

Penerapan IoT (*Internet of Things*) Pada Alat Penghitung Penumpang Bus Trans Banyumas

Implementation of IoT (*Internet of Things*) on the Passenger Counting Device of Trans Banyumas Bus

Wegift Putrasari¹, Arif Johar Taufiq²

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto
Jl. Raya Dukuh Waluh, Kembaran 53182, Indonesia

Informasi Makalah

Dikirim, 24 Januari 2024
Diterima, 27 Juni 2024
Diterbitkan, 30 Juni 2024

Kata Kunci:

Internet of Things (IoT),
penghitungan penumpang
otomatis, sensor
inframerah/ultrasonic,
mikrokontroler, Bus Trans
Banyumas.

Keyword:

Internet of Things (IoT),
automatic passenger counting,
infrared/ultrasonic sensors,
microcontrollers, Trans
Banyumas Bus.

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sebuah miniatur alat penghitungan penumpang bus otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) pada Bus Trans Banyumas. Alat ini terdiri dari sensor inframerah/ultrasonic untuk mendeteksi penumpang, mikrokontroler untuk memproses data, dan modul komunikasi nirkabel untuk mengirim data ke server. Data penumpang dapat diakses secara *real-time* melalui aplikasi web atau *mobile* untuk memudahkan operator bus dan manajemen dalam memonitor jumlah penumpang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mendeteksi penumpang yang naik dan turun dari bus sehingga jumlah data penumpang dapat terupdate. Implementasi sistem ini juga memungkinkan pengumpulan data yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti optimasi rute dan penjadwalan bus. Dengan demikian, inovasi ini diharapkan dapat mendukung upaya digitalisasi pengelolaan transportasi publik di Banyumas dan dapat diaplikasikan pada moda transportasi lainnya.

ABSTRACT

This research aims to design and build a miniature automatic bus passenger counting tool based on the Internet of Things (IoT) on the Trans Banyumas Bus. This tool consists of an infrared/ultrasonic sensor to detect passengers, a microcontroller to process data, and a wireless communication module to send data to the server. Passenger data can be accessed in real-time through web or mobile applications to facilitate bus operators and management in monitoring the number of passengers. The test results show that this system has a high level of accuracy in detecting passengers who get on and off the bus so that the number of passenger data can be updated. The implementation of this system also enables data collection that can be used for further analysis, such as route optimization and bus scheduling. Thus, this innovation is expected to support efforts to digitize public transportation management in Banyumas and can be applied to other modes of transportation.

Korespondensi Penulis:

Wegift Putrasari

Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

Jl. KH. Ahmad Dahlan, Dusun III, Dukuhwaluh, Kec. Kembaran, Kab. Banyumas, Jawa Tengah 53182, Indonesia

Email : wegiftputrasari02@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Transportasi publik merupakan salah satu elemen penting dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. Salah satu jenis transportasi publik yang banyak digunakan adalah bus. Bus memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan kendaraan pribadi, seperti biaya yang lebih murah, kapasitas yang lebih besar [1] [2] [3].

Di Indonesia, terdapat berbagai jenis bus yang melayani masyarakat, salah satunya adalah bus Trans Banyumas. Bus Trans Banyumas merupakan sistem transportasi publik berbasis bus yang beroperasi di Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah telah menjadi salah satu pilihan utama masyarakat untuk bepergian di wilayah tersebut. Salah satu masalah yang dihadapi oleh operator bus Trans Banyumas adalah dalam menghitung jumlah penumpang. Hal ini seringkali menyebabkan ketidakakuratan data jumlah penumpang, yang dapat berdampak pada perencanaan dan pengoperasian bus. Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun miniatur alat penghitung penumpang bus otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) pada Bus Trans Banyumas. Alat ini diharapkan dapat membantu operator bus Trans Banyumas dalam menghitung jumlah penumpang secara akurat dan real-time.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengembangkan alat penghitung penumpang bus otomatis. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh [4] menggunakan sensor inframerah [5] untuk mendeteksi jumlah penumpang yang masuk dan keluar bus. Penelitian lain yang dilakukan oleh [6] menggunakan sensor kamera untuk menghitung jumlah penumpang di dalam bus [7], bahwa ada yang lebih kompleks dengan sensor penginderaan jauh [8].

Penelitian ini merupakan salah satu cara untuk menghitung jumlah penumpang dalam bus yang relatif sederhana dengan memanfaatkan sensor infra merah dan update jumlah penumpang berdasarkan jumlah penumpang yang masuk dan keluar bus, data dikirim ke server MQTT [9] menggunakan teknologi IoT [10] untuk menghubungkan alat penghitung penumpang dengan internet. Hal ini memungkinkan operator bus untuk memantau jumlah penumpang secara *real-time* melalui *website* atau aplikasi *smartphone*.

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan membangun miniatur alat penghitung penumpang bus otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) pada Bus Trans Banyumas. Menguji kinerja alat penghitung penumpang bus otomatis. Menganalisis hasil pengujian dan memberikan rekomendasi untuk pengembangan alat selanjutnya.

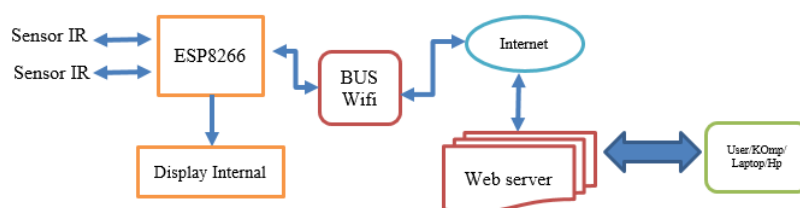
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini melibatkan beberapa tahapan utama dalam perancangan dan pengembangan miniatur alat penghitungan penumpang bus otomatis berbasis IoT untuk Bus Trans Banyumas. Tahap awal melibatkan studi literatur untuk memahami teknologi IoT dan penerapannya dalam sistem penghitungan penumpang. Selain itu, dilakukan analisis kebutuhan untuk menentukan spesifikasi teknis alat yang akan dirancang. Informasi ini diperoleh melalui tinjauan pustaka, wawancara dengan operator bus, dan pengamatan langsung di lapangan.

Perancangan sistem meliputi desain perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain sensor, mikrokontroler, dan modul komunikasi nirkabel. Sensor yang digunakan adalah sensor inframerah atau sensor ultrasonik [4] untuk mendeteksi keberadaan dan jumlah penumpang yang masuk dan keluar dari bus. Mikrokontroler bertugas untuk memproses data dari sensor dan mengirimkan data tersebut ke server melalui modul komunikasi nirkabel.

Perangkat keras terdiri dari sensor inframerah/ultrasonik [5] dipilih karena keakuratannya dalam mendeteksi objek pada jarak dekat. Mikrokontroler Arduino atau NodeMCU yang kompatibel dengan berbagai modul sensor dan komunikasi ESP8266 [11][12][13] [9] digunakan untuk mengirim data ke server. *Firmware* dikembangkan menggunakan Arduino IDE untuk mengintegrasikan sensor dengan mikrokontroler dan modul komunikasi. *Backend Server* dikembangkan menggunakan *platform cloud web* atau *hosting* untuk menerima dan menyimpan data dari alat penghitungan penumpang.

Implementasi dan Integrasi, pada tahap ini, seluruh komponen perangkat keras dirakit sesuai dengan desain yang telah dibuat. Mikrokontroler diprogram dengan *firmware* yang telah dikembangkan. Setelah itu, dilakukan integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak. Data yang diperoleh dari sensor dikirimkan ke server melalui jaringan internet dan dapat diakses melalui aplikasi *frontend* [14][15].



Gambar 1. Bagan sistem penghitung penumpang bus.

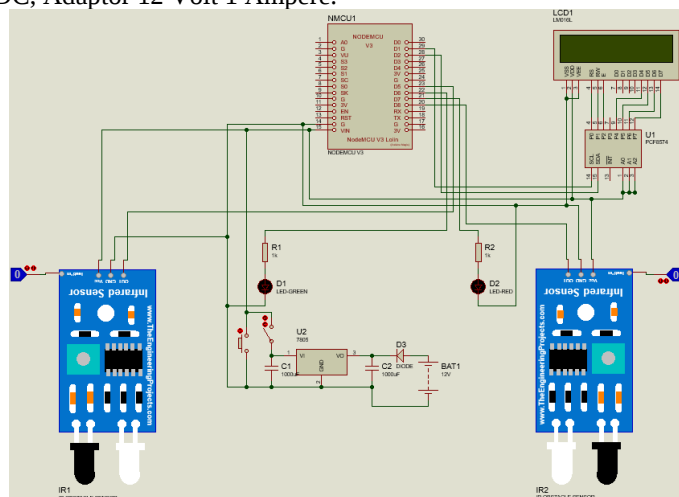
Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Pengujian meliputi: Pengujian Sensor: Menguji akurasi sensor dalam mendeteksi penumpang. Pengujian Komunikasi: Menguji keandalan komunikasi data antara mikrokontroler dan server. Pengujian Sistem Secara Keseluruhan: Menguji kinerja sistem dalam kondisi operasional sesungguhnya. Pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, mulai dari pengujian di laboratorium hingga uji coba lapangan pada bus Trans Banyumas. Hasil pengujian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem dan mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan.

Evaluasi dan Penyempurnaan, berdasarkan hasil pengujian, dilakukan evaluasi untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan. Jika ditemukan kekurangan atau masalah, dilakukan penyempurnaan pada desain atau implementasi sistem. Tahap ini juga melibatkan umpan balik dari pengguna (operator bus) untuk memastikan bahwa sistem memenuhi kebutuhan mereka.

Dalam perancangan alat penghitung penumpang bus otomatis pada Banyumas Raya Transportasi memerlukan alat serta komponen-komponen yang mendukung terciptanya alat yang diinginkan. Peralatan *hardware* yang digunakan : Laptop / computer, NodeMCU 8266 V3 Lolin, LCD (*Liquid Crystal Display*) I2C 16 x 2, Sensor *Infrared* FC-51, Resistor, LED (*Light Emitting Diode*), Holder LED, Terminal Block 2 Pin, Dioda 5 Ampere, Kapasitor 1000 uF / 16 V, IC L7805, Saklar *Push Button*, Saklar ON / OFF, Adaptor, Konektor DC, BOX Multi X4. Peralatan *Software* yang digunakan: *Software* Arduino IDE, XAMPP, Sublime Text, Proteus

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

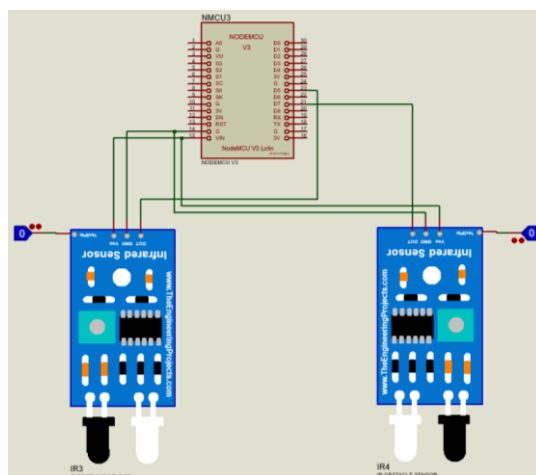
Skema sistem monitoring penumpang bus otomatis berbasis IoT dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 terdiri komponen NodeMCU ESP8266, Sensor Infrared FC-51, Liquid Crystal Display (LCD), Light Emitting Diode (LED), Resistor 1K, Dioda 5 Ampere, Kapasitor uF/16 V, IC L7805, Tombol Reset, Tombol ON / OFF, Konektor DC, Adaptor 12 Volt 1 Ampere.



Gambar 2. Rangkaian lengkap penghitung penumpang

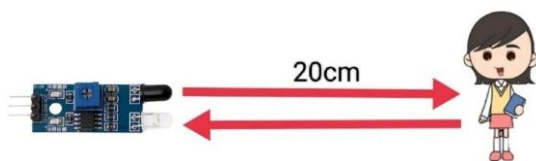
3.1. Modul Sensor Infrared FC-51

Modul sensor infrared FC-51 merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi obyek yang lewat didepan sensor. Dalam rangkaian sensor *infrared* FC-51 ini terdapat dua buah komponen *infrared* yaitu pemancar *infrared* dan penerima *infrared* lihat Gambar 3.

Gambar 3. Rangkaian modul Sensor *Infrared* FC-51

Sensor *Infrared* FC-51 ini memiliki koneksi kerja yaitu 5 Volt, Pada saat sumber tegangan dihubungkan ke VCC dan GND, maka lampu indikator modul akan hidup (ON). Jika ada benda melewati wilayah pemancar *infrared* yang ditandai dengan LED berwarna hitam maka sinar *infrared* tersebut akan dipantulkan kembali. Pantulan sinar *infrared* ini akan dideteksi oleh dioda photo yang ditandai dengan LED bening dan akan diproses oleh IC LM393. Pada keadaan seperti ini, LED indikator sinyal akan hidup (ON) dan sinyal keluaran akan berlogika LOW (0 V). Jarak deteksi bisa disesuaikan dengan cara memutar potensiometer (pengatur jarak) agar dapat mendeteksi benda dengan jarak antara 2 cm hingga 20 cm.

Pengujian Sensor *Infrared* FC-51 ini bertujuan untuk mengetahui kondisi Sensor *Infrared* FC-51, kemudian dibaca oleh NodeMCU ESP8266 selanjutnya akan muncul pada serial monitor NodeMCU ESP8266 sebagai berikut: Jarak Sensor *Infrared* FC-51. Cara pengujian mengecek jarak Sensor *Infrared* FC-51 sebagai berikut:

Gambar 4. Pengujian Jarak Sensor *Infrared* FC-51

3.2. Simulasi Sensor *Infrared* FC-51 Pada Bus Trans Banyumas

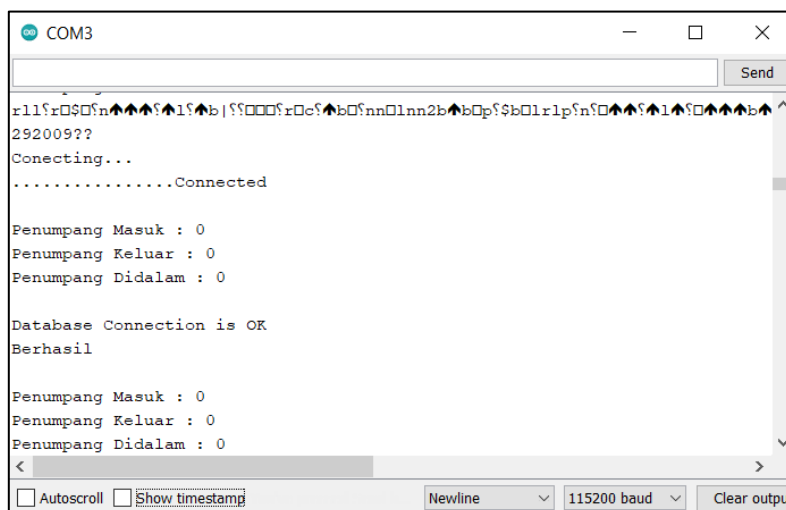
Jangkauan maksimal pada sensor hanya 20 cm, sehingga pada penelitian ini sensor diletakkan di samping pintu Bus Trans Banyumas supaya ketika ada penumpang masuk sensor dapat mendeteksi penumpang masuk dan penumpang keluar.



Gambar 5. Simulasi Sensor Pada Bus Trans Banyumas

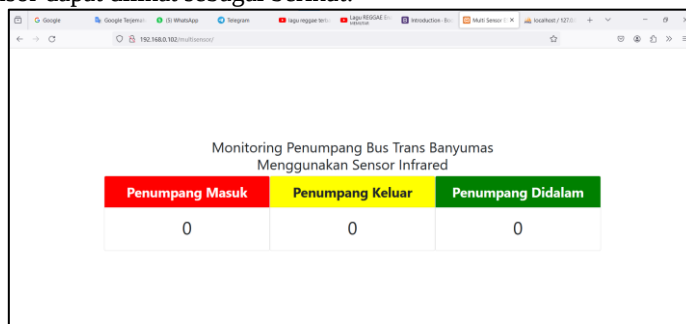
3.3. Pengujian Mengkoneksikan Internet Pembacaan Sensor *Infrared* FC-51

Hasil pengujian mengecek kondisi Sensor *Infrared* FC-51 sebagai berikut:

Gambar 6. Hasil Serial Monitor Mengecek Sensor *Infrared* FC-51

3.4. Pengecekan Website Localhost Multisensor

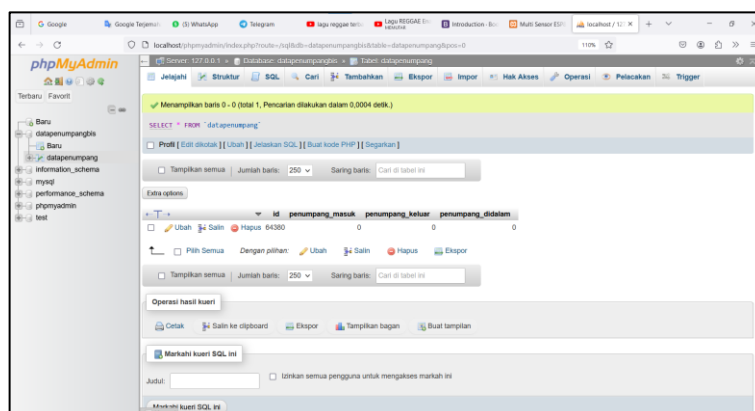
Setelah melakukan pengkoneksian Sensor *Infrared* FC-51 dan *Website Server* ke *website localhost* dengan nama multisensor dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 7. Hasil Mengecek Website Localhost Multisensor

3.4.1. Pengecekan Website Localhost Phpmyadmin

Setelah melakukan pengkoneksian Sensor *Infrared* FC-51 dan *Website Server* ke *website localhost* phpmyadmin kita juga bisa melihat Database yang sudah didapat dari Sensor *Infrared* FC-51 dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 8. Hasil Mengecek Website Localhost Phpmyadmin

3.4.2. Pengecekan Hosting Menggunakan Website Gratis

Setelah melakukan hosting pada website maka website bisa diakses secara global untuk mempermudah pekerjaan dalam memonitoring jumlah penumpang dari jarak jauh.



Gambar 9. Tampilan awal data penumpang di browser HP

3.5. Skenario Pengujian Pada Bus Trans Banyumas

Kondisi di Halte 1 terdapat 10 penumpang masuk bus dan Kondisi di Halte 2 terdapat 5 penumpang keluar bus



Gambar 10. Penumpang Masuk 10



Gambar 11. Penumpang Keluar 5

Kondisi di Halte 3 terdapat 5 penumpang masuk bus dan Kondisi di Halte 4 terdapat 4 penumpang keluar bus



Gambar 12. Penumpang Masuk 5



Gambar 13. Penumpang Keluar 4

Kondisi di Halte 5 terdapat 10 penumpang masuk bus dan 11 penumpang keluar bus dan Kondisi di Halte 6 terdapat 3 penumpang masuk bus



Gambar 14. Penumpang Masuk 10 dan Keluar 11



Gambar 15. Penumpang Masuk 3

Kondisi di Halte 7 terdapat 12 penumpang masuk bus dan 5 penumpang keluar bus. Kondisi di Halte 8 terdapat 20 penumpang masuk bus dan 10 penumpang keluar bus



Gambar 16. Penumpang Masuk 12 dan Keluar 5

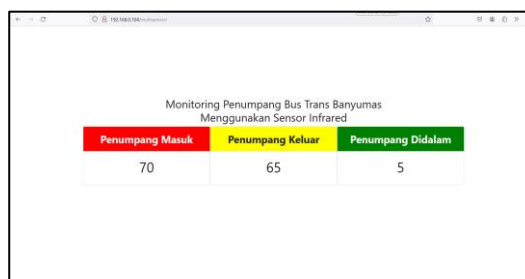


Gambar 17. Penumpang Masuk 20 dan Keluar 10

Kondisi di Halte 9 terdapat 4 penumpang masuk bus dan 10 penumpang keluar dan Kondisi di Halte 10 terdapat 6 penumpang masuk bus dan 10 penumpang keluar bus



Gambar 18. Penumpang Masuk 4 dan Keluar 10



Gambar 19. Penumpang Masuk 6 dan 10

Berdasarkan pengujian simulasi jika ada penumpang naik dan keluar dari skenario dapat dikumpulkan pada Tabel 1 jumlah penumpang di dalam bus akan terupdate terus.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kondisi di Halte 1 Sampai Halte 10

No.	Sensor Ke		Masuk	Keluar	Didalam	Kesimpulan
	1	2				
1	10	-	10	0	10	Sesuai
2	-	5	10	5	5	Sesuai
3	5	-	15	5	10	Sesuai
4	-	4	15	9	6	Sesuai
5	10	11	25	20	5	Sesuai
6	3	-	28	20	8	Sesuai
7	12	5	40	25	15	Sesuai
8	20	10	60	35	25	Sesuai
9	4	10	64	55	9	Sesuai
10	6	10	70	65	5	Sesuai

Berdasarkan pada tabel di atas Tabel 1. terdapat jumlah 10 hasil pengujian dengan akurasi yang didapat sistem penghitung jumlah orang secara otomatis yaitu sebesar 100%.

$$\begin{aligned}
 \text{Akurasi} &= \frac{\text{Data Sesuai}}{\text{Total Data}} \times 100\% \\
 &= \frac{10}{10} \times 100\% = 100\%
 \end{aligned}$$

Jumlah penumpang didalam bus selalu terupdate sehingga jika kondisi penuh maka dapat memasukkan penumpang jika kondisi masih tersedia maka akan menerima penumpang. Disamping data update penumpang disalam bus, sistem juga dapat mencatat jumlah total penumpang pada hari bus bekerja. Data jumlah penumpang harian tercatat pada database web server dan suatu saat dapat digunakan untuk analisis jumlah penumpang harian, bulanan dan tahunan. Sehingga data ini dapat digunakan untuk evaluasi dan sebagainya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sebuah miniatur alat penghitungan penumpang bus otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk Bus Trans Banyumas. Sistem yang dikembangkan terdiri dari perangkat keras berupa sensor inframerah/ultrasonic, mikrokontroler, dan modul komunikasi nirkabel, serta perangkat lunak yang meliputi *firmware* mikrokontroler dan aplikasi *backend* server untuk pengolahan data.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu mendeteksi penumpang yang naik dan turun dari bus dengan tingkat akurasi yang tinggi. Data penumpang dikirimkan secara *real-time* ke server dan dapat diakses melalui aplikasi web atau *mobile*, memberikan kemudahan bagi operator bus dan manajemen dalam memonitor jumlah penumpang. Penggunaan teknologi IoT dalam sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam penghitungan penumpang dibandingkan metode manual yang selama ini digunakan.

Dengan adanya alat ini, Bus Trans Banyumas dapat memanfaatkan data penumpang untuk analisis lebih lanjut, seperti optimasi rute dan penjadwalan bus, yang pada akhirnya dapat meningkatkan kualitas layanan kepada penumpang. Selain itu, implementasi sistem ini juga mendukung upaya digitalisasi dalam pengelolaan transportasi publik di Banyumas.

Penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut, seperti peningkatan keamanan data, integrasi dengan sistem pembayaran elektronik, dan penerapan teknologi ini pada moda transportasi lainnya. Dengan demikian, diharapkan inovasi ini dapat menjadi model bagi implementasi teknologi IoT dalam sektor transportasi di daerah lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Aminah, "Transportasi publik dan aksesibilitas masyarakat perkotaan," *Jurnal Masyarakat Kebudayaan dan Politik*, vol. 20, no. 1, Jan. 2007, Accessed: Jun. 26, 2024. [Online]. Available: <https://journal.unair.ac.id/filerPDF/Transportasi%20Publik%20dan%20Aksesibilitas.pdf>
- [2] D. PRAMESTI, N. L. P. J. ANDINI, D. A. K. RAHARJO, and A. D. DWIPAYANA, "Efektivitas Penggunaan Moda Transportasi Umum Dengan Kendaraan Pribadi," *Indonesian Journal of Multidisciplinary on Social and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 6–16, Jan. 2024, doi: 10.31004/ijmst.v2i1.246.
- [3] W. A. Riawan, "Analisis Pelayanan Bus Rapid Transit Kapasitas Sedang pada Sistem Transportasi Perkotaan [The Service Analysis of Medium Capacity Bus Rapid Transit on the Urban Transportation System]," *Warta Penelitian Perhubungan*, vol. 30, no. 2, pp. 119–132, Dec. 2018, doi: 10.25104/warlit.v30i2.688.
- [4] A. Purnama, F. Fauziah, and N. D. Nathasia, "SMART COUNTER PADA KAPASITAS BUS TRANSJAKARTA MENGGUNAKAN SENSOR INFRARED BERBASIS ARDUINO UNO ATMEGA328," *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, vol. 7, no. 1, pp. 175–185, Feb. 2022, doi: 10.29100/jupi.v7i1.2623.
- [5] K. Yuliana and Saptono, "Prototype Pengontrolan Penghitung Jumlah Calon Penumpang Angkutan Umum Pada Dinas Perhubungan Kota Tangerang Berbasis Arduino Uno," *JURNAL SISFOTEK GLOBAL*, vol. 7, no. 2, Sep. 2017, Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: <https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=2575478&val=24127&title=Prototype%20Pengontrolan%20Penghitung%20Jumlah%20Calon%20Penumpang%20Angkutan%20Umum%20Pada%20Dinas%20Perhubungan%20Kota%20Tangerang%20Berbasis%20Arduino%20Uno>
- [6] C. Pronello and X. R. Garzón Ruiz, "Evaluating the Performance of Video-Based Automated Passenger Counting Systems in Real-World Conditions: A Comparative Study," *Sensors*, vol. 23, no. 18, p. 7719, Sep. 2023, doi: 10.3390/s23187719.
- [7] V. Marcellino, V. Christanti Mawardi, and N. Jaya Perdana, "PENDETEKSIAN JUMLAH PENUMPANG YANG MASUK BERDASARKAN CCTV PADA PINTU BUS DENGAN METODE YOLO," *Jurnal Ilmu Komputer dan Sistem Informasi*, vol. 10, no. 2, Aug. 2022, doi: 10.24912/jiksi.v10i2.22539.
- [8] A. Patlins and N. Kunicina, "The new approach for passenger counting in public transport system," in *2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, IEEE, Sep. 2015, pp. 53–57. doi: 10.1109/IDAACS.2015.7340700.
- [9] R. R. Pahlevi, P. Sukarno, and B. Erfianto, "Implementation of Event-Based Dynamic Authentication on MQTT Protocol," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 2, Sep. 2019, doi: 10.17529/jre.v15i2.13963.
- [10] R. A. Atmoko, R. Riantini, and M. K. Hasin, "IoT real time data acquisition using MQTT protocol," *J Phys Conf Ser*, vol. 853, p. 012003, May 2017, doi: 10.1088/1742-6596/853/1/012003.

- [11] Adi Winarno and M. Affandi, "Design and Construction of Smart House Prototype Based Internet of Things (Iot) Using Esp8266," *BEST : Journal of Applied Electrical, Science, & Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 11–14, Mar. 2022, doi: 10.36456/best.vol4.no1.5447.
- [12] A. Holovatyy, "Development of IoT Weather Monitoring System Based on Arduino and ESP8266 Wi-Fi Module," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1016, no. 1, p. 012014, Jan. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1016/1/012014.
- [13] A. Skraba, A. Kolozvari, D. Kofjac, R. Stojanovic, V. Stanovov, and E. Semenkin, "Prototype of group heart rate monitoring with NODEMCU ESP8266," in *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/MECO.2017.7977151.
- [14] T. Poongodi, R. Gopal, and A. Saini, "IoT Architecture, Communication Technologies, and Its Applications," in *Internet of Things, Artificial Intelligence and Blockchain Technology*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1–24. doi: 10.1007/978-3-030-74150-1_1.
- [15] C. Stoloiescu-Crisan, C. Crisan, and B.-P. Butunoi, "An IoT-Based Smart Home Automation System," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3784, May 2021, doi: 10.3390/s21113784.

