

# Implementasi Sistem *Reverse Vending Machine* (RVM) Berbasis IoT Menggunakan *MobileNet* SSD untuk Deteksi Objek dan Mekanisme Insentif Poin pada *Platform* Sampahmas

Gilang Aryo Pamungkas <sup>1\*</sup>, Andhika Giri Persada <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia.

Email: 21523122@students.uui.ac.id <sup>1\*</sup>, andhika.giri@uui.ac.id <sup>2</sup>

## Histori Artikel:

*Dikirim* 1 November 2024; *Diterima dalam bentuk revisi* 15 November 2024; *Diterima* 30 Desember 2024; *Diterbitkan* 10 Januari 2025. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMik Indonesia Banda Aceh.

## Abstrak

Pengelolaan sampah secara efisien menjadi tantangan serius terutama dalam hal pengumpulan dan pemilahan sampah. Sampah plastik menjadi salah satu penyumbang terbesar dalam polusi lingkungan. Sebagai langkah untuk mengurangi dampak tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem Reverse Vending Machine (RVM) berbasis Internet of Things sebagai solusi otomatisasi pengelolaan sampah botol plastik. Sistem dikembangkan dengan mekanisme insentif berupa reward berbasis poin. Pengguna yang memasukkan botol plastik melalui sistem RVM akan memperoleh poin yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keuntungan. Sistem mengintegrasikan metode autentikasi menggunakan kartu dan QR Code untuk identifikasi pengguna, serta ESP32-CAM dan OpenCV untuk deteksi botol secara real-time. Sistem dirancang menggunakan pendekatan Agile yang adaptif terhadap kebutuhan yang muncul selama proses pengembangan. Proses pengembangan dilakukan secara iteratif dengan tiga fase utama yaitu pengembangan fungsionalitas inti, integrasi sistem, dan optimasi performa. Hasil dari penelitian adalah mengimplementasikan mekanisme reward berbasis poin untuk mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah terutama botol plastik. Sistem reward diharapkan dapat menjadi insentif yang efektif untuk meningkatkan kesadaran dan partisipasi aktif masyarakat dalam program daur ulang sampah plastik.

**Kata Kunci:** Reverse Vending Machine; IoT; MobileNet SSD; Deteksi Objek; ESP32-CAM.

## Abstract

Efficient waste management presents a persistent challenge, particularly in the areas of waste collection and sorting. Among the contributors to environmental pollution, plastic waste stands out as one of the most significant. To address this issue, this study introduces a Reverse Vending Machine (RVM) system leveraging the Internet of Things (IoT) to automate the management of plastic bottle waste. The proposed system incorporates an incentive mechanism based on a point-reward system, wherein users earn redeemable points by depositing plastic bottles into the RVM. User authentication is facilitated through card and QR code integration, while ESP32-CAM and OpenCV technologies enable real-time bottle detection. The system's development employed the Agile methodology, which allows adaptability to evolving requirements throughout the development process. The iterative approach consisted of three primary phases core functionality development, system integration, and performance optimization. The study's outcome is the deployment of a point-based reward mechanism aimed at encouraging community involvement in plastic waste management. By providing tangible incentives, this system seeks to enhance public awareness and actively promote participation in recycling initiatives for plastic waste.

**Keyword:** Reverse Vending Machine; IoT; MobileNet SSD; Object Detection; ESP32-CAM.

## 1. Pendahuluan

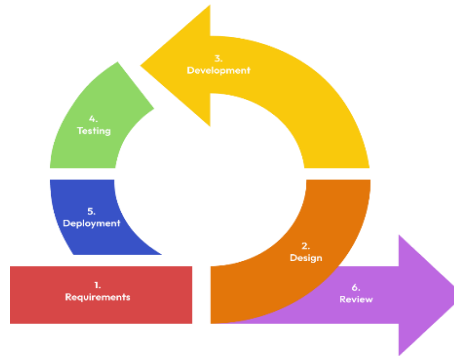
Permasalahan pengelolaan sampah plastik di Indonesia telah menjadi isu yang signifikan. Dengan populasi yang terus bertambah, volume sampah, terutama plastik, semakin sulit dikendalikan. Menurut Law *et al.* (2020), Indonesia termasuk negara dengan produksi sampah plastik terbesar di dunia, yang sebagian besar berakhir mencemari lingkungan, khususnya kawasan pesisir dan perairan. Data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2023) menunjukkan bahwa volume sampah harian di Daerah Istimewa Yogyakarta mencapai 1.506 ton, dengan komposisi terbesar berupa sisa makanan (50,56%) dan sampah plastik sebagai kontributor terbesar kedua (27,94%). Sampah plastik yang tidak dikelola secara memadai dapat merusak ekosistem laut, mengancam keberlanjutan biota air, dan menimbulkan risiko kesehatan pada manusia. Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan sampah plastik adalah rendahnya kesadaran masyarakat dalam memilah dan mendaur ulang. Meskipun berbagai inisiatif seperti *bank sampah* telah diperkenalkan, tingkat partisipasi masyarakat tetap rendah, sebagaimana terlihat di Kabupaten Sleman, Yogyakarta, di mana tingkat partisipasi hanya mencapai 1,65% hingga 1,72% (Astuti *et al.*, 2023). Situasi ini diperburuk oleh penutupan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan pada Juli 2023, yang menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara kebijakan pengelolaan sampah dan implementasi di lapangan (Tasya, 2023). Kondisi ini menekankan perlunya pendekatan baru yang inovatif dan berorientasi pada hasil untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah. Kesadaran masyarakat yang rendah menciptakan peluang untuk merancang model bisnis yang mampu mendorong keterlibatan lebih besar dalam aktivitas daur ulang sampah plastik. Model ini tidak hanya bertujuan meningkatkan pengelolaan sampah, tetapi juga mengembangkan nilai ekonomi yang memberikan keuntungan bagi berbagai pihak. Teknologi menjadi elemen kunci dalam menciptakan solusi yang efisien.

Salah satu konsep yang muncul adalah platform *Sampahmas*, yang dirancang untuk menangani pengelolaan sampah anorganik. *Sampahmas* menawarkan dua fitur utama: aplikasi *e-commerce* dan *Reverse Vending Machine* (RVM). Melalui sistem ini, masyarakat dapat menukarkan sampah anorganik yang dikumpulkan dengan poin insentif. Struk (2019) mencatat bahwa mekanisme insentif semacam ini, yang memberikan manfaat langsung berupa pengurangan biaya atau penghargaan finansial, efektif dalam meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah, sekaligus menciptakan sistem yang lebih berkeadilan. Pengembangan *Sampahmas* melibatkan sistem deteksi otomatis untuk sampah anorganik, khususnya botol plastik. Sistem ini memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan pengiriman dan penerimaan data secara *real-time* serta konektivitas langsung dengan aplikasi. Suarna dan Sopyan (2023) menjelaskan bahwa *IoT* memiliki peran penting dalam era modern, dengan kemampuan untuk menghubungkan perangkat, mendukung proses komputasi, dan otomatisasi komunikasi. Teknologi ini mengintegrasikan dunia fisik dan digital melalui mekanisme yang efisien. Teknologi *machine learning* juga diterapkan untuk mendukung proses identifikasi objek, sehingga prediksi dan pengambilan keputusan dapat dilakukan secara otomatis. Wardhana *et al.* (2023) menjelaskan bahwa *machine learning* menggunakan algoritma pembelajaran, baik *supervised* maupun *unsupervised*, untuk mengenali pola dari data. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengelolaan sampah plastik yang sepenuhnya terotomatisasi melalui integrasi *IoT*, *machine learning*, dan mekanisme insentif berbasis poin.

## 2. Metode Penelitian

Dalam pengembangan sistem deteksi botol *Sampahmas* yang terintegrasi dengan *reverse vending machine*, pendekatan yang digunakan adalah metode Agile. Menurut Naufal Faruq & Maryam, (2024), Agile adalah metode pengembangan yang mampu menghasilkan kinerja yang efektif dan kolaboratif, serta memastikan dokumentasi yang lengkap dan relevan dengan tren terkini. Pengembangan dilakukan melalui beberapa tahapan utama. Pada tahap analisis kebutuhan, dilakukan penentuan fitur-fitur yang akan dikembangkan dalam satu siklus sprint yakni deteksi botol, integrasi *QR Code* dan

pengiriman data *real-time*. Menurut Kuhrmann *et al.* (2022), konsep dasar Agile menekankan bahwa peran organisasi dan kolaborasi tim memegang peranan penting dalam keberhasilan pengembangan perangkat lunak. Prinsip ini menjadi landasan dalam memastikan bahwa setiap tahapan pengembangan sistem berjalan secara terstruktur dan iteratif dalam *sprint* untuk mencapai tujuan yang diinginkan.



Gambar 1. Metode Agile

Tahap pengembangan sistem dijalankan sesuai dengan tugas-tugas yang telah direncanakan dalam *sprint*. Menurut Santoso *et al.*, (2022), *sprint* adalah periode waktu yang ditentukan untuk menyelesaikan bagian tertentu dari produk yang sedang dikembangkan dengan durasi yang terbatas. Proses pengembangan dalam *sprint* meliputi implementasi pembuatan *API Gateway* pada sisi *backend* untuk pengiriman data botol dari kontroler menuju server, serta pengembangan sistem autentikasi yang mengutilisasi *RFID* dan *QR Code*. Pada aspek Internet of Things (IoT), dilakukan integrasi sensor inframerah untuk deteksi botol dan konfigurasi *ESP32-CAM* guna keperluan pengambilan gambar. Sistem deteksi objek didesain untuk mendeteksi keberadaan sampah botol. Untuk identifikasi objek sampah botol digunakan objek deteksi dengan memanfaatkan model arsitektur *MobileNet-SSD*. Model arsitektur ini terdiri dari dua jaringan utama yaitu *MobileNet* yang berfungsi sebagai jaringan untuk ekstraksi fitur dan *SSD* (*Single Shot Multibox Detector*) yang bertindak sebagai pendeteksi objek. *SSD* sendiri merupakan metode one-stage detector yang mampu melakukan klasifikasi dan lokalisasi objek secara bersamaan dalam satu jaringan. *SSD* memanfaatkan *multiple layers* dengan skala dan rasio aspek yang berbeda, sehingga mampu mendeteksi objek dengan berbagai ukuran secara efisien. Dengan memanfaatkan matriks hasil konvolusi pada resolusi yang berbeda, *SSD* dapat mencapai deteksi objek secara *real-time* (Gupta *et al.*, 2023). Kelebihan lainnya dibandingkan metode lain terletak pada kecepatan inferensi yang lebih tinggi yang menjadikannya ideal untuk aplikasi *real-time* pada perangkat dengan sumber daya terbatas. *MobileNet-SSD* diakui sebagai model yang telah dioptimalkan untuk meningkatkan kecepatan pemrosesan, sehingga sangat cocok diaplikasikan pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya seperti *ESP32-CAM*. Dengan kombinasi dari kedua jaringan ini, sistem mampu untuk mendeteksi dan mengenali botol plastik secara cepat dan tetap mempertahankan tingkat akurasi yang tinggi dibandingkan dengan desain *deep learning* konvensional yang cenderung hanya meningkatkan kedalaman jaringan (Pakpahan & Dewi, 2021).

Berdasarkan hasil penelitian oleh Islam *et al.*, (2024), *MobileNet-SSD* terbukti memiliki performa *real-time* terbaik dengan waktu inferensi tercepat dibandingkan algoritma lainnya, meskipun memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah. Selain itu, metode *Convolutional Neural Network* (CNN) yang digunakan dalam model ini telah banyak diakui efektif untuk menyelesaikan permasalahan terkait deteksi objek dan pengenalan citra karena tingkat akurasi yang tinggi dengan hasil yang signifikan dalam pengenalan citra (Astuti *et al.*, 2022). Dalam implementasi deteksi objek, *MobileNet-SSD* dipilih sebagai model utama dalam penelitian ini karena memiliki kecepatan dan akurasi yang baik dalam mendeteksi objek. *SSD* (*Single Shot Multibox Detector*) dikenal sebagai *one-stage detector* yang mampu melakukan proses klasifikasi dan lokalisasi objek secara bersamaan dalam satu jaringan

sehingga lebih efisien dibandingkan model lain seperti *Faster R-CNN* dan *YOLO* (I. Astuti *et al.*, 2022). Setelah tahap pengembangan selesai, dilakukan testing untuk memastikan sistem berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Proses review mencakup evaluasi performa yang meliputi kecepatan respons sistem, akurasi deteksi objek, dan reliabilitas komunikasi data menggunakan metode pengujian yang divalidasi. Analisis feedback dilakukan terhadap umpan balik dari pengguna awal dan masukan dari *stakeholder* untuk mengidentifikasi area perbaikan.

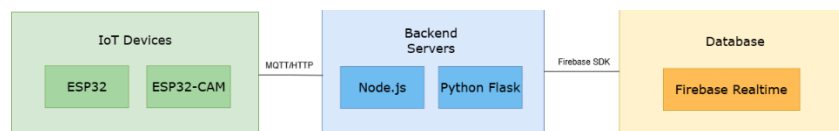
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil

##### 3.1.1 Requirement

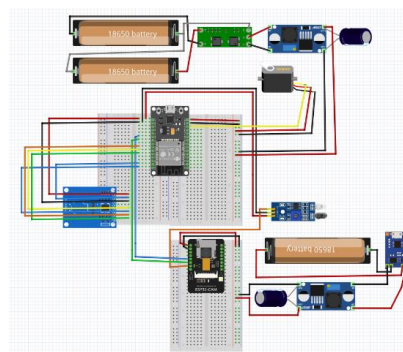
Kebutuhan utama sistem meliputi mekanisme autentikasi pengguna melalui dua metode, yaitu penggunaan kartu identifikasi pengguna dan kode unik yang dapat dipindai. Sistem juga harus mampu mendeteksi dan memvalidasi botol plastik yang dimasukkan pengguna dengan tingkat akurasi yang tinggi. Data hasil deteksi perlu dikirim secara *real-time* untuk memastikan informasi terkini dapat ditampilkan kepada pengguna. Selain itu, sistem harus menyediakan fitur sinkronisasi data yang memungkinkan pengguna melihat jumlah poin yang diperoleh secara langsung. Kebutuhan terakhir adalah implementasi mekanisme pemberian insentif berupa poin yang dikonversi secara otomatis setiap kali botol plastik berhasil divalidasi. Semua data aktivitas pengguna, termasuk autentikasi, jumlah botol yang terkumpul, dan poin, harus disimpan dalam basis data yang dapat diakses secara *daring* dan mendukung pembaruan data secara cepat.

##### 3.1.2 Design



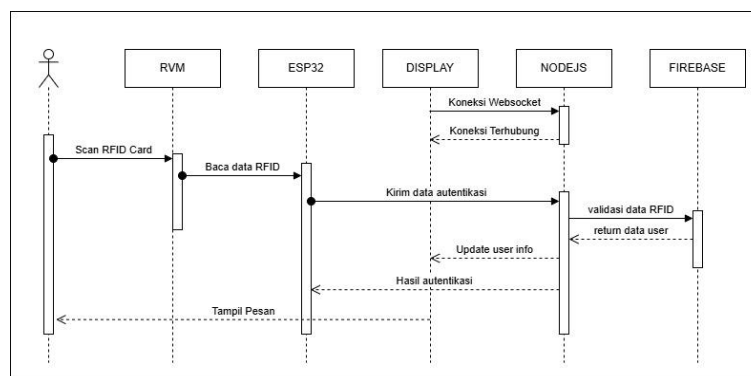
Gambar 2. Arsitektur Sistem Reverse Vending Machine

Arsitektur sistem Reverse Vending Machine (RVM) dirancang untuk mengintegrasikan perangkat keras *IoT* dan server *backend*. Server *backend* menggunakan dua teknologi utama yaitu *Node.js* dan *Python Flask*. *Node.js* berperan sebagai *API Gateway* yang menangani proses autentikasi pengguna dan komunikasi dengan *Firebase Realtime Database* untuk sinkronisasi data poin pengguna. Sementara itu, *Flask* digunakan khusus untuk analisis gambar yang dikirim dari *ESP32-CAM* dengan memanfaatkan algoritma *MobileNet SSD* melalui *OpenCV*.

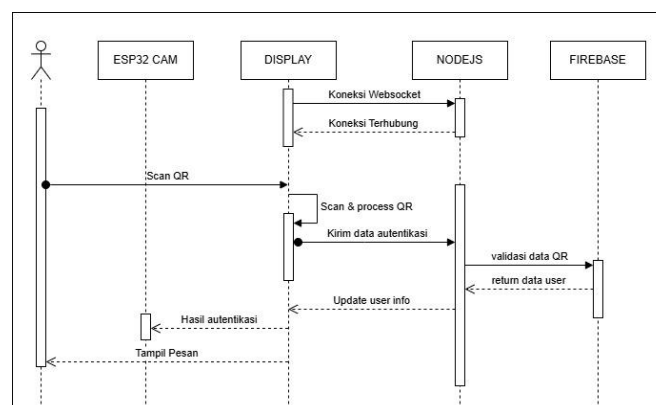


Gambar 3. Desain sirkuit diagram

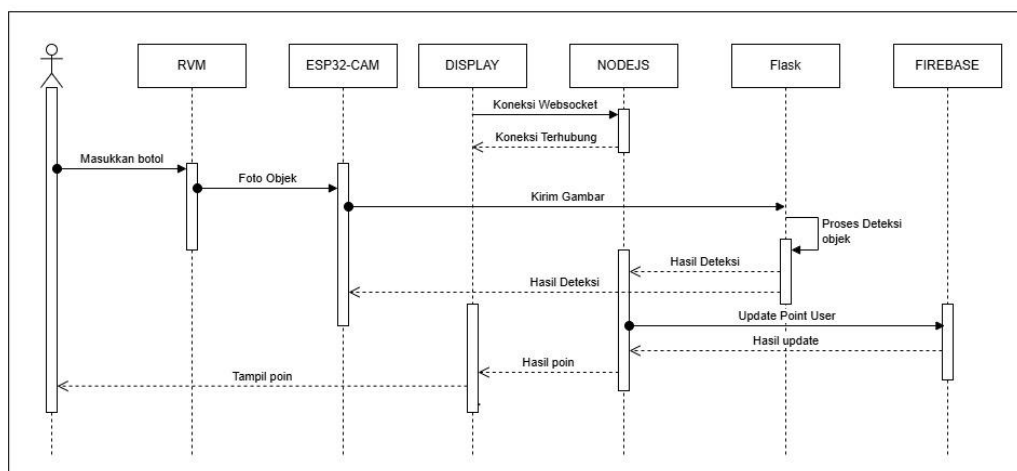
Terlihat pada gambar, perangkat *ESP32* berfungsi sebagai kontroler utama yang mengelola proses autentikasi melalui penggunaan kartu *RFID* serta memastikan kelancaran komunikasi data dengan server backend. Selain itu, terdapat juga peran dari *ESP32-CAM* yang bertugas untuk mengambil gambar botol plastik sebagai bagian dari proses validasi objek tersebut. Penggunaan sensor inframerah berfungsi untuk mendeteksi keberadaan objek sampah botol secara awal sebelum proses pengambilan gambar dilakukan. Selain itu, terdapat tambahan tablet display yang berfungsi untuk menampilkan informasi langsung kepada pengguna dalam sistem *Reverse Vending Machine (RVM)*. Tablet layar ini terkoneksi dengan *webserver* yang dijalankan pada *ESP32* sehingga data seperti hasil autentikasi, jumlah botol yang berhasil terdeteksi, dan poin yang diperoleh ditampilkan secara *real-time*. Pada aspek server *backend*, sistem ini mengandalkan *Node.js* sebagai *API Gateway* yang menjalankan fungsi-fungsi penting seperti pengelolaan autentikasi pengguna, komunikasi data, dan manajemen sinkronisasi poin secara langsung. Disamping itu, *Flask* digunakan sebagai server yang memproses gambar melalui penerapan algoritma *MobileNet SSD* dan *OpenCV*. Untuk pengelolaan data pengguna seperti jumlah botol yang berhasil dikumpulkan dan poin yang diperoleh sistem ini menyimpan informasi tersebut dalam *Firebase Realtime Database*. Solusi ini dipilih untuk memastikan data dapat diakses dengan latensi yang rendah dan secara *real-time* sehingga memberikan pengalaman pengguna yang optimal.

Gambar 4. *Sequence Diagram* Autentikasi dengan Kartu

Gambar 4 menunjukkan alur proses autentikasi menggunakan kartu *RFID* pada sistem *RVM*. Alur autentikasi dimulai ketika pengguna menempelkan kartu pada *reader* yang terpasang di *RVM*. *ESP32* akan membaca data kartu tersebut dan mengirimkannya ke *Node.js* server. Server kemudian melakukan validasi data *RFID* dengan *Firebase database* untuk memverifikasi identitas pengguna. Setelah proses validasi berhasil, server mengirimkan data pengguna ke *ESP32* dan secara bersamaan mengirimkan data untuk memperbarui tampilan pada tablet.

Gambar 5. *Sequence Diagram* autentikasi dengan *QR Code*

Terlihat pada gambar 5 menunjukkan alur proses autentikasi menggunakan *QR Code*. Berbeda dengan *RFID*, proses pemindaian *QR Code* dilakukan langsung melalui kamera yang terpasang pada perangkat reverse vending machine menggunakan hardware tablet. Ketika pengguna menunjukkan *QR* ke kamera tablet, sistem akan langsung memindai dan memprosesnya. Setelah berhasil dibaca, data akan langsung dikirimkan ke server *Node.js* untuk proses validasi dengan *Firebase Database*. Jika validasi berhasil menunjukkan *QR Code* valid, server akan mengirimkan sinyal konfirmasi ke *ESP32* untuk mengaktifkan sistem *RVM* dan secara bersamaan memperbarui tampilan pada tablet untuk menampilkan informasi pengguna.



Gambar 6. *Sequence Diagram* Deteksi Botol

Gambar 6 memperlihatkan alur proses deteksi botol yang terjadi setelah pengguna berhasil melakukan autentikasi, baik menggunakan *RFID* maupun *QR Code*. Ketika sensor inframerah mendeteksi objek yaitu sampah botol, sinyal dikirim ke *ESP32* yang kemudian menginstruksikan *ESP32-CAM* untuk mengambil gambar dengan *delay* tertentu untuk memastikan posisi botol sudah tepat untuk difoto. Gambar yang diambil kemudian dikirimkan ke *Flask* server untuk diproses deteksi. *Flask* server melakukan analisis gambar untuk memverifikasi apakah objek yang terdeteksi adalah botol atau bukan. Hasil analisis ini kemudian diteruskan ke *Node.js* server dan kontroler. Jika objek terdeteksi sebagai botol, *Node.js* server akan memperbarui data poin pengguna di *Firebase* dan mengirimkan update secara real-time ke display melalui koneksi *WebSocket* untuk menampilkan perubahan poin pengguna. Menurut penelitian Alviando *et al.*, (2023), *WebSocket* memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode komunikasi tradisional seperti long polling, dengan mengurangi latensi secara signifikan karena hanya memerlukan proses handshake di awal koneksi. Selain itu, penggunaan *WebSocket* menghemat sumber daya server karena komunikasi berlangsung secara *asynchronous*, sehingga server dan klien dapat bertukar data kapan saja selama koneksi terbuka. Pada saat yang bersamaan setelah botol tervalidasi, servo motor membuka pintu selama beberapa detik dengan sudut 90 derajat agar botol jatuh ke wadah penampungan. Pintu kemudian menutup secara otomatis dan sistem siap menerima botol berikutnya.

### 3.1.3 Development

Tahap pengembangan sistem dimulai dengan implementasi mekanisme autentikasi pengguna menggunakan kartu identifikasi yang dipindai oleh pembaca. Setelah kartu dipindai, data identitas pengguna dikirim ke server untuk divalidasi.

```

async handleAuth(deviceId, data) {
  let user;
  if (data.rfidTag) {
    user = await userRepository.getUserByRFID(data.rfidTag);
  } else if (data.uid) {
    user = await userRepository.getUserById(data.uid);
  }
  const authResult = this.createAuthResponse(user, deviceId);
  const authResponseTopic = `vending/${deviceId}/authResult`;

  this.system.publishToMQTT(authResponseTopic, authResult);
  this.system.notifyWebSocketClient(deviceId, authResult);
}

```

Gambar 7. Fungsi *handleAuth*

Gambar 7 menunjukkan fungsi untuk menangani autentikasi di sisi server yang melakukan proses validasi dengan mencocokkan data kartu yang diterima dengan data yang tersimpan di dalam *Firestore Realtime Database*. Firebase memiliki waktu respons yang cepat, sehingga cocok untuk digunakan dalam aplikasi dan mampu menyinkronkan data secara *real-time* dengan pengguna (Khairun Nisa Meiah Ngafidin *et al.*, 2021). Hal ini digunakan untuk respon autentikasi dapat ditampilkan secara instan. Fungsi ini juga dapat menerima dua jenis identifikasi *RFID tag* atau user ID. Data pengguna dicari di database dan hasilnya digunakan untuk membuat respon autentikasi. Respon tersebut kemudian dipublikasikan melalui *MQTT* untuk diterima kontroler *IoT RVM* dan juga dikirim ke *client WebSocket* untuk menampilkan data pengguna secara langsung. Apabila validasi menunjukkan kesesuaian, sistem akan memberikan otorisasi kepada pengguna untuk melanjutkan ke tahap selanjutnya dari proses tersebut.



Gambar 8. Deteksi Sampah Botol

Proses berikutnya adalah pengembangan fitur deteksi botol plastik yang melibatkan dua tahapan utama yaitu deteksi awal dan validasi objek. Pada tahap deteksi awal, sensor inframerah mendeteksi keberadaan botol saat dimasukkan ke dalam *RVM*. Sensor ini mengirimkan sinyal ke *ESP32-CAM* sebagai tanda bahwa objek terdeteksi. Selanjutnya, sistem beralih ke tahap validasi objek dengan menggunakan *ESP32-CAM* untuk mengambil gambar botol yang terdeteksi. Gambar yang diambil kemudian dikirim ke server *Flask*.

```

def detect_bottle_and_draw(frame):
    net = cv2.dnn.readNetFromCaffe('MobileNetSSD_deploy.prototxt', 'MobileNetSSD_deploy.caffemodel')
    CLASSES = ["background", "aeroplane", "bicycle", "bird", "boat",
               "bottle", "bus", "car", "cat", "chair", "cow", "diningtable",
               "dog", "horse", "motorbike", "person", "pottedplant", "sheep",
               "sofa", "train", "tvmonitor"]
    blob = cv2.dnn.blobFromImage(cv2.resize(frame, (300, 300)), 0.007843, (300, 300), 127.5)
    net.setInput(blob)
    detections = net.forward()

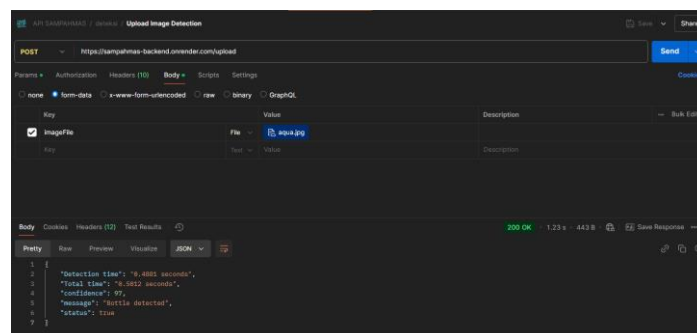
```

Gambar 9. Kode Deteksi Botol

Implementasi algoritma deteksi objek pada sistem RVM menggunakan model *MobileNet SSD* yang telah dilatih sebelumnya, dengan memanfaatkan file konfigurasi *MobileNetSSD\_deploy.prototxt* dan model terlatih *MobileNetSSD\_deploy.caffemodel*. Pakpahan & Dewi, (2021) menjelaskan bahwa arsitektur *MobileNet SSD* terdiri dari dua komponen utama yaitu jaringan *MobileNet* sebagai ekstraksi fitur dan *SSD* sebagai detector satu tahap. Sistem deteksi objek ini dirancang untuk mengenali 20 kelas objek yang berbeda termasuk "*bottle*" yang menjadi fokus utama dalam aplikasi *Reverse Vending Machine* (Supriadi *et al.*, 2021). Proses deteksi dimulai dengan preprocessing gambar menggunakan *OpenCV*, di mana gambar input diubah menjadi ukuran 300x300 piksel dan dinormalisasi dengan nilai mean 127.5. Transformasi ini menghasilkan *blob input* yang kompatibel dengan arsitektur *MobileNet SSD*. Arsitektur *MobileNet SSD* menerapkan dua jenis layer konvolusi yaitu *depthwise convolution* dan *pointwise convolution* yang membagi proses konvolusi menjadi dua tahap terpisah (Supriadi *et al.*, 2021). Pada sistem RVM ini mengimplementasikan pendekatan *depthwise separable convolution* untuk komputasi efisien dengan tetap mempertahankan akurasi deteksi yang optimal. Pendekatan ini sangat sesuai untuk sistem seperti *Reverse Vending Machine* (RVM) yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi.

#### 3.1.4 Testing

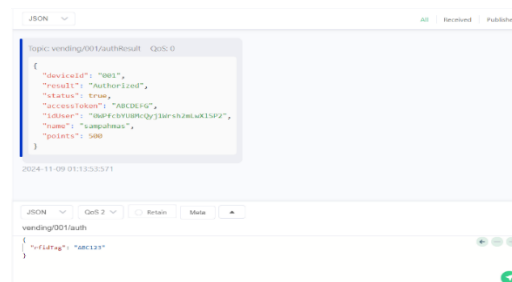
Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan semua komponen sistem berfungsi sesuai kebutuhan. Pada pengembangan sistem RVM ini, dilakukan *Blackbox testing* untuk memverifikasi fungsionalitas sistem, termasuk akurasi deteksi objek botol plastik, autentikasi pengguna, dan sinkronisasi poin.



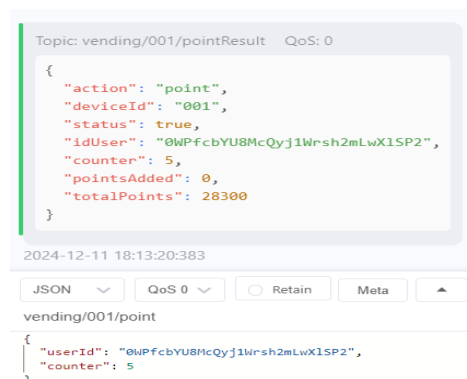
Gambar 10. *Blackbox Testing* Deteksi Sampah Botol

Hasil pengujian pada deteksi objek menunjukkan bahwa server berhasil memproses gambar yang dikirim dan memberikan respons dalam format *JavaScript Object Notation* (JSON) dengan pesan "Bottle detected" serta status "true". Respons menandakan bahwa sistem berhasil mengenali gambar sebagai objek botol plastik sesuai kriteria yang telah ditetapkan. Waktu pemrosesan tercatat sebesar 1.2 detik yang mencakup pengiriman gambar dari klien ke server, validasi gambar menggunakan algoritma *MobileNet SSD* pada server backend berbasis Flask, dan pengembalian respon ke pengguna. Untuk waktu deteksi hanya membutuhkan 0.48 detik. Islam *et al.*, (2024) *MobileNet SSD* menunjukkan keunggulannya sebagai algoritma dengan waktu inferensi tercepat, dengan rata-rata waktu inferensi sebesar 0.145 hingga 0.195 detik. Hasil penelitian ini mendukung temuan Islam *et al.*, (2024) yang menunjukkan bahwa *MobileNet SSD* memang dirancang untuk efisiensi waktu, meskipun terdapat sedikit kompromi pada tingkat akurasi dengan precision sebesar 91.44% dan recall sebesar 89.9%. Sebaliknya, *YOLOv4* menunjukkan performa terbaik dalam hal akurasi dengan precision sebesar 99.5% dan recall sebesar 98%, tetapi dengan waktu inferensi yang lebih lama, yaitu hingga 1.91 detik. Temuan ini menguatkan kesimpulan bahwa *MobileNet SSD* adalah pilihan ideal untuk aplikasi real-time dengan keterbatasan sumber daya, sementara *YOLOv4* lebih cocok untuk aplikasi yang memprioritaskan akurasi tinggi.

Namun penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yaitu dataset yang digunakan dalam penelitian yang berfokus pada botol plastik dengan karakteristik tertentu yang dapat mengurangi kemampuan generalisasi model saat mendeteksi botol dengan bentuk, ukuran, atau warna yang berbeda. Penggunaan perangkat keras ESP32-CAM juga memberikan batasan dalam hal pengambilan gambar, sehingga implementasi model deteksi yang lebih kompleks atau dengan akurasi yang lebih tinggi menjadi sulit dilakukan. Selain itu, sistem yang ada saat ini dirancang khusus untuk mendeteksi satu jenis objek botol plastik, sehingga belum memiliki kemampuan untuk mengelola situasi dunia nyata yang melibatkan beragam jenis sampah anorganik. Keterbatasan-keterbatasan ini menunjukkan pentingnya pengujian lebih lanjut di lapangan.

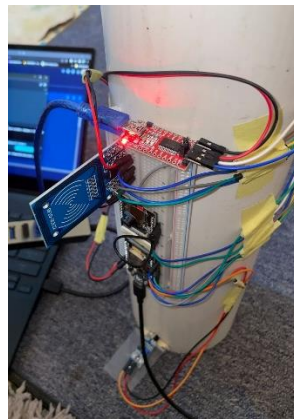
Gambar 11. Komunikasi *MQTT* Topik *Auth*

Sistem autentikasi yang mengintegrasikan teknologi *RFID* dan *QR Code* menunjukkan reliabilitas yang sangat baik dengan tingkat keberhasilan mencapai 100% dalam proses validasi pengguna. Berdasarkan hasil pengujian sistem, proses autentikasi menggunakan protokol *MQTT* menunjukkan performa yang sangat baik dengan rata-rata latensi sebesar 239 ms, yang dihitung dari waktu pengiriman data hingga penerimaan respon. Hasil ini mengindikasikan bahwa protokol *MQTT* mendukung komunikasi real-time yang efisien antara perangkat RVM dan server backend. Berdasarkan penelitian Susanto *et al.*, (2018) dikemukakan bahwa protokol *MQTT* dirancang khusus untuk komunikasi *Machine-to-Machine (M2M)* dalam lingkungan *Internet of Things (IoT)*. Protokol ini unggul dalam efektivitas pengiriman data yang didukung oleh rendahnya kebutuhan overhead, konsumsi bandwidth yang minimal, serta latensi yang rendah. Efisiensi ini tercapai berkat struktur pesan *MQTT* yang ringan dan sederhana, sehingga mengurangi *overhead* komunikasi secara signifikan. Dalam pengujian *throughput* yang dilakukan oleh Susanto *et al.*, (2018) menggunakan *software Wireshark*, pengiriman data antara client dan server *MQTT* menunjukkan hasil sebesar 1004 bit/s atau kurang dari 1 Kbps. Hal ini mengindikasikan penggunaan bandwidthnya yang sangat kecil. Keunggulan ini menjadikan *MQTT* ideal untuk sistem dengan sumber daya komputasi terbatas dan kebutuhan komunikasi *real-time* karena protokol ini mampu memastikan efisiensi pengiriman data tanpa mengorbankan performa sistem.

Gambar 12. Komunikasi *MQTT* Update Poin

Gambar 12 menunjukkan proses komunikasi dan sinkronisasi data poin antara perangkat *Reverse Vending Machine* (RVM) dengan server melalui protokol MQTT. Proses dimulai ketika kontroler RVM mengirimkan data dalam format *JavaScript Object Notation* (JSON) yang berisi informasi pengguna ke broker MQTT. Data ini merepresentasikan aktivitas pengguna yang telah memasukkan botol ke dalam RVM. Setelah data diterima oleh server, sistem melakukan validasi dan perhitungan poin berdasarkan jumlah botol yang dikumpulkan. Proses ini berjalan dengan baik. Data dapat dikirimkan, divalidasi, dan disinkronisasi secara *real-time* antara RVM dengan server. Hal ini memastikan bahwa perhitungan poin dilakukan dengan akurat dan memberikan respons yang cepat terhadap aktivitas pengguna.

### 3.1.5 Deployment



Gambar 13. Pengembangan purwarupa

Setelah menyelesaikan tahap pengembangan dan pengujian, implementasi sistem dilakukan secara langsung. Prototipe *Reverse Vending Machine* (RVM) dipasang dengan mengkonfigurasi komponen perangkat keras yang mencakup *ESP32*, *ESP32-CAM*, dan sensor inframerah yang tersambung ke server backend melalui jaringan Wi-Fi. Proses deployment melibatkan pemasangan *API Gateway* menggunakan *Node.js* serta layanan pemrosesan gambar berbasis *Flask* yang dioperasikan pada server *cloud*. Sistem ini dievaluasi dalam kondisi nyata untuk memastikan semua komponennya beroperasi dalam harmoni dan mampu menangani aktivitas pengguna secara waktu nyata.



Gambar 14. Prototipe RVM dengan Layar dan IoT

Koneksi *WebSocket* diimplementasikan guna menjamin komunikasi *real-time* yang lancar antara RVM dan server. Pada bagian atas RVM terpasang layar tablet yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna interaktif. Implementasi koneksi *WebSocket* pada sistem ini memungkinkan komunikasi dua arah secara *real-time* antara tablet display dan server backend, sehingga setiap interaksi pengguna dapat diproses dan ditampilkan secara instan tanpa adanya jeda yang signifikan.

### 3.1.6 Review

Hasil *review* menunjukkan bahwa sistem berhasil memberikan solusi efektif dalam mendeteksi botol plastik, mencatat aktivitas pengguna, dan memberikan insentif poin secara otomatis. Kelebihan sistem ini adalah akurasi deteksi yang tinggi, respons sistem yang cepat, dan fleksibilitas autentikasi pengguna. Umpan balik dari stakeholder dan pengguna menjadi dasar dalam perencanaan pengembangan iterasi berikutnya, termasuk penambahan fitur lanjutan seperti penyortiran botol plastik otomatis dan peningkatan user experience pada antarmuka aplikasi. Implementasi komunikasi real-time melalui protokol MQTT dan *WebSocket* memperlihatkan kinerja yang memuaskan dengan rata-rata latensi 200 ms, memastikan respons yang cepat pada interaksi pengguna. Penggunaan ESP32-CAM yang terintegrasi dengan server Flask dan OpenCV juga menunjukkan performa yang baik dalam deteksi objek, meskipun menggunakan perangkat dengan sumber daya terbatas. Sistem database menggunakan *Firebase Realtime Database* menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi dengan *uptime* mencapai 99.9% mendukung sinkronisasi data yang lancar antara berbagai komponen sistem. Penggunaan autentikasi melalui *RFID* dan *QR Code* memberikan fleksibilitas yang memudahkan pengguna dalam mengakses sistem sesuai preferensi pengguna. Fitur ini mendapat apresiasi positif dari pengguna karena kemudahannya dalam penggunaan. Hasil evaluasi secara keseluruhan mengindikasikan bahwa sistem Reverse Vending Machine yang dikembangkan telah berhasil menghadirkan solusi teknologi yang efektif untuk meningkatkan keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan limbah plastik.

## 3.2 Pembahasan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi *Reverse Vending Machine* (RVM) yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi yang efektif untuk pengelolaan sampah plastik. Dengan IoT, komunikasi data dapat dilakukan secara *real-time*, memungkinkan sinkronisasi data yang cepat melalui *Firebase*, seperti yang dijelaskan oleh Khairun Nisa Meiah Ngafidin *et al.* (2021). Protokol komunikasi seperti *WebSocket* juga terbukti meningkatkan efisiensi pengiriman data dengan latensi rendah, sesuai hasil penelitian Alviando *et al.* (2023). IoT juga mendukung integrasi perangkat keras seperti ESP32, sensor inframerah, dan *RFID*, yang memungkinkan deteksi otomatis botol plastik dan pengumpulan data tanpa interaksi manual signifikan (Suarna & Sopyan, 2023). Dalam hal deteksi objek, *machine learning* digunakan melalui model *MobileNet-SSD*. Algoritma ini dipilih karena memiliki kecepatan inferensi tinggi dan efisiensi komputasi yang sesuai untuk perangkat dengan sumber daya terbatas, meskipun akurasinya sedikit lebih rendah dibandingkan algoritma lain seperti YOLOv4 (Islam *et al.*, 2024). Pengujian menunjukkan bahwa *MobileNet-SSD* mampu mendeteksi botol plastik dengan waktu respons rata-rata 1,2 detik, sebagaimana dilaporkan Gupta *et al.* (2023). Meskipun demikian, keterbatasan dataset yang digunakan membatasi kemampuan model untuk mendeteksi botol plastik dengan variasi bentuk, ukuran, atau warna yang berbeda, sesuai dengan temuan Astuti *et al.* (2022). Hal ini menunjukkan perlunya pengembangan dataset yang lebih beragam untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model. Selain teknologi, mekanisme insentif berbasis poin menjadi elemen penting dalam meningkatkan partisipasi masyarakat. Struk (2019) menunjukkan bahwa insentif finansial seperti poin yang dapat ditukar dengan manfaat langsung efektif dalam memotivasi keterlibatan publik. Namun, tingkat keberhasilan mekanisme ini juga dipengaruhi oleh kesadaran masyarakat dan aksesibilitas sistem, sebagaimana dikemukakan oleh Astuti *et al.* (2023). Dalam konteks wilayah dengan partisipasi masyarakat rendah, seperti Kabupaten Sleman, Yogyakarta, kombinasi insentif dan teknologi dapat menjadi solusi yang signifikan untuk meningkatkan pengelolaan sampah. Penelitian ini menunjukkan potensi besar teknologi IoT dan *machine learning* dalam mendukung pengelolaan sampah plastik yang lebih efektif. Dengan pengembangan lebih lanjut, sistem RVM berbasis insentif ini berpotensi menjadi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah plastik.

## 4. Kesimpulan

Pengembangan sistem *Reverse Vending Machine* telah berhasil dan menghasilkan beberapa hasil penting. Sistem autentikasi ganda menggunakan *RFID* atau *QR Code* telah berhasil diimplementasikan dan telah lolos uji coba menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan fleksibilitas akses bagi pengguna RVM. Penggunaan *WebSocket* untuk komunikasi real-time antara server dan display tablet memastikan respon yang cepat dalam proses autentikasi. Integrasi *ESP32-CAM* dengan *OpenCV* berhasil melakukan deteksi botol menggunakan model *MobileNet SSD* dengan akurasi yang baik. Penggunaan tablet sebagai layar terpisah berhasil mengatasi keterbatasan *ESP32* dalam menampilkan antarmuka pengguna. Arsitektur sistem yang mengkombinasikan *Node.js* dan *Flask* server memungkinkan pemrosesan yang efisien untuk berbagai jenis data. Sementara itu implementasi *Firebase* sebagai database *real-time* mendukung sinkronisasi data yang cepat. Sistem yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk diterapkan secara praktis dalam pengelolaan sampah plastik. Implementasi RVM berbasis insentif dapat meningkatkan partisipasi masyarakat dalam program daur ulang terutama dengan menawarkan insentif berupa poin yang dapat ditukar dengan berbagai manfaat. Dari sisi ekonomi, penerapan sistem ini berpotensi mengurangi biaya pengelolaan sampah bagi pemerintah daerah, sekaligus menciptakan peluang bisnis baru dalam ekosistem ekonomi. Arahan penelitian lanjutan untuk meningkatkan efektivitas dan cakupan penerapan, penelitian lanjutan dapat difokuskan pada beberapa aspek berikut:

- 1) Mengembangkan model deteksi berbasis deep learning yang lebih canggih untuk mendukung pengenalan lebih banyak jenis sampah anorganik
- 2) Mengkaji secara mendalam dampak implementasi sistem terhadap pengurangan biaya pengelolaan sampah, penciptaan lapangan kerja, serta perubahan perilaku masyarakat.

## 5. Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan penghargaan yang tulus dan mendalam kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam mendukung penyusunan penelitian ini. Tidak lupa peneliti berterima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang berharga dalam penyelesaian penelitian ini. Dukungan moral dan material dari keluarga, teman-teman, serta rekan sejawat juga turut menjadi motivasi bagi peneliti dalam menyelesaikan artikel ini.

## 6. Daftar Pustaka

- Alviando, L., Bhawiyuga, A., & Kartikasari, D. P. (2023). Penerapan Websocket pada Sistem Live Chat berbasis Web (Studi Kasus Website Kwikku. com). *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 7(2), 854-862.
- Ardhi, S. (2023). Jogja Darurat Sampah, Ahli UGM: Kenapa Baru Gaduh Sekarang?. *Berita UGM*.
- Astuti, I., Ariestya, W. W., & Solehudin, B. (2022). Deteksi Objek Daun Semanggi Secara Real Time Menggunakan CNN-Single Shot Multibox Detector (SSD). *Jurnal Ilmiah FIFO*, 14(1), 47-58.
- Astuti, R. D., Prakoso, G. B., & Jatiningrum, W. S. (2023). Faktor Penghambat Niat dan Perilaku dalam Kegiatan Bank Sampah Studi Kasus di Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 10(1), 39-52.

- Faruq, M. N., & Maryam, M. (2023). IMPLEMENTASI METODE AGILE PADA PENGEMBANGAN APLIKASI MANAJEMEN PENGELOLAAN LAYANAN WIFI. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 7(6), 3472-3478. <https://doi.org/10.36040/jati.v7i6.7868>.
- Gupta, A., Yadav, D., Raj, A., & Pathak, A. (2023). Real-time object detection using SSD mobilenet model of machine learning. *Int. J. Eng. Comput. Sci*, 12(05), 25729-25734. <https://doi.org/10.18535/ijecs/v12i05.4735>.
- Hidup, K. L., & Indonesia, K. R. (2023). SIPSN-Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional KemenLHK. *Data Pengelolaan Sampah & RTH*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/%0Ahttps://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan>. Diakses secara online pada, 17.
- Islam, S. U., Ferraioli, G., Pascasio, V., Vitale, S., & Amin, M. (2024). Performance Analysis of YOLOv3, YOLOv4 and MobileNet SSD for Real Time Object Detection. *The Sciencetech*, 5(2), 37-49.
- Law, K. L., Starr, N., Siegler, T. R., Jambeck, J. R., Mallos, N. J., & Leonard, G. H. (2020). The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. *Science advances*, 6(44), eabd0288. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd0288>.
- Ngafidin, K. N. M., Arista, A., & Amriza, R. N. S. (2021). Implementasi Firebase Realtime Database pada Aplikasi FeedbackMe sebagai Penghubung Guru dan Orang Tua. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 5(2), 327-334. <https://doi.org/10.29207/resti.v5i2.2909>.
- Pakpahan, I. B., & Dewi, I. C. (2021). Pendeteksian lubang pada jalanan menggunakan metode SSD-MobileNet. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, 11(2), 213-222. <https://doi.org/10.22146/ijeis.60157>.
- Santoso, H., Pungki, D., Azis, A., & Zaini, A. (2022). Implementasi Agile Scrum pada Proses Pengembangan Aplikasi Monitoring MBKM di UNIKAMA. *RAINSTEK: Jurnal Terapan Sains & Teknologi*, 4(4), 208-215. <https://doi.org/10.21067/jtst.v4i4.8040>.
- Struk, M. (2019). Waste Management Incentive Programs and Municipal Finance.
- Suarna, D., & Edy, E. S. (2023). Implementasi Internet of Things (IoT) dalam Memonitoring Komsumsi Listrik. *Bulletin of Information Technology (BIT)*, 4(2), 163-170. <https://doi.org/10.47065/bit.v4i2.631>.
- Supriadi, M. F., Rachmawati, E., & Arifianto, A. (2021). Pembangunan Aplikasi Mobile Pengenalan Objek Untuk Pendidikan Anak Usia Dini. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (TTIK)*, 8(2), 357-364.
- Susanto, B. M., Atmadji, E. S. J., & Brenkman, W. L. (2018). Implementasi Mqtt protocol pada smart home security berbasis web. *Jurnal Informatika Polinema*, 4(3), 201-205. <https://doi.org/10.33795/jip.v4i3.207>.
- Wardhana, R. G., Wang, G., & Sibuea, F. (2023). Penerapan Machine Learning Dalam Prediksi Tingkat Kasus Penyakit Di Indonesia. *Journal of Information System Management (JOISM)*, 5(1), 40-45. <https://doi.org/10.24076/joism.2023v5i1.1136>.