

CESS

(Journal of Computer Engineering, System and Science)

Available online: <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/cess>

ISSN: 2502-714x (Print) | ISSN: 2502-7131 (Online)



Pengembangan Sistem Peringatan Dini Anomali Cuaca Berbasis Geospasial dan Asisten Virtual

Development of a Geospatial-Based Weather Anomaly Early Warning System and Virtual Assistant

Yehezkiel Haganta Tarigan¹, Yohanes Gerardus Haga Zai^{2*}, Callysa Elistia³

^{1,2,3}Ilmu Komputer, Fakultas Matematika dan Ilmu Komputer, Universitas Negeri Medan
Jl. Willem Iskandar - Pasar V, Medan Estate, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara, 20221

Email: ¹yehezkielhaganta@gmail.com, ²yohanesgerardushagazai@gmail.com,
³callysaelistia@gmail.com

*Corresponding Author

ABSTRAK

Sistem peringatan dini cuaca konvensional saat ini masih memiliki keterbatasan akibat penyampaian informasi satu arah yang statis dan tingginya beban kognitif masyarakat dalam memahami data meteorologis mentah. Penelitian ini bertujuan mengembangkan WAMApp (*Weather Anomaly Mitigation App*), sebuah sistem peringatan dini berbasis seluler yang menyinergikan pemetaan geospasial dinamis dengan agen kecerdasan buatan interaktif. Pengembangan aplikasi menerapkan model *Agile* dan arsitektur *microservices*, mengintegrasikan data cuaca resolusi tinggi ERA5 dari *Open-Meteo* dengan asisten virtual berbasis *Retrieval-Augmented Generation* (RAG). Untuk mengoptimalkan efisiensi daya perangkat seluler, sistem mengimplementasikan algoritma pelacakan lokasi latar belakang dengan ambang batas pergerakan 500 meter dan memanfaatkan komputasi tepi nirserver (*serverless edge computing*) untuk distribusi notifikasi bahaya. Hasil pengujian fungsionalitas *Black Box* membuktikan bahwa seluruh modul berjalan optimal tanpa kendala teknis. Integrasi RAG pada asisten virtual WAMChat memungkinkan penyajian instruksi mitigasi yang lebih interaktif dan kontekstual berdasarkan kondisi cuaca pengguna. Hasil evaluasi melalui *User Acceptance Testing* (UAT) terhadap 102 responden menunjukkan tingkat kepuasan pengguna sebesar 4,60 dari skala 5. Temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi visualisasi geospasial dan asisten virtual generatif memiliki potensi untuk mendukung penyampaian informasi mitigasi cuaca secara lebih adaptif dan mudah dipahami.

Kata Kunci: *peringatan dini; hidrometeorologi; RAG; microservices; User Acceptance Testing.*



ABSTRACT

Conventional weather early warning systems still face significant limitations due to their reliance on static, one-way information dissemination and the high cognitive burden placed on the public in interpreting raw meteorological data. This study aims to develop WAMApp (Weather Anomaly Mitigation App), a mobile-based early warning system that integrates dynamic geospatial mapping with an interactive artificial intelligence agent. The application was developed using the Agile methodology and a microservices architecture, integrating high-resolution ERA5 weather data from Open-Meteo with a Retrieval-Augmented Generation (RAG)-based virtual assistant. To optimize mobile device power efficiency, the system implements a background location-tracking algorithm with a 500-meter movement threshold and utilizes serverless edge computing for hazard notification delivery. Black Box testing results demonstrated that all system modules operated as intended without significant technical issues. The integration of RAG into the WAMChat virtual assistant enables the delivery of more interactive and context-aware mitigation instructions tailored to users' weather conditions. Furthermore, User Acceptance Testing (UAT) involving 102 respondents revealed an overall user satisfaction score of 4.60 out of 5.00. These findings indicate that the combination of geospatial visualization and a generative virtual assistant has the potential to support the delivery of weather mitigation information in a more adaptive and user-friendly manner.

Keywords: *early warning; hydrometeorology; RAG; microservices; User Acceptance Testing.*

1. PENDAHULUAN

Intensitas anomali cuaca ekstrem seperti fluktuasi suhu permukaan dan kejadian curah hujan yang tidak wajar terus mengalami eskalasi, memicu rentetan bencana hidrometeorologi yang mengancam keselamatan jiwa dan infrastruktur [1], [2]. Fenomena ini secara empiris menuntut keberadaan sistem peringatan dini (*early warning system*) yang adaptif dan berpresisi tinggi untuk mereduksi risiko kerugian secara masif [3], [4]. Menjawab tantangan tersebut, inisiatif global seperti *Early Warnings for All* (EW4All) menekankan pentingnya peringatan darurat yang mampu menjangkau setiap individu (*last-mile connectivity*) melalui pendekatan multi-saluran [5]. Namun demikian, realisasi dari perlindungan menyeluruh ini kerap terhambat oleh infrastruktur manajemen krisis yang masih sangat mengandalkan diseminasi informasi satu arah.

Infrastruktur peringatan dini konvensional yang ada saat ini memiliki keterbatasan fundamental yang bermuara pada inefisiensi mitigasi. Pertama, deteksi anomali pada sensor tunggal sering kali menghasilkan alarm palsu akibat bias probabilitas distribusi, sehingga validasi spasial berbasis konsensus dari berbagai sensor terdekat (*majority decision*) menjadi suatu keharusan [6], [7]. Kedua, penyampaian informasi didominasi oleh format penyiaran statis (*broadcasting*) yang sekadar menyajikan parameter meteorologis mentah. Ketidadaan injeksi konteks geospasial lokal serta tingginya beban kognitif yang dituntut dari masyarakat awam untuk menerjemahkan angka teknis menjadi tindakan evakuasi sering kali memicu penundaan respons pada situasi kritis [8].

Dalam literatur, integrasi antara LLM dengan dataset meteorologi reanalisis resolusi tinggi seperti ERA5 telah terbukti mampu mengakselerasi performa prakiraan cuaca [9], [10]

Evolusi penerapan metode *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) secara khusus pada pemodelan deret waktu, seperti inovasi *TimeRAG* [11] dan *TS-RAG* [12], sukses meningkatkan akurasi peramalan dengan cara menarik pola gelombang historis yang paling relevan. Secara paralel, asimilasi arsitektur RAG pada asisten virtual (*chatbot*) menunjukkan keberhasilan luar biasa dalam mengotomatisasi interaksi di berbagai domain spesifik [13], [14], menjadikannya instrumen potensial untuk mendistilasi komunikasi manajemen krisis yang kompleks menjadi panduan taktis [15].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan WAMApp (*Weather Anomaly Mitigation App*), sebuah sistem peringatan dini berbasis seluler yang mengintegrasikan visualisasi geospasial, data cuaca ERA5, dan asisten virtual berbasis *Retrieval-Augmented Generation* (RAG). Sistem dikembangkan menggunakan arsitektur *microservices* dengan mekanisme pelacakan lokasi latar belakang dan distribusi notifikasi berbasis *serverless edge computing*. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi data cuaca berbasis lokasi dengan agen virtual interaktif (WAMChat) yang mampu menyajikan instruksi mitigasi secara kontekstual dan mudah dipahami. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat membantu menjembatani kesenjangan antara kompleksitas data meteorologis dan kebutuhan masyarakat akan informasi mitigasi yang praktis serta mudah diakses.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti	Metode / Sistem	Keterbatasan	Solusi pada penelitian sekarang
Bi et al [16].	Pemodelan <i>Deep Learning</i> menggunakan <i>3D Neural Networks</i> (<i>Pangu-Weather</i>).	Murni berfokus pada <i>backend</i> global; tidak ada aplikasi seluler untuk peringatan individu secara <i>real-time</i> .	Memadukan data resolusi tinggi (ERA5) dengan <i>background tracking</i> (radius 500m) untuk peringatan spesifik ke perangkat pengguna.
Lam et al [17].	Model <i>Machine Learning</i> berbasis <i>Graph Neural Networks</i> (<i>GraphCast</i>).	<i>Output</i> berupa parameter teknis mentah, sehingga memberikan beban kognitif tinggi bagi masyarakat awam.	Menambahkan arsitektur RAG pada WAMChat untuk mengonversi data teknis menjadi dialog mitigasi dua arah yang mudah dipahami.
Niswah, dkk [18]	Sistem Peringatan Dini Hidrometeorologi berbasis IoT, Web, dan GIS.	Bergantung pada <i>email</i> pihak ketiga (Gmail) dan informasi <i>website</i> masih statis/satu arah.	Membangun aplikasi seluler <i>native</i> dengan <i>push notification</i> mandiri (<i>serverless edge</i>) dan asisten virtual RAG untuk komunikasi dua arah.

2. METODE PENELITIAN

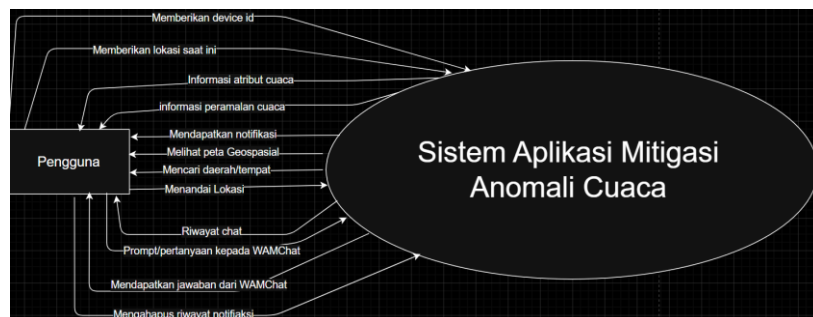
Penelitian ini menggunakan kerangka kerja *Software Development Life Cycle* (SDLC) dengan model *Agile*. Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya dalam beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan secara cepat dan *iteratif*.

2.1 Perencanaan (*Planning*)

Pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah dan pengumpulan kebutuhan sistem. Dataset ERA5 diakses melalui *Open-Meteo* karena lebih sesuai untuk kebutuhan arsitektur *microservices* dan integrasi AI dibandingkan sumber meteorologi lain seperti BMKG atau NOAA. BMKG umumnya menyediakan data dalam format XML statis pada tingkat wilayah, sedangkan NOAA banyak menggunakan format mentah seperti GRIB dan NetCDF yang memerlukan proses *decoding* tambahan. Sebaliknya, *Open-Meteo* menyediakan akses berbasis koordinat dalam format JSON dengan cakupan wilayah global serta mendukung berbagai granularitas temporal, mulai dari kondisi cuaca terkini (*current weather*), prakiraan per jam (*hourly*), hingga prakiraan harian (*daily forecast*). Karakteristik tersebut memungkinkan integrasi yang lebih efisien dengan arsitektur RAG WAMChat dan sistem peringatan dini berbasis lokasi.

2.2 Perancangan (*Design*)

Tahap perancangan mencakup pembuatan desain antarmuka pengguna (UI/UX) berbasis *mobile* dan arsitektur sistem. Sistem dirancang menggunakan arsitektur *microservices*, di mana *frontend* dipisahkan dari *backend*. Perancangan basis data relasional juga dilakukan pada tahap ini menggunakan layanan Supabase untuk menyimpan riwayat percakapan (*chat history*) dan autentikasi perangkat (*device ID*).



Gambar 1. Diagram Arsitektur dan Komunikasi Data (*Microservices*) Sistem WAMApp

Untuk merinci logika pengambilan keputusan dan aliran data, fungsionalitas sistem diuraikan ke dalam dua algoritma utama menggunakan *pseudocode*. Algoritma 1 merepresentasikan proses pemantauan latar belakang yang berjalan setiap satu menit untuk mendeteksi anomali cuaca.

Algoritma 1. Deteksi Anomali Cuaca dan Pemicuan Notifikasi

- 1: WHILE Sistem Berjalan DO
- 2: Tunggu(1 Menit)
- 3: lokasi_user ← AmbilLokasiTerkini()
- 4: data_prediksi ← PrediksiCuacaBeberapaJamKeDepan(lokalasi_user)
- 5:

```

6: IF TerdapatAnomali(data_prediksi) == TRUE THEN
7:   KirimPushNotification(lokalasi_user)
8:
9:   IF UserKlikNotifikasi() == TRUE THEN
10:    prompt_awal ← SusunPromptBerdasarkanKondisi(data_prediksi)
11:    IF UserMengirimPrompt(prompt_awal) == TRUE THEN
12:      Panggil_Algoritma_2(prompt_awal)
13:    END IF
14:  END IF
15: END IF
16: END WHILE

```

Saat pengguna mengirimkan *prompt* mitigasi melalui antarmuka asisten virtual, sistem *backend* mengeksekusi mekanisme *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) untuk merumuskan jawaban yang presisi diuraikan pada Algoritma 2.

Algoritma 2. Mekanisme Asisten Virtual WAMChat (RAG)

```

1: FUNCTION ProsesChatbot(prompt_user, token_jwt)
2:   KirimPesanKeAPI(prompt_user)
3:
4:   IF ValidasiKeamanan(token_jwt) == FALSE OR LimitTercapai() == TRUE THEN
5:     TolakPermintaan()
6:     RETURN "Error: Akses Ditolak"
7:   ELSE
8:     vektor_pesan ← UbahTeksMenjadiVectorEmbeddings(prompt_user)
9:     dokumen_relevan ← CariDokumenDiVectorDB(vektor_pesan)
10:    konteks_tambahan ← GabungkanDokumen(dokumen_relevan)
11:
12:    jawaban_ai ← ProsesJawabanDenganLLM(prompt_user, konteks_tambahan)
13:
14:    IF BerhasilMendapatJawaban(jawaban_ai) == TRUE THEN
15:      SimpanRiwayatChatKeDatabase(prompt_user, jawaban_ai)
16:      KirimResponseKeFrontend(jawaban_ai)
17:      RETURN jawaban_ai
18:    ELSE
19:      KirimPesanErrorKeFrontend("Gagal memproses LLM")
20:      RETURN "Error"
21:    END IF
22:  END IF
23: END FUNCTION

```

2.3 Pengembangan(Development)

Pada fase ini diimplementasikan sistem keamanan *Custom JSON Web Token* (JWT) dan integrasi model kecerdasan buatan generatif menggunakan Gemini 2.5 Flash. Mekanisme *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) pada sistem ini beroperasi dalam dua lapisan konteks. Pertama, untuk basis pengetahuan mitigasi bencana, teks dokumen diubah menjadi

representasi vektor menggunakan model *embedding intfloat/multilingual-e5-large*, yang kemudian disimpan pada basis data Supabase. Saat interaksi terjadi, sistem mengeksekusi pencarian semantik (*semantic retrieval*) untuk menemukan panduan mitigasi yang paling relevan. Kedua, sistem melakukan penarikan data cuaca lokal berbasis koordinat pengguna berformat JSON dari antarmuka Open-Meteo. Hasil ekstraksi dokumen (*retrieval*) dan data metrik cuaca dinamis tersebut kemudian disuntikkan secara bersamaan ke dalam *system prompt* Gemini 2.5 Flash, sehingga asisten virtual mampu mensintesis instruksi yang sesuai dengan kondisi iklim *real-time* pengguna.

2.4 Pengujian (Testing)

Setelah modul selesai dikembangkan, dilakukan pengujian untuk memastikan fungsionalitas dan efektivitas sistem. Pengujian tahap pertama berfokus pada fungsionalitas teknis melalui uji keandalan *endpoint* API, pengujian latensi respons AI, serta *Black Box Testing* untuk memastikan integrasi *frontend* dan *backend* berjalan tanpa kendala.

Selanjutnya, untuk mengevaluasi kualitas respons asisten virtual WAMChat dan tingkat kepuasan pengguna, penelitian ini menerapkan pendekatan *User Acceptance Testing* (UAT) dengan model *Beta Testing*. Evaluasi ini menggunakan metode *Human Evaluation* yang melibatkan 102 responden pengguna akhir (*end-user*). Pengumpulan data dilakukan melalui instrumen kuesioner berskala Likert 1-5 untuk menilai aspek kenyamanan antarmuka, relevansi informasi cuaca, serta kualitas dan relevansi interaksi dialogis yang dihasilkan oleh WAMChat. Data rekam jejak pengguna ini kemudian diekstraksi dan dianalisis untuk mengukur efektivitas sistem dalam menyampaikan instruksi mitigasi bencana secara praktis.

Pengujian dalam penelitian ini difokuskan pada validasi fungsionalitas sistem, kualitas integrasi layanan, serta pengalaman pengguna. Penelitian ini tidak mengembangkan model prediksi cuaca baru, melainkan memanfaatkan data meteorologis dari layanan *Open-Meteo* yang menyediakan dataset reanalisis ERA5 sebagai sumber data eksternal. Oleh karena itu, evaluasi yang dilakukan tidak mencakup pengukuran akurasi prediksi meteorologis, melainkan berfokus pada performa implementasi sistem, penyampaian notifikasi, dan interaksi pengguna dengan aplikasi.

2.5 Perilisan (Release)

Pada tahap ini, aplikasi yang telah dinyatakan stabil melalui serangkaian pengujian siap untuk didistribusikan kepada pengguna. Proses perilisan dilakukan menggunakan layanan *Expo Application Services*. Kodingan sumber di-*build* menjadi format *Android Package Kit* (APK) dengan optimasi *Hermes Engine* untuk memastikan aplikasi memiliki performa tinggi dan ukuran penyimpanan yang efisien. Berkas APK hasil *build* ini kemudian didistribusikan secara *sideloading* atau melalui platform repositori untuk dapat diinstal pada perangkat target.

2.6 Umpan Balik (Feedback)

Tahap terakhir dalam satu siklus iterasi *Agile* adalah pengumpulan umpan balik dari pengguna setelah mencoba aplikasi pada tahap *release*. Pada penelitian ini, proses pengumpulan umpan balik dieksekusi secara terstruktur melalui penyebaran instrumen kuesioner kepada 102 responden yang berperan sebagai pengguna akhir (*end-user*). Kuesioner

ini dirancang untuk meninjau ulang (*review*) fungsionalitas fitur, kenyamanan antarmuka (UX), serta melakukan *human evaluation* terhadap tingkat kepuasan respons WAMChat.

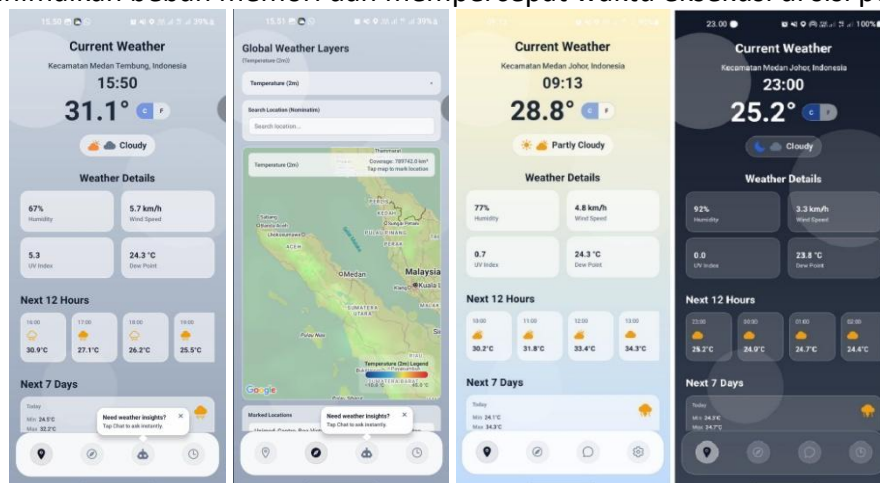
Jika berdasarkan hasil analisis data kuesioner ditemukan adanya *bug* teknis atau kekurangan maka temuan tersebut akan dicatat dan diintegrasikan kembali ke tahap awal, yaitu Perencanaan (*Planning*). Hal ini memungkinkan tim pengembang untuk memprioritaskan perbaikan kesalahan dan menyempurnakan fitur pada iterasi berikutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Guna mendukung transparansi riset dan replikasi pengembangan lebih lanjut, seluruh implementasi kode sumber dari arsitektur *microservices* WAMApp ini didistribusikan secara terbuka (*open-source*) dan dapat diakses melalui <https://github.com/YehezkielG/wamapp>

3.1. Implementasi Arsitektur Deteksi Cuaca

Implementasi antarmuka menggunakan kerangka kerja *React Native* dan Expo. Aplikasi dirancang dengan prinsip minimalisme untuk memastikan kecepatan akses informasi di perangkat seluler. Arsitektur *frontend* ini telah dioptimalkan menggunakan *Hermes Engine* untuk meminimalkan beban memori dan mempercepat waktu eksekusi di sisi pengguna.



Gambar 2. Halaman Home dan Explore

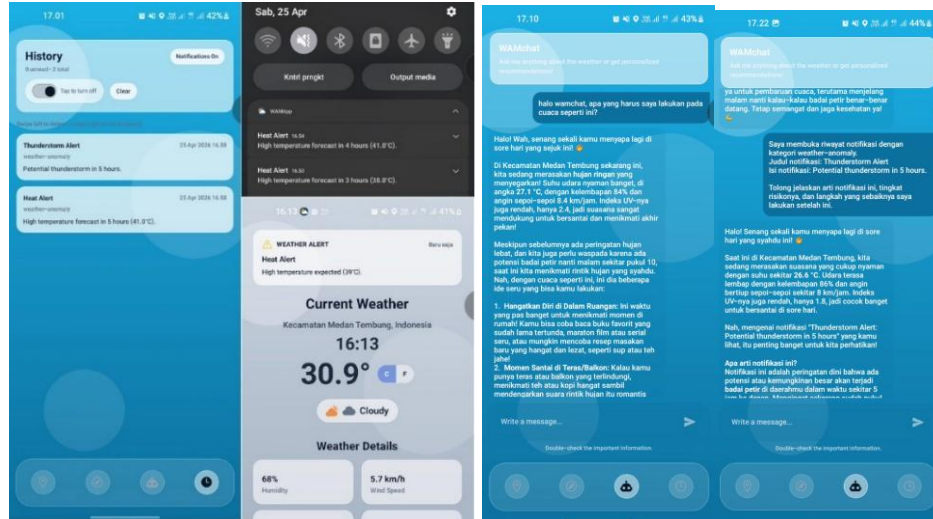
3.2 Visualisasi Kondisi Atmosfer Berbasis Animasi Dinamis

Sebagai bentuk peningkatan *User Experience* (UX) dan kesadaran situasional (*situational awareness*), antarmuka dasbor utama dilengkapi dengan fitur latar belakang interaktif. Sistem melakukan pemetaan (*mapping*) terhadap kode cuaca (*weather code*) yang diekstraksi dari antarmuka Open-Meteo untuk merender animasi visual yang merepresentasikan kondisi atmosfer aktual secara *real-time*. Pendekatan visual dinamis ini dirancang untuk membantu pengguna memahami konteks ancaman cuaca dengan lebih cepat tanpa harus melakukan pemrosesan informasi numerik secara mendetail.

3.3 Integrasi Data Meteorologi dan Sistem Peringatan Dini Terdistribusi

Data cuaca diekstraksi secara *real-time* dari dataset reanalisis ERA5 melalui antarmuka *Open-Meteo*. Sistem secara otomatis melakukan pemindaian terhadap anomali parameter

cuaca. Jika terdeteksi kondisi ekstrem, sistem memanfaatkan teknologi komputasi nirserver (*serverless*) melalui eksekusi *Edge Function* untuk memicu pengiriman *push notification* kepada pengguna. Pemisahan tugas ini memastikan peladen utama (*FastAPI*) tidak terbebani oleh proses pengiriman pesan massal.



Gambar 3. Notifikasi Peringatan Dini

Gambar 3 mengilustrasikan fungsionalitas sistem peringatan dini pada aplikasi. Peringatan anomali cuaca ekstrem, seperti suhu tinggi (*Heat Alert*) atau badai petir (*Thunderstorm*), didistribusikan secara *real-time* melalui panel notifikasi sistem perangkat (*push notification*) dan direkam secara berurutan pada halaman riwayat aplikasi (*history*) untuk memudahkan pemantauan pengguna. Notifikasi yang dikirimkan bersifat interaktif, di mana setiap interaksi pengguna akan langsung mengarahkan (*redirect*) ke antarmuka asisten virtual WAMChat dengan membawa parameter konteks bahaya yang terdeteksi. Bahasa instruksi secara *default* Indonesia, namun jika pengguna diluar Indonesia sistem secara otomatis membuat instruksi berbahasa Inggris



Gambar 4. Contoh Intruksi/*prompt* Otomatis

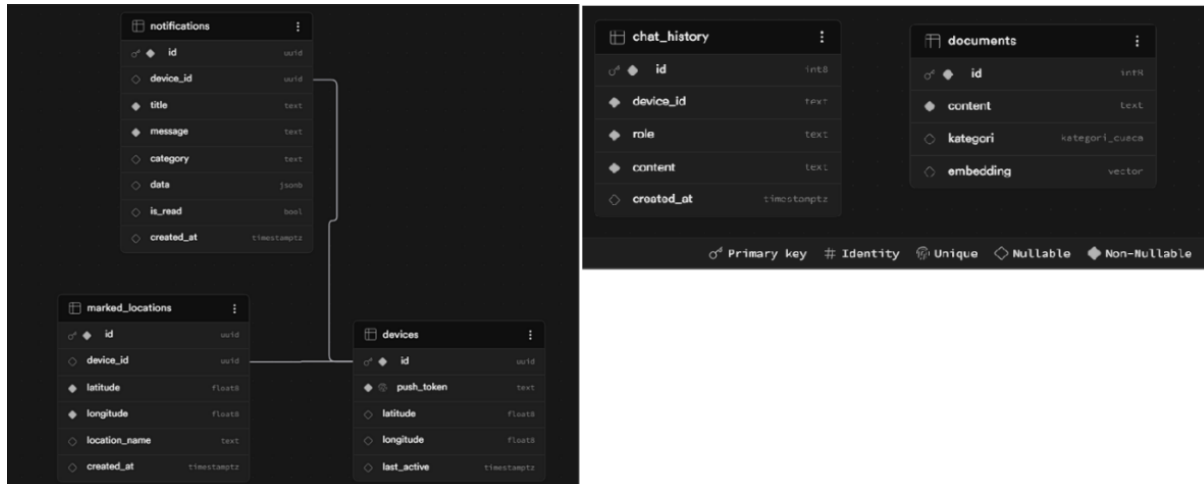
3.4 Interaksi Asisten Virtual WAMChat Berbasis RAG

Fitur utama WAMApp adalah asisten virtual interaktif yang menerapkan arsitektur *Retrieval-Augmented Generation* (RAG). Berbeda dengan sistem konvensional, WAMChat tidak hanya memberikan data mentah, tetapi menerjemahkan data teknis cuaca menjadi instruksi mitigasi dua arah. Integrasi LLM dilakukan dengan teknik *prompt engineering* yang

menyuntikkan data cuaca spesifik lokasi sebagai basis pengetahuan sementara bagi model AI sebelum menghasilkan respons.

3.5 Manajemen Basis Data dan Efisiensi Penyimpanan

Struktur database sistem dipisahkan berdasarkan fungsinya untuk mendukung arsitektur *microservices*



Gambar 5. Entity Relationship Diagram

Pada Gambar 5. Tabel utama mengelola relasi antara entitas perangkat (*devices*), lokasi (*marked_locations*), dan notifikasi, sementara basis data terpisah مخصوص untuk menangani riwayat percakapan (*chat_history*) dan penyimpanan data vektor (*documents*) menggunakan ekstensi *pgvector* guna mendukung pencarian konteks pada modul RAG. Untuk menjaga stabilitas performa sistem dalam jangka panjang, manajemen basis data relasional pada layanan Supabase menerapkan logika *Trigger Function*. Mekanisme ini dirancang untuk membatasi riwayat percakapan (*chat history*) hanya pada 10 baris terbaru per perangkat (*device ID*). Logika pembersihan otomatis ini memastikan proses penarikan konteks oleh modul RAG tetap cepat dan konsumsi penyimpanan basis data tetap efisien, sesuai dengan kebutuhan aplikasi berbasis seluler.

```
3 RETURNS TRIGGER AS $$
4 BEGIN
5     -- Hapus baris milik device_id yang sedang insert
6     DELETE FROM chat_history
7     WHERE device_id = NEW.device_id
8     -- Mengecualikan 10 baris terbaru dari penghapusan
9     AND id NOT IN (
10         SELECT id
11         FROM chat_history
12         WHERE device_id = NEW.device_id
13         ORDER BY created_at DESC
14         LIMIT 10
15     );
16
17     RETURN NEW;
18 END;
19 $$ LANGUAGE plpgsql;
```

Gambar 6. Query sql untuk membatasi 10 chat per device_id

3.6 Pengujian Fungsionalitas (Black Box Testing)

Pengujian dilakukan untuk memvalidasi seluruh modul yang telah dikembangkan di tahap *development*. Hasil pengujian fungsionalitas menggunakan metode *Black Box*

menunjukkan bahwa seluruh fitur utama berjalan sesuai dengan rancangan awal tanpa kendala teknis berarti.

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsionalitas Sistem (*Black Box Testing*)

No	Fitur & Skenario Uji	Hasil yang Diharapkan	Status
1	Login dengan Custom JWT	Sistem mengenali <i>Device ID</i> secara unik	Sesuai
2	Cuaca <i>Real-time: Fetching</i> API ERA5	Dasbor menampilkan parameter cuaca akurat	Sesuai
3	Halaman Explore	Menampilkan Peta <i>Weather Layers</i> . dan user dapat menandai lokasi	Sesuai
4	UI Dinamis: Ubah <i>weather code</i>	Animasi latar belakang berubah otomatis	Sesuai
5	Peringatan Dini: Pemicuan <i>Edge Function</i>	HP menerima <i>push notification</i>	Sesuai
6	Asisten Chatbot	AI merespons dengan instruksi mitigasi personal	Sesuai
7	Geospasial: Ambil titik GPS	Menampilkan Atribut Cuaca sesuai lokasi Pengguna	Sesuai
8	Database: Batas 10 baris <i>history</i>	<i>Trigger</i> otomatis menghapus chat tertua	Sesuai
9	Notifikasi Interaktif	Membuat Instruksi otomatis pada chatbot jika notifikasi di klik	Sesuai
10	Track Lokasi user per-500 meter	Mampu melacak lokasi user setiap 500m dilatar belakang	Sesuai

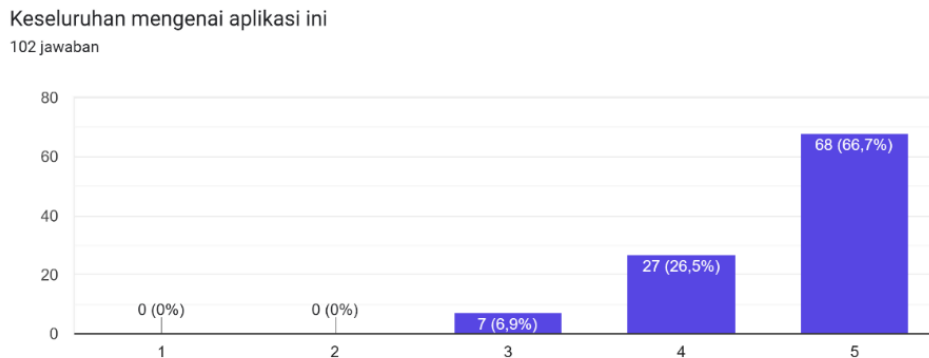
3.7 Evaluasi *Usability* dan Performa Sistem Berbasis Pengguna

Untuk mengukur aspek *usability* dan performa sistem secara kuantitatif, penelitian ini melakukan *human evaluation* melalui penyebaran kuesioner berskala Likert (1-5) kepada 102 responden akhir. Rekapitulasi hasil evaluasi fungsionalitas dan pengalaman pengguna dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Evaluasi Berbasis Pengguna

Aspek Evaluasi	Indikator Penilaian	Persentase Responden (%)
Kemudahan Akses & Instalasi	Mudah	45,1%
	Sedang	42,2%
Kenyamanan Antarmuka (UI/UX)	Sangat Baik (Bintang 5)	67,6%
	Baik (Bintang 4)	27,5%
Kualitas Respons	Sangat Baik (Bintang 5)	68,6%
WAMChat	Baik (Bintang 4)	23,5%

Berdasarkan Tabel 3, asisten virtual WAMChat mendapatkan penilaian yang sangat positif, membuktikan bahwa pendekatan RAG mampu memberikan instruksi mitigasi yang mudah dipahami (*usability* tinggi). Secara keseluruhan, aplikasi WAMApp berhasil memperoleh skor kepuasan akhir sebesar 4,60 dari skala 5, dengan dominasi 66,7% responden memberikan *rating* sempurna (Gambar 7).



Gambar 7. Distribusi Tingkat Kepuasan Pengguna terhadap Aplikasi

Selain mengukur aspek *usability*, hasil *User Acceptance Testing* (UAT) juga memberikan gambaran awal mengenai *reliability*, *latency*, dan *scalability* sistem. Dari perspektif *reliability*, seluruh fitur utama berhasil beroperasi sesuai rancangan berdasarkan hasil Black Box Testing, dan aplikasi memperoleh tingkat kepuasan keseluruhan sebesar 4,60 dari skala 5 dengan 66,7% responden memberikan penilaian tertinggi. Selain itu, sebanyak 77,4% responden memberikan penilaian baik hingga sangat baik terhadap keakuratan informasi cuaca dan notifikasi yang disajikan sistem. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi utamanya secara konsisten pada berbagai perangkat pengguna selama proses pengujian.

Pada aspek *latency*, sebagian responden mengidentifikasi adanya waktu tunda (*delay*) pada respons WAMChat, terutama ketika layanan kecerdasan buatan memproses permintaan yang kompleks. Meskipun demikian, kualitas interaksi *chatbot* tetap memperoleh penilaian positif, dengan 92,1% responden memberikan nilai baik hingga sangat baik terhadap pengalaman berinteraksi dengan WAMChat. Hasil ini mengindikasikan bahwa waktu respons sistem masih dapat diterima oleh mayoritas pengguna, meskipun optimalisasi performa tetap diperlukan pada pengembangan berikutnya.

Dari sisi *scalability*, aplikasi berhasil digunakan oleh 102 responden dalam skenario Beta Testing tanpa ditemukan kegagalan fungsional yang signifikan pada layanan utama, seperti pengambilan data cuaca, visualisasi geospasial, pengiriman notifikasi, maupun layanan *chatbot*. Namun demikian, penelitian ini belum melakukan pengujian beban (*load testing*) atau stress testing pada jumlah pengguna yang lebih besar. Oleh karena itu, evaluasi skalabilitas secara kuantitatif masih menjadi agenda penelitian lanjutan untuk mengukur kemampuan sistem dalam menangani peningkatan jumlah pengguna secara bersamaan.

Meskipun secara kuantitatif sistem mendapat skor tinggi, analisis umpan balik kualitatif menemukan beberapa catatan evaluasi. Terkait isu *latency*, sebagian responden mengeluhkan waktu tunda respons WAMChat yang cukup lambat ketika peladen berada dalam beban tinggi. Selain itu, pada aspek keandalan (*reliability*) prediksi cuaca lokal, beberapa pengguna menyarankan peningkatan akurasi data. Evaluasi ini menjadi dasar bahwa arsitektur fungsional aplikasi telah berjalan baik, namun membutuhkan optimasi skalabilitas peladen untuk iterasi pengembangan selanjutnya.

3.8 Optimalisasi Kinerja Geospasial dan Keamanan Privasi Pengguna

Ambang batas pelacakan lokasi (*location displacement threshold*) sejauh 500 meter diterapkan untuk menghemat daya perangkat tanpa mengurangi akurasi deteksi cuaca. Akses GPS yang terus-menerus sangat menguras baterai, sehingga pembaruan lokasi berdasarkan pergerakan jarak jauh lebih efisien. Jarak 500 meter dipilih karena batas yang terlalu dekat (misalnya 100 meter) rentan memicu pembaruan lokasi yang salah akibat fluktuasi sinyal GPS (*GPS drift*). Selain itu, kondisi cuaca dalam radius yang terlalu dekat umumnya bersifat sama. Penarikan data (*API fetching*) di bawah radius 500 meter hanya akan mengambil data berulang yang memboroskan baterai tanpa memberikan informasi cuaca yang baru [19].

Terkait privasi, WAMApp mengamankan data pengguna dengan tidak memakai identitas personal. Transmisi lokasi dikirim secara anonim menggunakan identitas acak berupa *Universally Unique Identifier* (UUID) agar riwayat perjalanan tidak bisa dilacak kembali ke identitas asli pengguna. Karena beroperasi di latar belakang, aplikasi ini sepenuhnya mematuhi izin dari sistem operasi ponsel. Jika pengguna mematikan GPS atau mencabut izin lokasi (*revoke permission*), proses pelacakan akan otomatis berhenti sama sekali. Hal ini memastikan bahwa kendali privasi sepenuhnya berada di tangan pengguna.

4. KESIMPULAN

Pengembangan aplikasi WAMApp berhasil diimplementasikan menggunakan arsitektur *microservices* dan metodologi Agile, serta tervalidasi fungsionalitasnya melalui pengujian *Black Box*. Integrasi algoritma pelacakan lokasi latar belakang dengan batasan pembaruan sejauh 500 meter efektif menyajikan peringatan dini secara *real-time*. Lebih lanjut, penerapan arsitektur RAG pada asisten virtual secara teknis berhasil mengonversi parameter dataset ERA5 menjadi instruksi mitigasi keselamatan. Berdasarkan pengujian terhadap 102 responden, sistem ini mendapatkan penerimaan yang positif secara empiris, di mana 64,7% pengguna mengapresiasi atribut prediksi cuaca, 55,9% pada peta geospasial, dan 53,9% merasakan manfaat langsung dari interaksi *chatbot* (asisten virtual).

Secara keseluruhan, sinergi antara visualisasi geospasial dan asisten virtual generatif mengindikasikan adanya potensi untuk mendukung penyampaian informasi mitigasi yang lebih aktif dan kontekstual. Pengujian saat ini menunjukkan tingkat kepuasan fitur yang tinggi dalam membantu mitigasi cepat (52,9%), pembuktian empiris terkait sejauh mana sistem ini secara definitif mampu meningkatkan kesadaran situasional dan respons kesiapsiagaan masyarakat masih memerlukan studi evaluasi perilaku berskala longitudinal di penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. R. Nugraheni *et al.*, "Evaluating Surface Temperature Variabilities and Climate Extremes in the Dieng Plateau over Three Decades," *Indonesian Physical Review*, vol. 8, pp. 597–615, May 2025, doi: 10.29303/ipr.v8i2.493.
- [2] D. I. Musa, M. A. Adhi, and A. Mulsandi, "Spatio-Temporal Dynamics of Extreme PM2.5 in Indonesia: A Weather-Based Hybrid Modeling Approach," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 26, pp. 37–54, Dec. 2025, doi: 10.31172/jmg.v26i1.1163.

- [3] M. I. Muslimin Idris, M. S. Said, and B. Rahman, "Sistem Informasi Pemantauan Data Cuaca Berbasis Android Untuk Mendukung Pertanian di Kabupaten Konawe Selatan," *Simtek : jurnal sistem informasi dan teknik komputer*, vol. 10, pp. 528–533, Oct. 2025, doi: 10.51876/simtek.v10i2.1682.
- [4] D. Putra Caniago, M. Y. Meinadia, Y. Mardiansyah, E. M. Damanik, A. Hilmy, and A. Syah, "Implementation of Extreme Weather and Rob Wave Early Detection System Based On lot For Disaster Risk Reduction In The Outer Islands Of Batam City," *Minda Baharu*, vol. 8, no. Desember, Dec. 2024, doi: 10.33373/jmb.v8i2.6886.
- [5] "Early Warning Dissemination and Communication Strengthening the capacity for multi-hazard risk assessment and early warning in North-East Asia."
- [6] K. Kimura and T. Yoshihiro, "Anomaly Detection for Weather Sensors Based on Majority Decision of Nearby Sensors," in *15th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, ICMU 2025*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2025. doi: 10.23919/ICMU65253.2025.11219141.
- [7] U. A. Usmani, I. Abdul Aziz, J. Jaafar, and J. Watada, "Deep Learning for Anomaly Detection in Time-Series Data: An Analysis of Techniques, Review of Applications, and Guidelines for Future Research," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 174564–174590, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3495819.
- [8] M. Zareei, C. A. López Castañeda, F. Alanazi, F. Granda, and J. A. Pèrez-Díaz, "Machine Learning Model for Road Anomaly Detection Using Smartphone Accelerometer Data," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 122841–122851, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3586812.
- [9] M. Jankauskas, A. Serackis, N. Paulauskas, R. Pomarnacki, and V. K. Hyunh, "The Impact of the Weather Forecast Model on Improving AI-Based Power Generation Predictions through BiLSTM Networks," *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/electronics13173472.
- [10] M. S. Pavithran, B. Sreeram, A. V. Pillai, and R. Jothi, "Multi-Scale Weather Forecasting Using Deep Learning Architectures With Chennai Climate Data," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 207303–207319, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3640667.
- [11] S. Yang, D. Wang, H. Zheng, and R. Jin, "TimeRAG: BOOSTING LLM Time Series Forecasting via Retrieval-Augmented Generation," Dec. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2412.16643>
- [12] K. Ning *et al.*, "TS-RAG: Retrieval-Augmented Generation based Time Series Foundation Models are Stronger Zero-Shot Forecaster," May 2025.
- [13] T. Q. Ramadhani, N. Q. Nada, and N. D. S, "Penerapan Metode Retrieval-Augmented Generation (RAG) Pada Chatbot E-Commerce Berbasis Gemini Ai," *Jurnal Ilmiah ILKOMINFO - Ilmu Komputer & Informatika*, vol. 8, pp. 301–313, Jul. 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.384.
- [14] G. D. Albert and A. Voutama, "Pengembangan Chatbot Berbasis Pdf Menggunakan Local Retrieval-Augmented Generation (RAG) dan Ollama," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6361.
- [15] A. Raj, L. Arora, S. S. Girija, S. Kapoor, D. Pradhan, and A. Shetgaonkar, "AI and Generative AI Transforming Disaster Management: A Survey of Damage Assessment and Response Techniques," May 2025, doi: 10.1109/COMPSAC65507.2025.00251.

- [16] K. Bi, L. Xie, H. Zhang, X. Chen, X. Gu, and Q. Tian, "Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks," *Nature*, vol. 619, pp. 533–538, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06185-3.
- [17] R. Lam *et al.*, "Learning skillful medium-range global weather forecasting," *Science (1979)*, vol. 382, pp. 1416–1422, Dec. 2023, doi: 10.1126/science.adi2336.
- [18] N. Niswah, S. Suroso, and S. Soim, "Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini Bencana Hidrometeorologi Berbasis Internet of Thing (IoT) Di BMKG," *SMATIKA JURNAL*, vol. 11, pp. 153–159, Dec. 2021, doi: 10.32664/smatika.v11i02.593.
- [19] M. G. R. Fahad, M. Karimi, R. Nazari, and M. R. Nikoo, "Modeling Urban Microclimates for High-Resolution Prediction of Land Surface Temperature Using Statistical Models and Surface Characteristics," *Urban Science*, vol. 9, Feb. 2025, doi: 10.3390/urbansci9020028.