimpulan komparatif.

Tabel 2. Ringkasan parameter dan hasil evaluasi respons prototipe.

Parameter	Hasil	Interpretasi
Frekuensi sampling	1 Hz	Konfigurasi akuisisi pada prototipe.
Jendela SMA	n = 5	Mereduksi fluktuasi jangka pendek sebelum diferensiasi.
Ambang RoR prototipe	0,8 °C/s	Pemicu peringatan pada skenario uji; bukan ambang standar.
Waktu respons metode RoR	2,4 s (laporan awal)	Rerata terlapor; belum didukung log per-trial dan definisi t_0.
Waktu respons baseline	7,1 s (laporan awal)	Rerata terlapor; set point baseline tidak tersedia.
Selisih relatif aritmetis	66,2%	66,2% dari rerata terlapor; bukan bukti keunggulan yang tervalidasi.

Secara matematis rasio 7,1/2,4 ≈ 2,96, tetapi interpretasi angka ini sebatas perbandingan dua rerata terlapor. Tanpa n, timestamp, set point baseline dan identitas trial, rasio, reduksi 66,2%, maupun selisih 4,7 s tidak cukup untuk menyatakan signifikansi, efektivitas komparatif, atau generalisasi. Risiko khusus muncul dari pemanasan awal SMA, kuantisasi data

suhu, caching library, serta perlambatan termal DHT11. Evaluasi ulang harus mengumpulkan waktu t_0, t_RoR, t_baseline dan suhu mentah pada setiap trial serta melaporkan distribusinya.

Perbandingan Karakteristik dengan Pendekatan Ambang Tetap

Perbandingan pada Tabel 3 menunjukkan perbedaan dasar keputusan antara ambang suhu tetap dan metode SMA–RoR. Ambang tetap menilai level suhu, sedangkan RoR menilai perubahan antarwaktu setelah perataan. Perbedaan tersebut merupakan karakteristik rancangan, bukan bukti bahwa satu metode selalu lebih akurat atau lebih aman.

Tabel 3. Perbandingan karakteristik baseline ambang tetap dan sistem usulan.

Aspek	Ambang Suhu Tetap	Sistem Usulan (SMA + RoR + Web)
Dasar keputusan	Suhu mencapai set point.	Laju kenaikan suhu setelah smoothing.
Respons terhadap kenaikan cepat	Berpotensi menunggu hingga set point tercapai.	Dapat aktif berdasarkan gradien sebelum suhu absolut tinggi.
Penanganan noise	Bergantung karakteristik sensor dan threshold.	SMA n=5 diterapkan sebelum diferensiasi.
Monitoring	Tidak melekat pada logika sederhana.	Dashboard menampilkan suhu, RoR, status, grafik, dan log.
Aktuasi lokal	Alarm berdasarkan threshold.	Buzzer, LED, relay, dan aktuator demonstrasi.
Keterbatasan	Thermal lag dan ketergantungan set point.	Sensitif terhadap kualitas sensor dan pemilihan ambang RoR.

Namun, RoR bukan pengganti sempurna bagi ambang tetap. Kebakaran yang berkembang lambat dapat menghasilkan gradien kecil sehingga pemicu RoR saja berpotensi terlambat. Sebaliknya, perubahan temperatur non-kebakaran yang sangat cepat dapat memicu RoR. Pada desain heat detector komersial, pendekatan *rate-of-rise* sering dipadukan dengan mekanisme temperatur tetap untuk memberikan cakupan terhadap skenario pertumbuhan cepat dan lambat [1]. Berdasarkan prinsip tersebut, pengembangan berikutnya dapat mempertimbangkan logika hibrida OR/AND atau adaptive threshold yang dikalibrasi menggunakan data uji nyata.

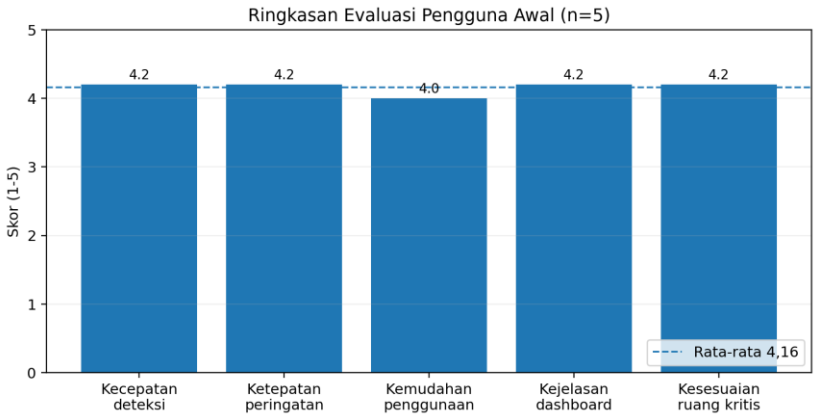
Evaluasi Pengguna Awal

Evaluasi pengguna awal menghasilkan rata-rata keseluruhan 4,16 dari skala 5 atau 83,2% dari skor maksimum. Kecepatan deteksi, persepsi ketepatan peringatan, kejelasan *dashboard*, dan kesesuaian untuk ruang kritis masing-masing memperoleh skor 4,2, sedangkan kemudahan penggunaan memperoleh skor 4,0. Tabel 4 dan Gambar 5 merangkum hasil tersebut.

Tabel 4. Ringkasan hasil evaluasi pengguna awal (n=5).

Aspek evaluasi	Skor rata-rata	Interpretasi
Kecepatan sistem mendeteksi kenaikan suhu	4,2	Baik–sangat baik
Ketepatan peringatan menurut persepsi pengguna	4,2	Baik–sangat baik
Kemudahan penggunaan	4,0	Baik
Kejelasan tampilan dashboard	4,2	Baik–sangat baik
Kesesuaian untuk ruang kritis	4,2	Baik–sangat baik
Rata-rata keseluruhan	4,16	83,2% dari skor maksimum

Skor penilaian awal memberi indikasi bahwa tampilan dan fungsi sistem dapat dipahami oleh lima responden yang dilibatkan. Nilai tersebut merefleksikan persepsi pengguna terhadap demonstrasi, bukan ukuran usability populasi luas, akurasi alarm, atau kesesuaian prototipe untuk ruang dengan risiko kebakaran. Kehadiran suhu dan RoR pada satu antarmuka merupakan pilihan penyajian informasi yang dapat diuji lebih lanjut.



Gambar 5. Visualisasi skor evaluasi pengguna awal.

Meskipun demikian, evaluasi ini memiliki ruang lingkup yang terbatas. Lima responden tidak cukup untuk menyimpulkan usability pada populasi luas, dan persepsi 'ketepatan peringatan' bukan ukuran akurasi teknis. Akurasi deteksi memerlukan *ground truth* kejadian, definisi kelas, jumlah trial memadai, serta metrik seperti sensitivity, specificity, false-positive rate, false-negative rate, precision, dan confusion matrix. Karena data tersebut belum tersedia, hasil kuesioner hanya digunakan untuk menilai penerimaan awal terhadap prototipe dan antarmuka. Pemisahan antara evaluasi pengguna dan validasi teknis penting agar artikel tidak mengubah persepsi menjadi klaim performa algoritmik.

Matriks Keterlacakan Kontribusi dan Bukti

Untuk memperjelas hubungan antara kontribusi yang diklaim dan bukti yang tersedia, Tabel 5 memetakan setiap kontribusi terhadap indikator hasil serta batas interpretasinya. Matriks ini penting agar klaim artikel tetap sebanding dengan kekuatan data yang tersedia.

Tabel 5. Matriks keterlacakan kontribusi, bukti empiris, dan batas klaim.

Kontribusi	Bukti/indikator	Temuan yang didukung	Batas klaim
SMA + RoR sebagai analitik temporal	Persamaan (2)–(3), konfigurasi n=5 dan ambang 0,8 °C/s, Tabel 2, Gambar 4	Rumus dan komponen pipeline dapat ditelusuri; dua rerata waktu hanya tercatat sebagai ringkasan.	Set point baseline, t_0, kondisi sensor, dan paired trial tidak tersedia; klaim keunggulan belum tervalidasi.
Keputusan dan aktuasi lokal	Flowchart Gambar 2 dan implementasi buzzer/LED/relay	Alarm dasar diputuskan pada perangkat tanpa menunggu rendering dashboard	Membuktikan integrasi fungsional, bukan reliabilitas atau fail-safe tersertifikasi
Monitoring web	Gambar 3–4; suhu, RoR, status, grafik, dan log	Dashboard meningkatkan observabilitas terhadap keadaan dan dinamika termal	Belum mengevaluasi availability jaringan, keamanan komunikasi, atau latency web secara terpisah
Penerimaan pengguna awal	Tabel 4; n=5; skor keseluruhan 4,16/5	Fungsi dan tampilan memperoleh penerimaan awal yang positif	Bukan validasi ahli, bukan pengukuran akurasi, dan belum mewakili populasi luas
Reproduksibilitas prototipe	Deskripsi arsitektur, persamaan, flowchart, dan URL antarmuka	Konfigurasi konseptual dapat ditelusuri dan antarmuka dapat diperiksa	Reproduksi penuh tetap memerlukan source code, konfigurasi gateway, dan log eksperimen mentah

Perbedaan antara keluaran komputasi dan kondisi fisik merupakan aspek penting pada evaluasi prototipe. Status peringatan dapat berubah ketika angka RoR memenuhi aturan perangkat lunak, tetapi perubahan status tersebut belum membuktikan bahwa kejadian kebakaran telah dikenali. Demikian pula, tersedianya grafik pada dashboard menunjukkan fungsi penyajian, bukan keandalan akuisisi secara terus-menerus. Pengujian berikutnya perlu menyediakan deret temperatur mentah dengan penanda waktu, nilai temperatur sebelum dan sesudah pemanasan, interval pengambilan aktual, serta catatan perubahan status dan aktuator. Semua informasi itu diperlukan untuk membedakan keterlambatan respons sensor, pengolahan data, dan aktivasi alarm. Data dari skenario kenaikan suhu non-kebakaran juga penting agar konsekuensi kesalahan peringatan dapat dibahas tanpa mencampuradukkan keterbacaan antarmuka dengan keselamatan operasional.

Pembahasan terhadap Literatur dan Implikasi Rekayasa

Literatur deteksi kebakaran berbasis IoT memperlihatkan pendekatan fuzzy logic, multi-sensor, serta pemantauan web [3], [7]–[9]. Kontribusi artikel ini lebih terbatas: menampilkan rancangan dan demonstrasi pipeline temporal sederhana dengan keputusan lokal serta antarmuka web melalui komputer gateway. Kelebihan algoritmik dan keandalan terhadap solusi terdahulu belum dibandingkan menggunakan protokol pengujian yang sepadan.

Dari perspektif *edge analytics*, keputusan lokal mengurangi ketergantungan pada jaringan. Hal ini relevan karena *latency* komunikasi dan ketersediaan koneksi merupakan isu penting pada arsitektur IoT peringatan dini [4], [12]. Pada prototipe, *host* hanya diperlukan untuk monitoring, bukan untuk menentukan alarm. Konfigurasi ini merupakan prinsip desain yang baik untuk eksperimen keselamatan, walaupun perangkat Arduino Uno sendiri belum dapat disebut node IoT mandiri. Migrasi ke ESP32 atau platform sejenis akan memungkinkan pengiriman langsung melalui MQTT/HTTPS dan dapat mengurangi ketergantungan pada komputer *gateway*.

Perbedaan rerata yang terlapor sebesar 66,2% tidak diperlakukan sebagai temuan keunggulan sistem karena kondisi dua pengujian belum dapat dipastikan sebanding. RoR tunggal berpotensi dipicu pemanasan non-kebakaran dan berpotensi tidak aktif pada pemanasan yang lambat. Oleh sebab itu, riset berikutnya perlu menyediakan pengukuran berulang, skenario positif/negatif, dan indikator false alarm sebelum menyimpulkan manfaat deteksi [1], [13].

Penggunaan DHT11 juga perlu dibaca sebagai keputusan prototyping. Sensor tersebut memudahkan integrasi dan demonstrasi, tetapi bukan pilihan ideal untuk evaluasi keselamatan yang presisi. Sensor dengan respons lebih cepat, resolusi lebih tinggi, dan karakteristik terkalibrasi akan memberikan estimasi turunan yang lebih stabil. Perubahan sensor dapat memengaruhi SMA, RoR, dan ambang; karena itu, ketiga komponen tersebut harus dikalibrasi sebagai satu kesatuan, bukan dipindahkan secara langsung dari prototipe ini.

Dalam konteks penelitian Ilmu Komputer, kontribusi utama terletak pada transformasi data sensor menjadi informasi keputusan dan pada integrasi pipeline sistem. Persamaan turunan digunakan sebagai operasi komputasi untuk ekstraksi fitur. Dengan framing tersebut, artikel tidak menjadikan kalkulus sebagai fokus terpisah, melainkan menghubungkannya dengan data acquisition, preprocessing, local decision, actuation, dan web monitoring. Posisi ini lebih konsisten dengan kajian IoT dan embedded analytics, sekaligus menunjukkan jalur pengembangan menuju adaptive threshold atau *machine learning* ketika dataset yang cukup telah tersedia.

Secara keseluruhan, temuan mendukung penggunaan RoR sebagai indikator pendamping pada prototipe, tetapi belum mendukung klaim bahwa sistem siap untuk instalasi keselamatan. Perangkat keselamatan memerlukan pengujian terstandar, redundansi, pengendalian kegagalan, karakterisasi *false alarm*, kalibrasi sensor, keamanan komunikasi, serta prosedur fail-safe. Karena itu, hasil penelitian paling tepat digunakan sebagai dasar eksperimen lanjutan, media pembelajaran rekayasa IoT, dan titik awal pengembangan sistem monitoring termal yang lebih kuat.

Ancaman terhadap Validitas

Validitas konstruk: asal t_0 dan definisi waktu aktivasi belum dapat diperiksa terhadap log sehingga yang disebut waktu respons mungkin hanya interval algoritmik setelah perubahan suhu terbaca, bukan waktu sejak pemanasan fisik dimulai. Validitas internal: set point baseline belum disebutkan, keadaan buffer awal tidak diketahui, sumber dan jarak panas tidak terstandardisasi dalam laporan, data per-trial tidak tersedia, dan cache pustaka pembaca DHT11 dapat memengaruhi pembaruan data. Validitas pengukuran: resolusi suhu DHT11 sebesar 1 °C dan respons termal yang lambat membatasi estimasi RoR pada resolusi waktu nominal 1 Hz; hasil 2,4 s membutuhkan audit sumber waktunya. Validitas eksternal: satu jenis sensor serta skenario demonstrasi belum mewakili kondisi kebakaran sebenarnya. Validitas kesimpulan: reduksi 66,2% hanya hubungan aritmetis antara rerata yang dilaporkan, bukan bukti statistik atas manfaat kausal metode.

Keterbatasan Penelitian dan Ketersediaan Prototipe

Keterbatasan penelitian meliputi penggunaan satu sensor dengan resolusi suhu 1 °C dan waktu tanggap fisik yang relatif lambat, tidak tersedianya log suhu dan timestamp per pengulangan, tidak terdokumentasinya ambang suhu pada pembanding, belum adanya pengujian kejadian non-kebakaran untuk mengukur false alarm, serta evaluasi pengguna yang hanya melibatkan lima responden. Batasan ini membatasi interpretasi angka waktu respons dan membuat hasil belum dapat digeneralisasi sebagai kinerja alat pendeteksi kebakaran di lapangan. Prototipe antarmuka web dapat diakses pada https://mifriz-spex.github.io/mifriz-spex-web_suhu_kalkulus/. Ketersediaan antarmuka ini mendukung reproduksibilitas pada sisi tampilan, tetapi reproduksi penuh tetap memerlukan source code mikrokontroler, konfigurasi *gateway*, dan data pengujian mentah. Pada pengembangan selanjutnya, artefak tersebut disarankan dipublikasikan dalam repositori dengan versi perangkat lunak, skema rangkaian, serta dataset eksperimen.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan dan demonstrasi fungsi awal pemantauan termal yang memadukan Arduino Uno, DHT11, SMA lima sampel, estimasi RoR, alarm lokal, host gateway, serta dashboard web. Catatan pengujian sebelumnya memuat rerata aktivasi 2,4 detik untuk konfigurasi RoR dan 7,1 detik untuk pembanding ambang tetap. Selisih 4,7 detik atau 66,2% merupakan hasil perhitungan atas angka terlapor, bukan bukti peningkatan kecepatan yang tervalidasi. Penilaian lima responden menghasilkan rerata 4,16/5 dan hanya merepresentasikan persepsi pengguna awal.

Nilai utama penelitian berada pada realisasi pipeline analitik temporal dan observabilitas web dalam prototipe sederhana. Dengan interval nominal satu detik, ambang RoR 0,8 °C/s setelah SMA lima sampel mensyaratkan kenaikan terukur minimal 4 °C dalam lima interval; karakteristik DHT11 dan tidak adanya log bertimestamp membatasi pembuktian dinamika tersebut. Sebelum klaim deteksi kebakaran dan perbandingan performa dapat dipertanggungjawabkan, diperlukan sensor yang sesuai, nilai set point baseline terdokumentasi, rekaman per-trial, pengujian kondisi normal dan gangguan, serta validasi terhadap ground truth. Prototipe belum dapat direkomendasikan sebagai perangkat keselamatan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] F. Khan, Z. Xu, J. Sun, F. M. Khan, A. Ahmed, and Y. Zhao, “Recent advances in sensors for fire detection,” Sensors, vol. 22, no. 9, Art. no. 3310, 2022, doi: 10.3390/s22093310.

[2] R. Hajovsky, M. Pies, J. Velicka, V. Slany, R. Rous, L. Danys, and R. Martinek, “Design of an IoT-based monitoring system as a part of prevention of thermal events in mining and landfill waste disposal sites: A pilot case study,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 72, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1109/TIM.2022.3225046.

[3] S. H. Park, D. H. Kim, and S. C. Kim, “Recognition of IoT-based fire-detection system fire-signal patterns applying fuzzy logic,” Heliyon, vol. 9, no. 2, Art. no. e12964, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12964.

[4] C. C. Chan, S. A. Alvi, X. Zhou, S. Durrani, N. Wilson, and M. Yebra, “A survey on IoT ground sensing systems for early wildfire detection: Technologies, challenges, and opportunities,” IEEE Access, vol. 12, pp. 172785–172819, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3501336.

[5] J. Qin, Z. Huang, X. Liu, J. Li, and W. Zhang, “Precise algorithm of ultra-early fire detection and localization for active sprinkler systems in high-rack warehouses,” Fire, vol. 9, no. 3, Art. no. 118, 2026, doi: 10.3390/fire9030118.

[6] V. Venkataramanan, G. Kavitha, M. R. Joel, and J. Lenin, “Forest fire detection and temperature monitoring alert using IoT and machine learning algorithm,” in Proc. 5th Int. Conf. Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 2023, pp. 1150–1156, doi: 10.1109/ICSSIT55814.2023.10061086.

[7] A. Morchid, R. Jebabra, A. Ismail, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, and M. Ouazzani Jamil, “IoT-enabled fire detection for sustainable agriculture: A real-time system using Flask and embedded technologies,” Results Eng., vol. 23, Art. no. 102705, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102705.

[8] A. Morchid, Z. Oughannou, R. El Alami, H. Qjidaa, M. Ouazzani Jamil, and H. M. Khalid, “Integrated Internet of Things (IoT) solutions for early fire detection in smart agriculture,” Results Eng., vol. 24, Art. no. 103392, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103392.

[9] M. Udurume, T. Hwang, R. Uddin, T. Aziz, and I. Koo, “Developing a fire monitoring system based on MQTT, ESP-NOW, and a REM in industrial environments,” Appl. Sci., vol. 15, no. 2, Art. no. 500, 2025, doi: 10.3390/app15020500.

[10] U. I. Abdullahi, W. Zhang, Y. Cao, and G. Irankunda, “Integrating IoT technology for fire risk monitoring and assessment in residential building design,” Buildings, vol. 15, no. 8, Art. no. 1346, 2025, doi: 10.3390/buildings15081346.

[11] R. N. Pietraru, A. Olteanu, M. Nicolae, and R.-A. Crăciun, “Contributions to the development of fire detection and intervention capabilities using an indoor air quality IoT monitoring system,” Sensors, vol. 25, no. 20, Art. no. 6375, 2025, doi: 10.3390/s25206375.

[12] A. A. S. AlQahtani, M. Sulaiman, T. Alshayeb, and H. Alamleh, “From inception to innovation: A comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-enabled fire safety systems,” Safety, vol. 11, no. 2, Art. no. 41, 2025, doi: 10.3390/safety11020041.

[13] M. Ali, I. Ahmad, I. Geun, S. A. Hamza, U. Ijaz, Y. Jang, J. Koo, Y.-G. Kim, and H.-D. Kim, “A comprehensive review of advanced sensor technologies for fire detection with a focus on gasistor-based sensors,” Chemosensors, vol. 13, no. 7, Art. no. 230, 2025, doi: 10.3390/chemosensors13070230.

[14] DHT11 Humidity & Temperature Sensor, Technical Data Sheet (translated version), pp. 4, 8. Available: https://www.mouser.com/datasheet/3/1374/1/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version.pdf (accessed Oct. 25, 2026).

NOMENKLATUR

$T(t)$	Temperatur sebagai fungsi waktu (°C)
$\bar{T}_k$	Temperatur hasil Simple Moving Average pada sampel ke-k (°C)
$r(t)$, r_k	Rate-of-rise temperatur (°C/s)
t_k	Waktu pengambilan sampel ke-k (s)
t_b, t_r	Waktu respons baseline dan metode RoR (s)
n	Ukuran jendela Simple Moving Average; pada prototipe n=5