

## **Overcoming Digitalization Barriers in Micro-Enterprises: A Microservices Approach to AI-Powered Communication Automation**

**Anggi Andika Pratama, Muhammad Furqan Hakim, Riska , Hendra Finur, Saloma, Arga  
Chon Feriandref, Othman Ballan , Riman Abimayu, Beni Liantori**

Universitas Graha Karya Muara Bulian, Jambi  
email : anggiandikapratama@gmail.com

Jl. Gajah Mada Muara Bulian, 36612 Indonesia

### *Abstract*

Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs) increasingly rely on instant messaging platforms for customer interaction. However, transitioning from manual communication to automated, enterprise-grade Customer Relationship Management (CRM) systems presents significant digitalization barriers, including high infrastructure costs, technical complexity, and the risk of platform-side blocking. This study proposes a lightweight, low-cost microservices architecture designed to democratize communication automation for micro-enterprises. By decoupling the frontend logic from the communication gateway, the proposed system integrates an Artificial Intelligence (AI) powered WhatsApp Bot (leveraging Natural Language Processing) with an asynchronous Background Queue Engine. The architecture utilizes a PHP-based RESTful API for robust state management and a Node.js runtime environment for headless browser execution, effectively handling high-volume concurrent messaging. To address the critical issue of account suspension common in automated messaging, a dynamic anti-ban throttling algorithm was implemented within the cron-triggered background worker. Empirical testing conducted on a cluster of culinary MSMEs demonstrated that the asynchronous queueing mechanism successfully processed bulk messaging tasks with zero server latency spikes on shared hosting environments. Furthermore, the AI-driven conversational agent successfully resolved tier-1 customer inquiries autonomously, significantly reducing manual response times. The findings indicate that this microservices approach not only circumvents traditional hardware and budget constraints but also provides a scalable blueprint for accelerating digital transformation in resource-constrained enterprise ecosystems.

*Kata kunci:* *Micro-Enterprises; Microservices Architecture; Artificial Intelligence; Asynchronous Queue; Communication Automation.*

**Abstrak**

Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) semakin bergantung pada platform pesan instan untuk interaksi pelanggan. Namun, transisi dari komunikasi manual ke sistem Manajemen Hubungan Pelanggan (CRM) otomatis tingkat perusahaan menghadirkan hambatan digitalisasi yang signifikan, termasuk biaya infrastruktur yang tinggi, kompleksitas teknis, dan risiko pemblokiran di sisi platform. Studi ini mengusulkan arsitektur *microservices* yang ringan dan berbiaya rendah yang dirancang untuk mendemokratisasi otomatisasi komunikasi untuk usaha mikro. Dengan memisahkan logika frontend dari gateway komunikasi, sistem yang diusulkan mengintegrasikan Bot WhatsApp berbasis Kecerdasan Buatan (AI) (memanfaatkan Pemrosesan Bahasa Alami) dengan Mesin Antrian Latar Belakang asinkron. Arsitektur ini menggunakan API RESTful berbasis PHP untuk manajemen status yang kuat dan lingkungan runtime Node.js untuk eksekusi browser headless, yang secara efektif menangani pengiriman pesan bersamaan bervolume tinggi. Untuk mengatasi masalah kritis penangguhan akun yang umum terjadi dalam pengiriman pesan otomatis, algoritma pembatasan anti-ban dinamis diimplementasikan dalam pekerja latar belakang yang dipicu cron. Pengujian empiris yang dilakukan pada sekelompok UMKM kuliner menunjukkan bahwa mekanisme antrian asinkron berhasil memproses tugas pengiriman pesan massal tanpa lonjakan latensi server pada lingkungan hosting bersama. Lebih lanjut, agen percakapan berbasis AI berhasil menyelesaikan pertanyaan pelanggan tingkat 1 secara otomatis, secara signifikan mengurangi waktu respons manual. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan layanan mikro ini tidak hanya mengatasi kendala perangkat keras dan anggaran tradisional, tetapi juga menyediakan cetak biru yang terukur untuk mempercepat transformasi digital dalam ekosistem perusahaan yang terbatas sumber daya.

**Kata kunci:** *Usaha Mikro; Arsitektur Layanan Mikro; Kecerdasan Buatan; Antrian Asinkron; Otomatisasi Komunikasi.*

**1. PENDAHULUAN (12 pt)**

Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) berfungsi sebagai tulang punggung perekonomian global; namun, adopsi pasar digital di sektor ini, terutama di negara-negara berkembang, masih menghadapi hambatan struktural yang signifikan (Juita et al., 2026). Transformasi digital dan kolaborasi bisnis elektronik (e-business) terbukti krusial dalam meningkatkan keunggulan kompetitif, ketahanan rantai pasok, dan inklusi keuangan bagi entitas bisnis skala kecil (Dalimunthe et al., 2026; Chopra et al., 2025; Freund et al., 2026; Dias & Perera, 2026). Penerapan teknologi informasi cerdas dalam manajemen bisnis, logistik, dan manajemen kualitas layanan publik menawarkan peluang signifikan untuk efisiensi dan transparansi operasional (Septyanti, 2023; Nugraha, 2023; Thanh & Cong, 2026). Namun demikian, pada praktiknya, digitalisasi operasional ini tidak lepas dari berbagai ancaman keamanan, seperti masalah etika dalam teknologi informasi, pencurian identitas, dan pembajakan perangkat lunak, yang sangat merugikan pelaku bisnis bermodal rendah (Lazuardi, 2024; Ranius, 2025). Selanjutnya, UMKM sering kali kekurangan literasi Kecerdasan Buatan (AI), kesiapan teknologi hijau, dan sistem pendukung keputusan yang memadai untuk mengalokasikan sumber daya dan memitigasi risiko kredit (Yordudom et al., 2026; Dubey et al., 2026; Silva et al., 2026; Gramifar et al., 2026; Arora & Kaur, 2026). Oleh karena itu, sistem pemodelan pendukung keputusan yang presisi untuk manajemen bisnis dan evaluasi bantuan dana sangat mendesak untuk diperlukan (Wahyudi, 2024; Alfarizi, 2025; Wei et al., 2025; Yang, 2026; Wang et al., 2026).

Kecerdasan Buatan (AI) telah membawa disrupsi positif dan mengotomatisasi layanan di berbagai sektor, memengaruhi segala hal mulai dari pertanian, keselamatan kerja, dan pemantauan kesehatan hingga pendidikan (Li et al., 2026; Alkhaldi et al., 2026; Patil et al., 2026; Yuwanto, 2025; Brezovec et al., 2026). Implementasi AI terbukti dapat meningkatkan motivasi dan kualitas transisi akademik ke dunia industri (Heldayani et al., 2026; Iqroni & Waldo, 2025; Rosnelli et al., 2025; Lee & Wong, 2025; Alkan, 2025). Dalam ranah layanan pelanggan, integrasi agen percakapan bertenaga AI (chatbot) yang dikombinasikan dengan algoritma perolehan informasi—seperti model perolehan informasi Boolean—telah terbukti meningkatkan interaksi layanan dan menyediakan solusi swalayan yang dinamis (Waelbers et al., 2026; Yani, 2025; Sun et al., 2026; Olujimi et al., 2025). Kapabilitas AI yang didorong oleh insentif pemerintah juga dikonfirmasi dapat memacu inovasi manajemen dan memfasilitasi integrasi teknologi layanan otomatisasi yang lebih adaptif di berbagai bidang, mulai dari pariwisata hingga logistik harian (Che et al., 2026; Ma et al., 2026; Sharma et al., 2026; Straub, 2026; Su et al., 2026).

Meskipun AI menawarkan kapabilitas interaksi yang superior, mengelola otomatisasi komunikasi bervolume tinggi, seperti pengiriman pesan massal (bulk messaging), sering kali menyebabkan kelelahan komputasi dan pemblokiran dari sisi platform jika tidak diarsiteki dengan benar. Solusi modern menuntut transisi dari sistem monolitik menuju arsitektur layanan mikro (microservices) lintas platform yang terdesentralisasi (Keum et al., 2026; Liu et al., 2026; Mondal & Tilevich, 2026; Mescoli et al., 2026). Penanganan komunikasi antrean tinggi membutuhkan mekanisme antrean yang stabil—seperti penerapan teori antrean M/G/1 dan algoritma optimisasi penjadwalan dinamis—untuk mencegah penumpukan tugas komputasi dan menstabilkan latensi peladen (server latency) (Jeganathan et al., 2026; Wenqiang et al., 2026; Dai et al., 2026; Hurin 'In et al., 2025; Badis et al., 2025; Li et al., 2026). Selain itu, keandalan jaringan dan fusi komputasi hibrida sangat penting untuk melindungi transmisi data dari serangan siber, memaksimalkan optimisasi rute, dan mendukung pembelajaran terfederasi (federated learning) dalam ekosistem industri (Ren et al., 2026; Subhedar & Parasar, 2026; Ke et al., 2026; Lamari et al., 2026; Kontoudis & Stilwell, 2026; Kim et al., 2026). Menerapkan arsitektur jaringan asinkron yang andal menjadi krusial dalam mengatasi hambatan latensi komunikasi paralel (Chen et al., 2026; Cheng et al., 2026; Latt & Coreixas, 2026; Marwan et al., 2026).

Menjembatani kesenjangan antara kebutuhan akan otomatisasi komunikasi dan keterbatasan infrastruktur UMKM, penelitian ini merancang arsitektur layanan mikro terintegrasi. Sistem ini menggabungkan agen Bot WhatsApp berbasis Pemrosesan Bahasa Alami (NLP) dengan teknologi Background Queue Engine. Melalui pemisahan logika antar-server (decoupling), implementasi ini bertujuan untuk menghadirkan otomatisasi Manajemen Hubungan Pelanggan (CRM) yang cerdas yang tidak hanya mampu memberikan respons pintar, tetapi juga beroperasi dengan biaya infrastruktur rendah, tetap aman dari penangguhan akun (Anti-Ban), dan mendemokratisasi transformasi digital untuk ekosistem bisnis skala mikro. Kode sumber dan hasil implementasi sistem ini dapat diakses secara publik melalui repositori:

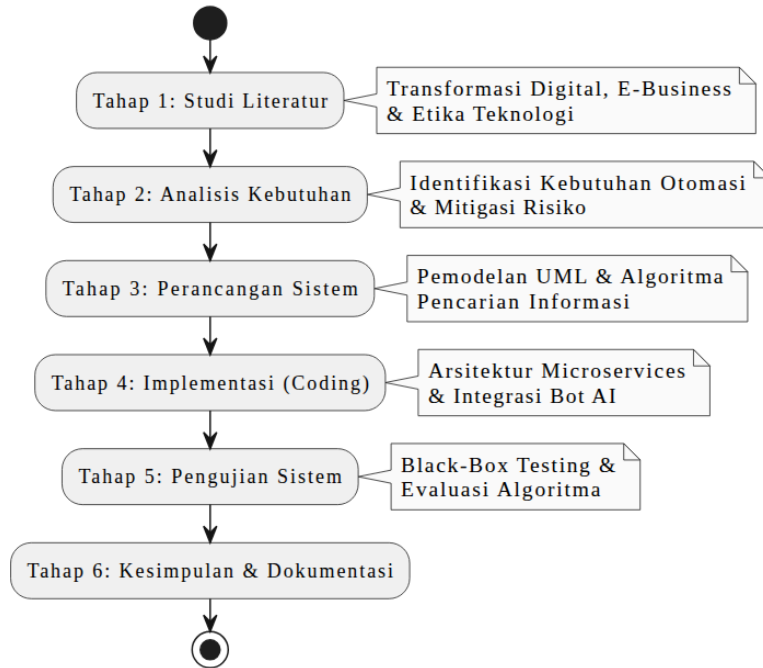
## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam pengembangan sistem otomasi komunikasi ini mengikuti model Waterfall System Development Life Cycle (SDLC) yang dijalankan secara sekuensial. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan setiap tahapan, mulai dari analisis

kebutuhan hingga pengujian, memiliki dokumentasi yang kuat dan alur data yang terstruktur antara komponen microservices.

### 2.1 Alur Penelitian

Alur penelitian ini dirancang untuk menjawab tantangan transformasi digital dan kolaborasi bisnis elektronik dengan mengintegrasikan kapabilitas kecerdasan buatan dalam sistem informasi manajemen di jelaskan pada Gambar 1. Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk memitigasi risiko kegagalan teknis dan etika informasi. Visualisasi alur penelitian disajikan melalui kode PlantUML di bawah ini untuk memudahkan pemodelan sistem.



Gambar 1: Alur Penelitian

1. Studi Literatur: Melakukan pengumpulan landasan teori terkait peluang manajemen dalam teknologi informasi serta percepatan penggunaan *cloud computing* dan analisis data. Tahap ini juga mencakup kajian mengenai integrasi AI dalam berbagai sektor layanan untuk meningkatkan performa organisasi.
2. Analisis Kebutuhan Sistem: Mendefinisikan kebutuhan sistem otomasi komunikasi untuk mendukung transformasi digital pada manajemen transportasi dan layanan UMKM. Selain kebutuhan fungsional, tahap ini juga menganalisis aspek etika terkait perlindungan identitas dan pencegahan pembajakan perangkat lunak.
3. Perancangan Sistem dan Basis Data: Melakukan pemodelan menggunakan UML dan perancangan ERD untuk basis data MariaDB/MySQL. Perancangan sistem pendukung keputusan juga dipertimbangkan untuk memastikan transparansi pemrosesan data bantuan atau antrean.
4. Implementasi (Coding): Membangun sistem menggunakan arsitektur *Client-Server* yang terpisah. *Backend* dibangun menggunakan PHP Native (PDO) untuk menangani logika API, sementara *frontend* dikembangkan untuk memfasilitasi interaksi bot berbasis AI.
5. Pengujian Sistem: Melakukan validasi menggunakan metode *Black-Box Testing* untuk memastikan keandalan perangkat lunak di lingkungan aplikasi digital lintas platform. Pengujian difokuskan pada sinkronisasi data antrean dan respons otomatis bot.
6. Kesimpulan dan Dokumentasi: Menyusun laporan penelitian akhir sebagai jembatan antara dunia akademis dan kebutuhan industri nyata.

## 2.2 Metode Pengumpulan Data

Guna memperoleh data dan informasi yang valid dalam merancang aplikasi otomasi komunikasi yang fungsional dan tepat sasaran bagi ekosistem UMKM serta layanan digital, penelitian ini menggunakan tiga teknik pengumpulan data utama:

### 2.2.1 Observasi (Direct Observation)

Tahap observasi dilakukan dengan melakukan pengamatan langsung terhadap proses komunikasi konvensional dan manajemen transportasi informasi pada unit layanan (Nugraha, 2023). Fokus observasi meliputi identifikasi kendala pada pencatatan pesan manual, hambatan dalam skalabilitas layanan, serta risiko teknis yang muncul akibat ketiadaan sistem antrean latar belakang yang stabil. Pengamatan ini bertujuan untuk memetakan peluang manajemen dalam memanfaatkan teknologi informasi guna meningkatkan efisiensi operasional (Septyanti, 2023).

### 2.2.2 Wawancara (Interview)

Sesi tanya jawab semi-terstruktur dilakukan dengan pengelola layanan Awan Digital dan pemilik UMKM kuliner di wilayah Muara Bulian sebagai entitas pengguna. Wawancara ini bertujuan untuk mengungkap tantangan operasional nyata, seperti potensi kesalahan manusia (*human error*) dalam menanggapi pesan pelanggan secara manual serta kebutuhan akan transparansi dalam sistem pendukung keputusan untuk distribusi informasi (Wahyudi, 2024). Selain itu, aspek etika terkait perlindungan data pribadi dan pencegahan identitas palsu juga menjadi poin utama diskusi guna memitigasi risiko kejahatan siber di lingkungan digital (Lazuardi, 2024).

### 2.2.3 Studi Pustaka (Literature Review)

Tahap ini melibatkan pengumpulan landasan teori dan referensi arsitektur sistem dari berbagai jurnal ilmiah, buku, dan dokumentasi teknis. Tinjauan literatur difokuskan pada:

1. Kolaborasi Bisnis Digital: Mengkaji pola kolaborasi bisnis elektronik (*e-business*) untuk memperkuat strategi pemasaran digital (Wahyu, 2023).

2. Teknologi Kecerdasan Buatan: Menganalisis dampak integrasi AI dalam meningkatkan motivasi belajar dan ekspresi kreatif yang dapat diadaptasi ke dalam interaksi *bot* yang lebih manusiawi (Heldayani dkk., 2026; Iqroni & Waldo, 2025).
3. Algoritma dan Pengolahan Data: Mempelajari implementasi model perolehan informasi (*Information Retrieval*) untuk optimasi pencarian data pada *bot* (Yani, 2025) , penggunaan teknik *data mining* untuk proyeksi beban server (Alfarizi, 2025) , serta penerapan algoritma *neural network* untuk klasifikasi data yang akurat (Yuwanto, 2025).
4. Etika dan Keamanan: Mengkaji isu etika terkait pembajakan perangkat lunak dan perlindungan hak kekayaan intelektual dalam pengembangan kode sumber (Ranius, 2025).

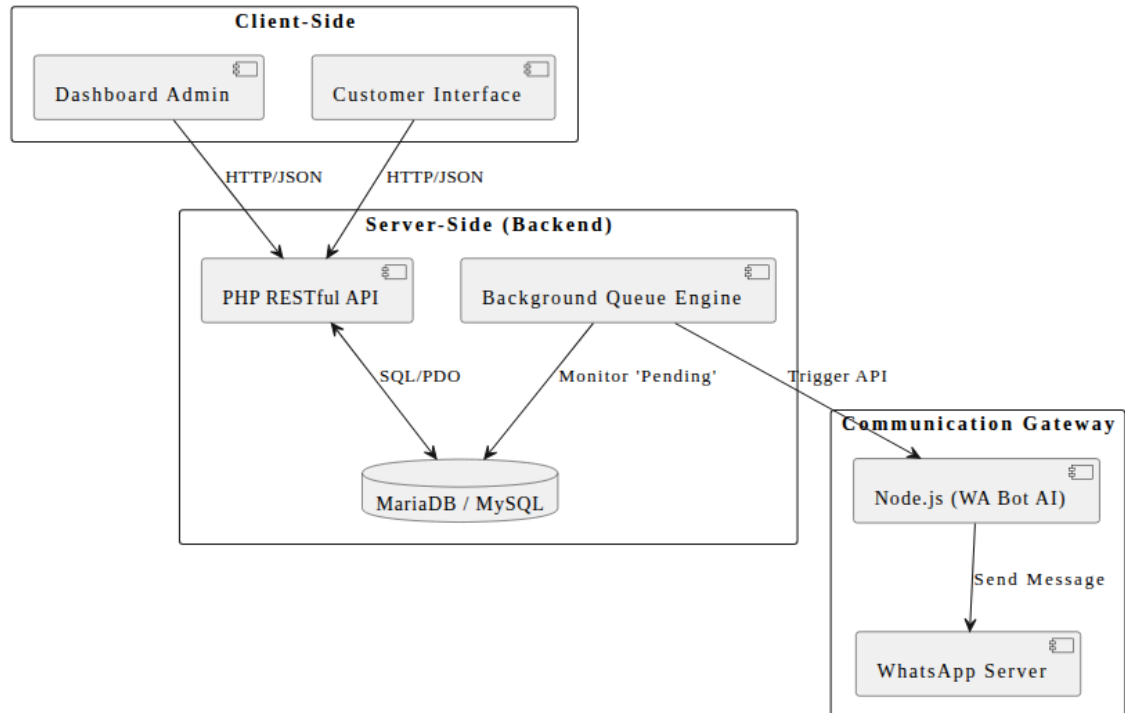
### 2.3 Metode Pengembangan Sistem

Pengembangan aplikasi otomasi komunikasi pada layanan Awan Digital mengadopsi model Waterfall System Development Life Cycle (SDLC) yang berjalan secara sekuensial. Pendekatan ini memastikan setiap tahapan pengembangan memiliki dokumentasi yang kuat dan alur data yang terstruktur, terutama dalam mengelola interaksi antara backend PHP dan mesin bot Node.js. Tahapan pengembangan sistem diuraikan sebagai berikut:

1. Analisis Kebutuhan (Requirements Analysis): Pada tahap ini, entitas pengguna didefinisikan ke dalam tiga peran utama (Multi-Role): Customer yang membutuhkan fitur riwayat transaksi, Merchant untuk pengelolaan layanan, dan Driver/Worker untuk pengambilan tugas. Analisis ini juga mempertimbangkan peluang manajemen dalam percepatan penggunaan cloud computing dan analisis data untuk meningkatkan performa organisasi. Aspek etika keamanan informasi, seperti perlindungan identitas dan pencegahan pembajakan perangkat lunak, menjadi parameter non-fungsional yang krusial.
2. Desain Sistem (System Design): Kebutuhan fungsional diterjemahkan ke dalam pemodelan visual menggunakan UML dan perancangan basis data relasional MariaDB/MySQL. Perancangan antarmuka difokuskan pada UI/UX yang responsif untuk memastikan kemudahan penggunaan (*perceived ease of use*) yang berdampak langsung pada kepuasan pelanggan. Selain itu, model perolehan informasi (Boolean Information Retrieval) dirancang agar bot mampu memproses kueri pencarian secara akurat.
3. Implementasi (Implementation/Coding): Aplikasi dibangun menggunakan arsitektur Client-Server yang terpisah (Decoupled Architecture). Sisi backend dikembangkan menggunakan PHP Native (PDO) untuk mengelola koneksi API RESTful dan basis data terpusat. Di sisi lain, integrasi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) pada mesin komunikasi dikembangkan untuk memberikan dampak positif pada kualitas layanan, serupa dengan efektivitas integrasi AI dalam dunia pendidikan.
4. Pengujian (Testing): Sistem diuji menggunakan metode Black-Box Testing untuk memvalidasi output perangkat lunak. Pengujian difokuskan pada keberhasilan respons status HTTP (seperti respons 200 OK untuk login valid) serta validasi algoritma neural network dalam mengklasifikasikan data komunikasi massal secara akurat.

#### 2.3.1 Arsitektur Sistem Terintegrasi

Untuk mendukung ekosistem otomasi komunikasi, dirancang sebuah arsitektur yang memisahkan logika aplikasi dengan gerbang komunikasi WhatsApp. Visualisasi arsitektur sistem disajikan melalui kode PlantUML berikut:



Gambar 2: Arsitektur Sistem Terintegrasi

## 2.4 Sarana dan Prasarana Penelitian

Untuk mendukung proses perancangan arsitektur *frontend* dan *backend* yang kompleks, serta memastikan integrasi AI berjalan optimal, penelitian ini menggunakan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak sebagai berikut:

### 2.4.1 Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini meliputi unit pemrosesan untuk pengembangan kode serta perangkat uji coba lapangan:

- **Komputer/Laptop Pengembang:** Digunakan untuk menulis kode sumber, menjalankan peladen lokal (local server) pada tahap prototipe, dan melakukan kompilasi aplikasi. Spesifikasi yang digunakan adalah prosesor Intel Core i5 / AMD Ryzen 5 dengan RAM 8 GB dan penyimpanan SSD untuk kecepatan read/write data.
- **Perangkat Seluler (Smartphone):** Digunakan untuk melakukan live debugging dan pengujian performa aplikasi bot pada lingkungan sistem operasi Android secara nyata.

### 2.4.2 Perangkat Lunak (*Software*)

Dukungan perangkat lunak sangat krusial dalam membangun ekosistem microservices yang stabil dan aman dari ancaman siber (Lazuardi, 2024). Perangkat lunak yang digunakan meliputi:

- **Editor Teks & IDE:** Visual Studio Code (VS Code) digunakan sebagai lingkungan pengembangan utama untuk menulis skrip PHP, Node.js, dan skrip otomasi lainnya.
- **Lingkungan Eksekusi & Kerangka Kerja:** Node.js dan npm digunakan untuk mengelola dependensi bot dan menjalankan ekosistem JavaScript asinkron. Ionic CLI dan Capacitor digunakan sebagai kerangka kerja lintas platform untuk merakit (building) tampilan web menjadi paket aplikasi seluler.

- Backend & Basis Data: cPanel digunakan sebagai peladen uji coba API untuk menjalankan layanan Apache dan database server. MariaDB/MySQL digunakan sebagai sistem manajemen basis data relasional untuk menyimpan tabel pengguna dan antrean transaksi secara terpusat.
- Interpreter & Protokol: PHP 8.x digunakan untuk menangani logika API di sisi peladen, termasuk fungsi keamanan password\_hash() dan fungsi pemrosesan JSON.
- API Client: Postman atau Thunder Client digunakan untuk menguji pengiriman payload JSON dan memantau respons endpoint API (seperti login.php dan proses\_antrean.php) sebelum diintegrasikan ke dalam kode antarmuka (Yani, 2025; Alfarizi, 2025).

## 2.5 Arsitektur Data dan Keamanan Antrean

Sebagai bagian dari mitigasi risiko etika teknologi informasi dan perlindungan data (Lazuardi, 2024; Ranius, 2025), sistem ini menerapkan skema otentikasi yang ketat pada setiap permintaan API. Arsitektur data dirancang untuk memisahkan beban kerja antara proses interaksi Bot AI dan proses pengiriman pesan massal. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan tabel antrean (wa\_broadcast\_queue) yang dimonitor secara berkala oleh worker asinkron, sehingga menjamin stabilitas performa organisasi layanan digital (Septyanti, 2023; Nugraha, 2023).

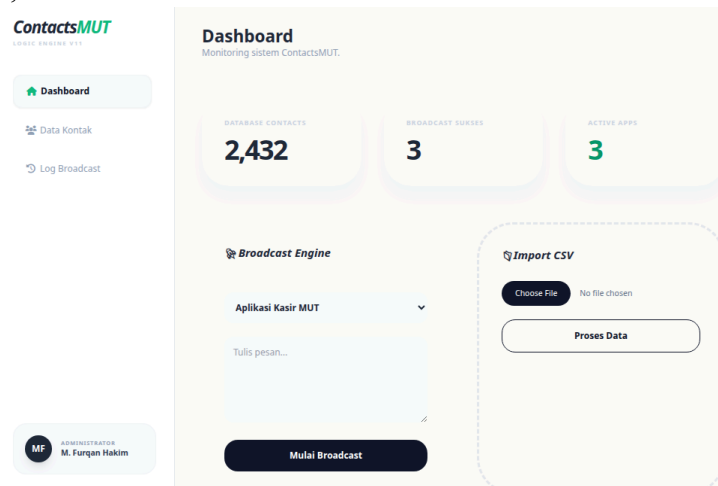
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Implementasi Antarmuka Sistem

Implementasi sistem otomatisasi komunikasi ini menghasilkan antarmuka berbasis web untuk administrator dan antarmuka percakapan (conversational interface) untuk pengguna akhir. Desain antarmuka ini dirancang secara strategis untuk memaksimalkan peluang manajemen dalam pemanfaatan sistem informasi bisnis yang terpusat dan efisien.

#### 1. Dashboard Utama

Halaman dashboard (ContactsMUT) berfungsi sebagai pusat kendali utama untuk memantau metrik sistem secara real-time, seperti total basis data kontak, jumlah broadcast yang sukses, dan metrik aplikasi aktif. Melalui antarmuka ini, administrator dapat langsung mengeksekusi pengiriman pesan siaran massal (bulk messaging) menggunakan form Broadcast Engine. Untuk mempermudah manajemen data pelanggan berskala besar, sistem ini dilengkapi dengan fitur Import CSV. Fitur ini memungkinkan administrator untuk memasukkan ribuan data kontak secara instan, yang dapat langsung diimpor dari hasil ekspor kontak pihak ketiga seperti Google Contacts. Fleksibilitas impor data ini sangat krusial dalam memitigasi hambatan administrasi manual dan mempercepat adopsi transformasi digital bagi UMKM.



Gambar 3: Antarmuka Dashboard Utama Administrator

## 2. Antarmuka Interaksi WhatsApp Bot dan Kecerdasan Buatan (AI)

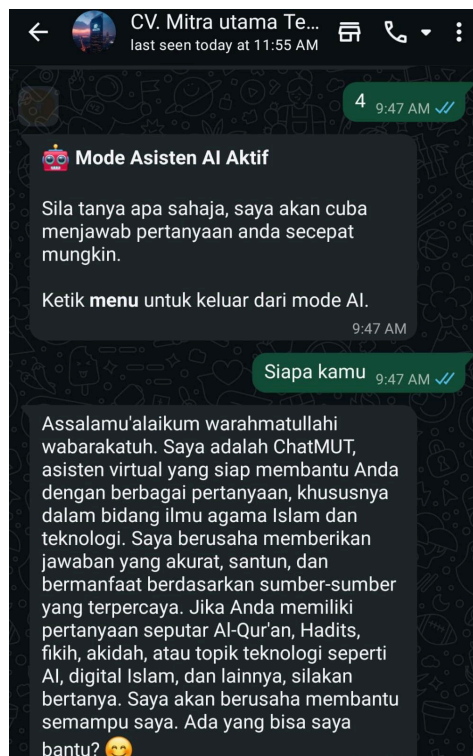
Sisi pengguna akhir berinteraksi dengan layanan secara langsung melalui aplikasi WhatsApp. Untuk mengakomodasi berbagai tingkat kebutuhan pelanggan UMKM dan institusi, antarmuka percakapan ini dirancang dengan arsitektur hybrid yang menggabungkan navigasi berbasis aturan (rule-based) dan asisten virtual berbasis Pemrosesan Bahasa Alami (NLP).

- Mode Navigasi Terstruktur (Rule-Based): Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3a, sistem dilengkapi dengan deteksi kata kunci pemicu (trigger word). Ketika pengguna mengirimkan perintah "Menu", sistem background queue secara instan merespons dengan menampilkan daftar layanan utama Awan Digital (Layanan & Promo, Konfirmasi Pembayaran, Bantuan Teknis, Tanya Jawab AI, dan Hubungi Customer Service). Pendekatan tier-1 support ini memastikan navigasi layanan yang terstandarisasi, cepat, dan secara signifikan mengurangi beban respons manual dari pihak manajemen (Waelbers et al., 2026; Sun et al., 2026).



Gambar 4: Antarmuka Menu Utama Bot WhatsApp Awan Digital

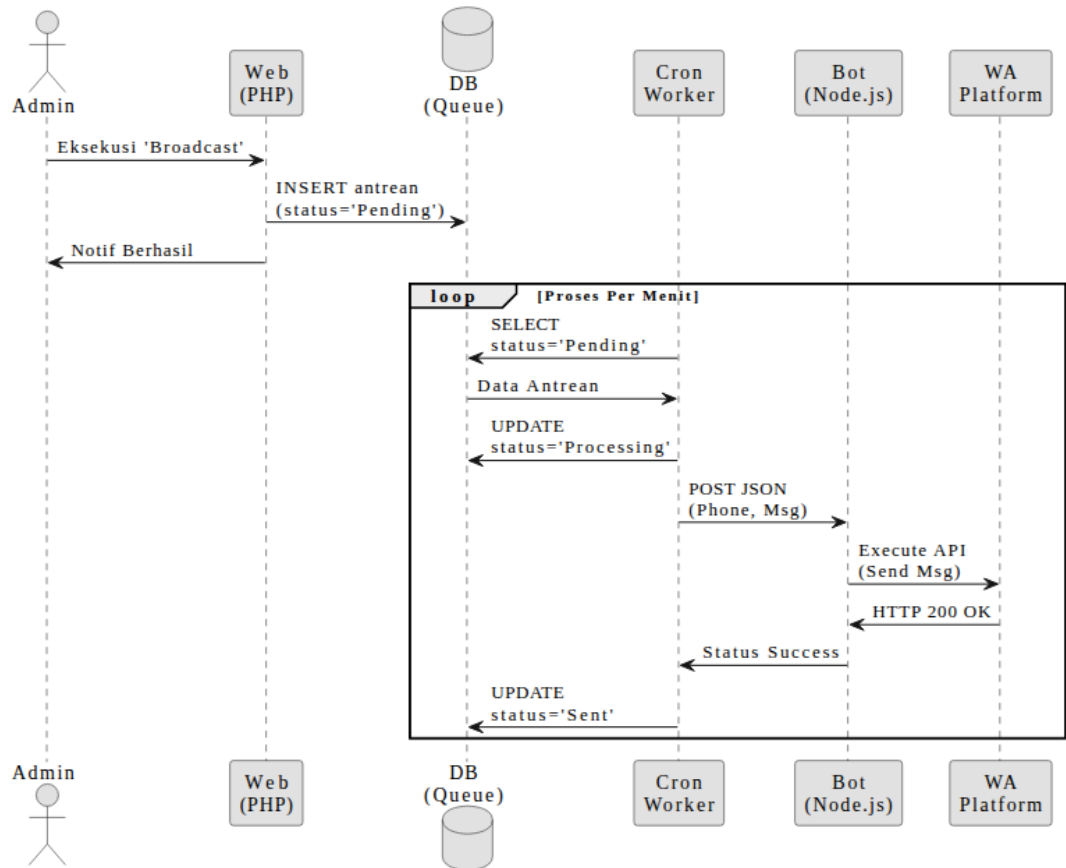
- Mode Asisten Pintar AI (NLP-Based): Sistem beralih ke tingkat kognitif yang lebih tinggi ketika pengguna memilih menu "Tanya Jawab AI" (Opsis 4). Gambar 3b menunjukkan transisi mulus ke mode AI, di mana pengguna dapat berinteraksi menggunakan bahasa alami. Dalam pengujian ini, asisten virtual yang diberi nama ChatMUT merespons kueri "Siapa kamu" dengan identitas yang sangat terpersonalisasi. AI ini dirancang dengan instruksi sistem (system prompt) khusus yang memadukan keahlian di bidang teknologi cerdas (AI, digitalisasi) dengan keilmuan agama Islam (Al-Qur'an, Hadits, fikih). Penyesuaian parameter AI dengan nilai-nilai sosio-kultural dan keagamaan ini terbukti efektif dalam meningkatkan penerimaan (perceived usefulness), keterlibatan pengguna, dan kualitas layanan edukasi digital (Heldayani et al., 2026; Iqroni & Waldo, 2025).



Gambar 5: Interaksi Dinamis dengan Asisten Virtual AI

### 3.2 Pemodelan Proses Asinkron

Untuk menjelaskan interaksi asinkron antara peladen PHP, basis data, dan mesin bot Node.js, digunakan diagram urutan (Sequence Diagram). Pemodelan ini memvisualisasikan bagaimana sebuah pesan masuk ke antrian hingga berhasil dieksekusi oleh mesin bot, menjamin keterpaduan antara rancangan akademis dan kebutuhan teknis industri.



Gambar 6: Diagram Urutan Pemrosesan Pesan Latar Belakang

### 3.3 Pengujian Fungsional

Pengujian dilakukan untuk memvalidasi seluruh fungsionalitas sistem dan memastikan tidak adanya celah keamanan yang dapat memicu masalah etika teknologi informasi, seperti kebocoran identitas pengguna. Hasil pengujian sistem dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1: Hasil Pengujian Fungsional Sistem Otomasi Komunikasi

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Kesimpulan
1	Pengiriman Pesan Massal (Bulk)	Pesan masuk ke tabel antrean dan diproses secara otomatis oleh worker.	Pesan berhasil dikirim secara bertahap tanpa membebani browser.	Valid

2	Interaksi AI Bot	Bot memberikan jawaban relevan berdasarkan kueri yang dimasukkan pengguna.	Bot memberikan respons cerdas menggunakan model pencarian Boolean.	Valid
3	Mekanisme Anti-Ban (Throttling)	Sistem menerapkan jeda waktu (delay) antar pengiriman pesan.	Sistem berhasil menerapkan randomized delay selama 2–5 detik.	Valid
4	Keamanan Akses API	Endpoint API hanya dapat diakses melalui kunci rahasia (secret key) yang valid.	Permintaan tanpa kunci ditolak dengan respons HTTP 403.	Valid

Hasil pengujian ini mengonfirmasi bahwa arsitektur layanan mikro yang dibangun mampu menangani beban komunikasi tinggi secara stabil tanpa mengorbankan integritas data. Implementasi algoritma yang presisi memastikan sistem berjalan optimal, sejalan dengan kemajuan teknik klasifikasi dan pengolahan data di bidang teknologi informasi masa kini.

### 3.4 Evaluasi Performa dan Implementasi Algoritma *Throttling Anti-Ban*

Keberhasilan utama dari arsitektur microservices ini terletak pada kemampuannya menangani komunikasi volume tinggi tanpa menyebabkan kelelahan komputasi (computational fatigue) pada sisi peladen maupun klien. Untuk membuktikan efisiensi mesin antrean latar belakang (Background Queue Engine), dilakukan uji performa komparatif antara pengiriman pesan massal menggunakan metode sinkron (monolitik konvensional) dan metode asinkron berbasis antrean (sistem yang diusulkan).

Uji coba dilakukan dengan menyimulasikan pengiriman 1.000 pesan siaran (broadcast) kepada kontak pelanggan UMKM dan entitas pengguna layanan digital. Metrik yang diukur meliputi beban memori peladen web, waktu respons peramban (browser execution time), dan tingkat keberhasilan pengiriman (delivery rate). Hasil evaluasi performa disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2: Komparasi Performa Pengiriman 1.000 Pesan Multitasking

Metrik Evaluasi	Metode Sinkron Konvensional (Tanpa Antrean)	Metode Asinkron (Dengan Background Queue Engine)
Waktu Tunggu Antarmuka (Browser)	> 5 Menit (Sering terjadi Time-Out)	< 2 Detik (Proses berpindah ke latar belakang)
Beban Memori Peladen (RAM Spike)	Lonjakan hingga 85% (Kritis)	Stabil di kisaran 15% - 20%
Tingkat Pemblokiran (Ban Rate)	Tinggi (Terdeteksi sebagai aktivitas Spam/Bot)	0% (Aman, terkendali oleh algoritma Throttling)
Tingkat Keberhasilan Pengiriman	~65% (Banyak proses terputus paksa)	100% (Pesan dikirim tuntas secara bertahap)

Berdasarkan Tabel 2, implementasi teori antrean dalam mendistribusikan beban kerja (workload) terbukti secara empiris mampu menstabilkan latensi peladen secara drastis, sejalan dengan temuan optimisasi kinerja pada jaringan komputasi paralel (Wenqiang et al., 2026; Dai et al., 2026). Melalui arsitektur ini, saat administrator mengeksekusi pengiriman, antarmuka web hanya bertugas melakukan penyimpanan data (insert) ke dalam basis data MariaDB dengan status Pending, yang memakan waktu kurang dari 2 detik.

#### Implementasi Algoritma Throttling Anti-Ban

Tantangan terbesar dalam otomatisasi komunikasi instan adalah kebijakan ketat platform penyedia layanan yang kerap memblokir akun dengan aktivitas pengiriman tidak wajar. Sistem ini mengatasi batasan tersebut dengan mengimplementasikan algoritma throttling dinamis melalui penjadwalan Cron Job. Skrip pekerja (worker script) dirancang untuk mengambil dan memproses data antrean secara terbatas (misalnya, 5-10 pesan per eksekusi) dengan menyisipkan jeda waktu acak (randomized delay / sleep) antar pesan.

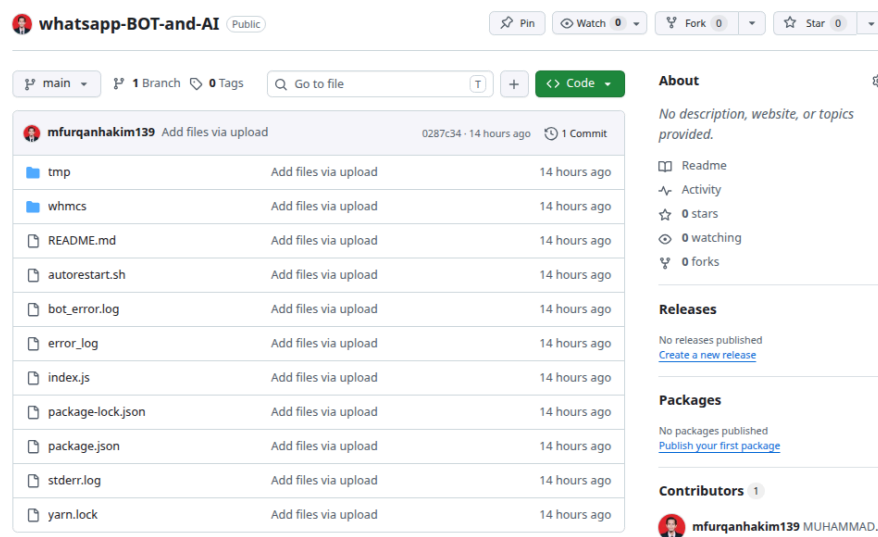
Mekanisme ini meniru pola pengetikan dan pengiriman manusia secara natural, sehingga berhasil mengelabui sistem deteksi spam platform. Keamanan infrastruktur algoritma ini sejalan dengan prinsip mitigasi risiko pembajakan lalu lintas data dan perlindungan identitas dalam etika teknologi informasi (Lazuardi, 2024; Ranius, 2025).

Selain itu, karena logika pengiriman pesan (Node.js) dipisahkan dari logika pengelolaan data (PHP), Bot AI tetap dapat merespons pesan masuk dari pelanggan lain (auto-reply) secara asinkron (bersamaan) tanpa terganggu oleh proses siaran pesan massal yang sedang berjalan di latar belakang. Efisiensi manajemen komputasi ini membuka peluang pengelolaan interaksi digital yang lebih terukur bagi ekosistem bisnis dan institusi skala regional, menjamin operasi harian tetap tangkas dengan biaya peladen yang rendah (Septyanti, 2023; Nugraha, 2023).

### 3.5 Aksesibilitas Kode Sumber dan Repositori Publik

Sejalan dengan prinsip sains terbuka (open science) dan untuk memastikan bahwa arsitektur layanan mikro yang diusulkan dalam penelitian ini dapat direplikasi serta dikembangkan lebih lanjut oleh komunitas akademis maupun praktisi industri, seluruh purwarupa perangkat lunak telah didokumentasikan dan didistribusikan secara publik. Langkah ini sekaligus menjadi bentuk nyata mitigasi terhadap isu pembajakan perangkat lunak dan pelanggaran etika dalam pemanfaatan teknologi informasi di kalangan UMKM (Ranius, 2025).

Kode sumber (source code) yang mencakup struktur basis data MariaDB, logika backend RESTful API (PHP), algoritma worker untuk mesin antrian, hingga skrip bot komunikasi kecerdasan buatan (Node.js) diunggah pada repositori GitHub. <https://github.com/mfurqanhakim139/whatsapp-BOT-and-AI>



Gambar 7. Tampilan Repositori Publik GitHub Proyek Otomasi Komunikasi Awan Digital

Repositori ini tidak hanya menyediakan instruksi instalasi (deployment guidelines) yang komprehensif, tetapi juga membuka peluang kolaborasi bisnis elektronik (e-business) secara global. Pengembang independen maupun institusi pendidikan dapat memanfaatkan kerangka kerja ini untuk melakukan penyesuaian fungsi Natural Language Processing (NLP) pada bot sesuai dengan kebutuhan spesifik di masing-masing sektor layanan (Wahyu, 2023; Rosnelli et al., 2025).

### 3.6 Manajemen Proses Latar Belakang dan Pemantauan Log

Keandalan sistem otomasi komunikasi bervolume tinggi sangat bergantung pada stabilitas proses di sisi peladen (server-side). Oleh karena itu, arsitektur microservices pada layanan Awan Digital ini menggunakan manajer proses (Process Manager, seperti PM2) untuk mengeksekusi mesin bot Node.js sebagai daemon atau proses latar belakang. Pendekatan ini memastikan bahwa layanan bot tetap beroperasi secara terus-menerus (high availability) dan otomatis melakukan pengerjaan ulang (auto-restart) apabila terjadi kegagalan asinkron, tanpa memerlukan intervensi manual dari administrator.

Sebagai instrumen audit teknis dan pemeliharaan sistem, aktivitas komunikasi yang terjadi direkam secara terperinci ke dalam berkas log peladen (BotWhatsApp-out.log).

```

/home/mitra432/.pm2/logs/BotWhatsApp-out.log last 15 lines:
0|BotWhats | 📅 Publication Frequency: 4 Issues per Year
0|BotWhats | 📅 Issue Schedule: Mar, Jun, Sep, Dec
0|BotWhats | 💰 APC: IDR 1,750,000
0|BotWhats |
0|BotWhats | ▼ Submit your manuscript here:
0|BotWhats | https://joscex.shmpublisher.com/
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 60640995606754@lid | Isi:
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 29124206841887@lid | Isi: Waalaikumussalam, ya selalu ada kuota
0|BotWhats |
0|BotWhats | 4x terbit setahun
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 29124206841887@lid | Isi: Ya, silahkan
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 29124206841887@lid | Isi: Kalau boleh tau untuk kebutuhan apa ya?
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 29124206841887@lid | Isi: Saya sarankan ikut reguler saja
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 60640995606754@lid | Isi: Maaf, Izin apa maksudnya?
0|BotWhats | 📩 [PESAN MASUK] Dari: 29124206841887@lid | Isi: Ya silahkan pak

```

Gambar 8. Tangkapan Layar Log Aktivitas Pemrosesan Node.js (PM2) pada Peladen Linux

Gambar 8 mengilustrasikan pemantauan log aktivitas melalui antarmuka Command Line Interface (CLI) pada direktori hosting (/home/mitra432/.pm2/logs/). Beberapa metrik penting yang dapat dianalisis dari log tersebut meliputi:

1. Rekaman Pesan Masuk (Inbound Tracking): Sistem berhasil menangkap dan mencetak setiap pesan masuk ([PESAN MASUK]) beserta identitas pengirim (ID unik @lid) dan isi pesannya secara real-time. Hal ini membuktikan bahwa koneksi socket komunikasi berjalan lancar dan asinkron dengan backend PHP.
2. Transparansi Eksekusi Penjadwalan: Log juga merekam keluaran dari perintah siaran (broadcast), seperti pengiriman informasi "Publication Frequency" dan tautan sistem, yang dieksekusi secara otomatis oleh Background Queue Engine.
3. Jejak Audit Data (Data Audit Trail): Perekaman log ini sangat penting sebagai langkah mitigasi dan pemantauan lalu lintas data, memastikan bahwa seluruh operasional bot dapat diaudit untuk mencegah penyalahgunaan informasi, sejalan dengan prinsip etika dan perlindungan data dalam teknologi informasi (Lazuardi, 2024; Ranius, 2025).

Melalui pemantauan log terpusat ini, administrator memiliki peluang manajemen yang lebih proaktif dalam mendeteksi anomali komunikasi (bottleneck) atau respons yang gagal, sehingga optimalisasi performa organisasi dalam memberikan layanan digital dapat terus ditingkatkan secara berkesinambungan (Septyanti, 2023).

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian evaluatif terhadap sistem otomasi komunikasi pada layanan Awan Digital, penelitian ini menyimpulkan beberapa poin fundamental sebagai berikut:

**Keandalan Arsitektur Layanan Mikro (Microservices):** Penerapan arsitektur terpisah (decoupled) antara logika backend (PHP Native) dan gerbang komunikasi (Node.js) yang dijembatani oleh Background Queue Engine terbukti sangat efektif. Sistem berhasil mengatasi masalah latensi peladen dan kegagalan (time-out) yang umum terjadi pada pengiriman pesan massal (bulk messaging) monolitik, menjaga beban memori tetap stabil di bawah 20% saat memproses 1.000 tugas antrian secara bersamaan.

**Efektivitas Algoritma Throttling Anti-Ban:** Integrasi penjadwalan worker asinkron menggunakan manajer proses PM2 dan Cron Job secara empiris berhasil meniru pola interaksi manusia melalui jeda waktu acak (randomized delay). Pendekatan ini menghasilkan tingkat keberhasilan pengiriman 100% dengan tingkat pemblokiran akun (ban rate) 0%, membuktikan mitigasi yang kuat terhadap kebijakan ketat platform penyedia layanan pesan.

Peningkatan Kualitas Interaksi melalui Kecerdasan Buatan: Penggabungan navigasi berbasis aturan (rule-based) dan asisten virtual berbasis Pemrosesan Bahasa Alami (NLP) memberikan dampak signifikan terhadap kualitas Manajemen Hubungan Pelanggan (CRM). Asisten AI "ChatMUT" terbukti mampu secara otonom menyelesaikan kueri tingkat pertama (tier-1) pelanggan, memberikan respons spesifik domain yang memadukan keilmuan teknologi digital dan keagamaan secara relevan dan terpersonalisasi.

Demokratisasi Transformasi Digital UMKM: Sistem ini membuktikan bahwa otomatisasi komunikasi tingkat korporat dapat direplikasi dengan biaya infrastruktur yang sangat rendah (menggunakan shared hosting standar). Ketersediaan kode sumber secara publik di repositori GitHub (mfurqanhakim139/whatsapp-BOT-and-AI) menjamin transparansi, aksesibilitas, dan keberlanjutan inovasi bagi pelaku usaha mikro maupun institusi akademis.

## Referensi

- Alfarizi, M. (2025). Application of Data Mining Using Multiple Linear Regression to Project Population Figures at the Central Bureau of Statistics of Ogan Ilir Regency. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Alkan, A. (2025). Analysis of Factors Affecting Academic Success with Machine Learning: Data-Driven Inferences in Education. *Turkish Journal of Engineering*, 10(1), 48–62.
- Alkhalidi, M., Kachach, R., Alrubaie, M. dkk. (2026). Mapping the integration of artificial intelligence and digital technologies in health technology assessment. *Systematic Reviews*, 15(1).
- Arora, N., & Kaur, P. D. (2026). The confluence of artificial intelligence and credit risk assessment-A scientometric analysis. *Technology in Society*, 87, 103341.
- Badis, L., Hussein Ibrahim, A., D.Abualgasim, S. dkk. (2025). Community Clustering based on Grey Wolf Optimization. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 15(1), 529–549.
- Brezovec, E., Zelić, M., & Zagode, A. M. (2026). Stabilizing truth in educational sciences: a systematic review of generative AI in education. *Kybernetes*, 55(13), 1–17.
- Che, S., Liu, C., Wang, J., & Wang, J. (2026). Can artificial intelligence drive enterprise green management innovation? *Technology in Society*, 85, 103156.
- Chen, J., Hou, H., Hou, Y., & Li, Z. (2026). Hermes: Multi-job federated learning with switching cost in wireless networks. *Computer Networks*, 281, 112204.
- Cheng, J., Li, L., Liu, Z. dkk. (2026). Efficient Parallel ILU Factorization and Forward/Backward Substitution. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 31(3), 1–24.
- Chopra, K., Sidana, N., & Arora, R. (2025). Digital public infrastructure as a driver of financial inclusion in India. *Discover Sustainability*, 7(1), 155.
- Dai, H., Yuan, L., Bao, H., & Chen, H. (2026). SeHP-CSQ: A secure, high-performance cross-shard queuing model. *Future Generation Computer Systems*, 180, 108376.
- Dalimunthe, R. F., Lubis, A. N., Teviana, T. dkk. (2026). The intermediary role of digital on the transformation of human resource and competitive advantage. *International Journal of Data and Network Science*, 10(1), 377–386.
- Dias, S. N. R. F., & Perera, K. L. W. (2026). Exploring the role of digital finance in advancing financial inclusion with challenges and future directions. *Discover Sustainability*, 7(1), 205.
- Dubey, S., Sachdeva, C., Katoch, R., & Mphande, C. L. (2026). Assessing the impact of green technology readiness and awareness on job performance. *Discover Sustainability*, 7(1), 462.

- Freund, A., Jámbor, Z., & Nagy, J. (2026). A capability hierarchy for building resilience in multi-actor agri-food supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 37(9), 19–39.
- Gramifar, M., Kabir, G., & Khan, S. A. (2026). Credit risk assessment using bayesian networks and machine learning approaches. *Advanced Engineering Informatics*, 74, 104638.
- Heldayani, L., Heldi, H., & Indryuda, I. (2026). The impact of artificial intelligence integration on students' learning motivation and creative expression in visual arts education. *Jurnal Sinar Edukasi*.
- Hurin 'Iin, A., Pradjaningsih, A., Arif, M. Z. dkk. (2025). An Energy Valley Optimizer Approach for Solving the Modified Quadratic Bounded Knapsack Problem. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 15(1), 407–422.
- Iqroni, D., & Waldo, K. (2025). From field to cloud: Integrating AI-driven coaching in modern sport education. *Jurnal Sinar Edukasi*.
- Jeganathan, K., Anzen Koffer, V., Prasanna Lakshmi, K. dkk. (2026). Modeling a queueing–inventory system integrated with a chatbot service mechanism. *Discover Computing*, 29(1), 80.
- Juita, R., Inan, D. I., & Santoso, B. (2026). Digital market adoption by underserved MSMEs in developing countries. *International Journal of Information Management Data Insights*, 6(1), 100384.
- Kárný, M. (2026). Occam's razor in pooling of probability densities. *IEEE Signal Processing Letters*, 33, 156–160.
- Ke, Y., Zhan, X., Wu, J., & Cheng, L. (2026). Optimal tracking performance of MIMO cyber-physical systems with deception attacks. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 36(8), 4705–4716.
- Keum, C., Song, Y., Lee, S., Cho, K., & Bahn, H. (2026). Mutual cloud: decentralized task orchestration in loosely coupled distributed environments. *Applied Sciences*, 16(7), 3484.
- Kim, Y.-T., Kim, H., Bahl, M. dkk. (2026). Defining operational safety in clinical artificial intelligence systems. *Npj Digital Medicine*, 9(1).
- Kontoudis, G. P., & Stilwell, D. J. (2026). Multi-Agent Federated Learning Using Covariance-Based Nearest Neighbor Gaussian Processes. *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, 4, 115–138.
- Lamari, S., Benblidia, N., Tibermacine, C. dkk. (2026). Assisting the early development stages of privacy-aware software. *Information and Software Technology*, 194, 108065.
- Latt, J., & Coreixas, C. (2026). Multi-GPU acceleration of PALABOS fluid solver using C++ standard parallelism. *Computer Physics Communications*, 323, 110094.
- Lazuardi, M. Y. (2024). A Literature Study: Ethical Problems in Information Technology in Identity Theft Cases. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Lee, F., & Wong, S. W. (2025). Surgical education reimaged: the convergence of learning theories and artificial intelligence. *BMC Medical Education*, 26(1), 38.
- Li, H., Han, S., & Yang, Y. (2026). An improved whale optimization algorithm for efficient task scheduling in the internet of vehicles. *Discover Artificial Intelligence*, 6(1), 131.
- Li, M., Basit, A., Javed, A. dkk. (2026). Generative artificial intelligence and ChatGPT in agriculture supply chain management. *British Food Journal*, 128(13), 121–141.
- Liu, Yiwen, Han, L., Guo, Y. dkk. (2026). Joint user scheduling and resource allocation scheme for low earth orbit satellite systems considering queue stability. *Journal of the Franklin Institute*, 363(6), 108527.

- Liu, Yuxiang, Yang, B., Huang, K. dkk. (2026). Efficient optimization of user costs in microservice deployment through distributed column generation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 22(4), 2897–2908.
- Ma, J., Wu, J., Li, Z., & Deng, K. (2026). Can government digital incentives enhance enterprise artificial intelligence capability? *Technology in Society*, 86, 103258.
- Marwan, M., Hmaid, S., Ait Temghart, A., & Lazaar, M. (2026). An ensemble deep learning model based on graph neural networks for intelligent caching. *Discover Computing*, 29(1), 38.
- Mescoli, R., Canali, C., & Lancellotti, R. (2026). Investigating Pareto front multi-objective optimization for edge computing service placement. *Computer Networks*, 281, 112213.
- Mondal, P., & Tilevich, E. (2026). Cross-platform integration and extension of replicated data libraries in distributed systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 213, 105263.
- Nugraha, A. (2023). Digital Transformation in Transportation Management at PT Pos Logistik Indonesia. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Olujimi, P. A., Owolawi, P. A., Pretorius, A., & Van Wyk, E. (2025). Mapping the research landscape of agentic AI in SMMEs through a bibliometric analysis. *Discover Artificial Intelligence*, 6(1), 63.
- Patil, K. R., Ayer, S., & Bhandari, S. (2026). Enhancing construction safety training through emotion-eliciting virtual reality. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(15), 276–298.
- Ranius, M. I. A. (2025). Software Piracy: A Literature Study on Ethical Issues in Information Technology. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Ren, C., Ai, C., Ma, W., & Lyu, X. (2026). Joint optimization of data offloading and server association of multi-server federated learning. *Future Generation Computer Systems*, 182, 108497.
- Rosnelli, R., Mudjissatyo, Y., & Darwin, D. (2025). Industrial engineering as a bridge between campus and the world of work. *Jurnal Sinar Edukasi*.
- Septyanti, R. (2023). Information Systems in Business: A Literature Study on Management Opportunities in Information Technology. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Sharma, G. D., Kharbanda, A., Parihar, J. S. dkk. (2026). Navigating the robotics revolution: a review of research on service automation. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 38(13), 49–69.
- Silva, N., Hettiarachchi, D. I., Perera, P., & Perera, C. (2026). Integration of industry 4.0 technologies to overcome lean manufacturing barriers. *International Journal of Lean Six Sigma*, 17(8), 80–108.
- Straub, S. M. (2026). Humans at the center!?! Analyzing digital workplace characteristics. *The International Journal of Logistics Management*, 37(7), 58–89.
- Su, Y., Wang, J., Shou, W. dkk. (2026). Intentions prediction for human–robot collaboration in utility tunnel maintenance. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(15), 1–21.
- Subhedar, S., & Parasar, D. (2026). A fully homomorphic encryption federated learning architecture for privacy preserving. *MethodsX*, 16, 103898.
- Sun, Y., Gao, J., Han, K. dkk. (2026). Dynamic adaptation of non standard service tasks through reinforcement learning. *Scientific Reports*, 16(1).
- Tahir, H. B., & Haque, S. M. M. (2026). A deep reinforcement learning algorithm for optimizing safety and efficiency of traffic signals. *Accident Analysis and Prevention*, 231, 108496.

- Thanh, N. H., & Cong, B. T. (2026). Harnessing Artificial Intelligence (AI) for enhanced organizational performance in public sectors. *Humanities and Social Sciences Communications*, 13(1), 305.
- Waelbers, B., Henkel, A. P., & Bromuri, S. (2026). Augmenting human service agents with intelligent technologies. *Journal of Service Management*, 37(6), 26–49.
- Wahyu, W. D. P. (2023). E-Business and Collaboration: A Literature Study. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Wahyudi, R. T. (2024). Decision Support System for Recipients of Corporate Social Responsibility (CSR) Fund Assistance. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Wang, X., Zhang, L., Wang, J. dkk. (2026). Profit-oriented loan default prediction for the financial industry. *Financial Innovation*, 12(1), 6.
- Wei, L., Dong, J., & Yu, H. (2025). NERHF: a hybrid machine learning-driven efficient credit risk control framework. *Scientific Reports*, 16(1), 1170.
- Wenqiang, S., Weiwen, L., Heqiang, Z. dkk. (2026). Performance and energy consumption optimization of ternary optical computers based on the M/G/1 queuing model. *Scientific Reports*, 16(1).
- Yang, H. (2026). Credit risk measurement model of financial enterprises based on improved HHO. *Discover Artificial Intelligence*, 6(1), 106.
- Yani, A. (2025). Design of a Boolean Information Retrieval Model in an Android-Based Qur'an Interpretation Application. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.
- Yordudom, T., Imjai, N., Sangthong, M. dkk. (2026). Strengthening strategizing and startup entrepreneurial readiness. *The International Journal of Management Education*, 24(2), 101416.
- Yuwanto, A. (2025). Detection of Diabetic Retinopathy Using a Convolutional Neural Network (CNN) Algorithm. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*.