SIMONSA-MBG: SISTEM PEMANTAUAN SISA MAKANAN BERBASIS IOT DENGAN ANALISIS *FOOD WASTE RATIO* DI SEKOLAH

Wachid Darmawan[1)]*, Widiyono[2)], Muhammad Faizal Kurniawan[3)]
Institut Widya Pratama[123)]
wachid.dw@iwima.ac.id[1)]*, widdyono@gmail.com[2)], faizal@iwima.ac.id[3)]

Abstrak

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) memerlukan sistem pemantauan sisa makanan berbasis data untuk mendukung evaluasi menu dan pengelolaan sampah di lingkungan sekolah. Penelitian ini bertujuan mengembangkan SIMONSA-MBG, sistem monitoring sampah MBG berbasis Internet of Things (IoT) yang mengintegrasikan pengukuran sensor dengan analisis Food Waste Ratio (FWR) di sekolah. Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) yang meliputi pengumpulan data, analisis, perancangan, implementasi, dan pengujian. Purwarupa menggunakan ESP32, load cell HX711, sensor ultrasonik HC-SR04, dan DHT22 yang terhubung dengan Firebase Realtime Database dan dashboard web. Pengujian pemantauan kontinu selama 120 menit pada 4 titik pengamatan menunjukkan peningkatan tingkat keterisian dari 4,4% menjadi 72,4% dan akumulasi massa sisa makanan sebesar 17,6 kg. Pengujian menghasilkan $\mathrm{Pearson}\ r = 0{,}9995$, $\mathrm{Spearman}\ \rho = 1{,}000$, *serta MAPE sebesar 0,85% untuk massa* $\geq$ *20kg dan MAE sebesar 0,125 cm dan MAPE 0,60% untuk jarak 5-10 cm. Penerapan FWR pada sepuluh jenis menu menghasilkan FWR agregat sebesar 11,17%, dengan empat menu berada pada kategori rendah, lima menu pada kategori sedang, dan satu menu pada kategori tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dashboard SIMONSA-MBG dapat menyediakan informasi kuantitatif mengenai kondisi wadah, timbulan sisa makanan, dan FWR per jenis menu sebagai dasar pendukung pengambilan keputusan. Penelitian selanjutnya disarankan memperluas pengamatan pada beberapa sekolah dan mengembangkan prediksi timbulan sisa makanan berbasis machine learning.*

Kata kunci: *Internet of Things; Makan Bergizi Gratis; Food Waste Ratio; Smart Environment; Sistem Pendukung Keputusan*

1. Pendahuluan

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) merupakan program strategis nasional yang bertujuan meningkatkan pemenuhan gizi peserta didik (Ulfah and Handayani 2025; Yesi and Annur 2025). Pelaksanaan MBG dalam skala luas berarti sisa makanan yang harus dikelola sekolah ikut bertambah. Penimbangan pada program makan sekolah menunjukkan bahwa bagian makanan yang tersisa bervariasi menurut jenis pangan, misalnya sekitar 1–65% menurut kelompok pangan dan item menu di Thailand (Petchoo, Kaewchutima, and Tangsuphoom 2022), dan dipengaruhi karakteristik sekolah serta layanan makan (Adjapong et al. 2024). Pada MBG di Aceh Timur, rata-rata sisa mencapai 24,3% dari porsi yang disajikan, terutama dari makanan pokok, sayur, dan lauk nabati (Zuhra et al. 2026), persoalan sisa makanan pada MBG juga telah dibahas secara konseptual (Pitriani et al. 2025). Sisa MBG yang ada di sekolah tidak dilakukan pencatatan karena sisa MBG tetap di simpan di opreng dan dikembalikan ke SPPG. Sisa MBG baru ditimbang di SPPG berdasarkan menu atau jenisnya, ini yang menimbulkan perbedaan cukup signifikan karena tidak ada rincian ompreng untuk sekolah satu dengan sekolah lainya.

Data sisa makanan per menu umumnya diperoleh melalui penimbangan manual per item atau kategori makanan (Petchoo, Kaewchutima, and Tangsuphoom 2022; Deksne et al. 2023), yang menuntut waktu dan tenaga petugas. Strategi pengurangan sisa makanan di sekolah telah ditelaah secara sistematis (Deksne et al. 2023), dan pengukuran otomatis di kantin sekolah telah dikembangkan dengan mencatat kejadian pembuangan per siswa (Malefors, Svensson, and Eriksson 2024), umpan balik berbasis alat sejenis

dilaporkan menurunkan sisa piring (Sundin et al. 2024). Namun, pada MBG yang berlaku saat ini (khususnya di Indonesia) belum ada rujukan dalam penelusuran ini yang memadukan pengukuran otomatis pada wadah sisa makanan dengan perhitungan *Food Waste Ratio* (FWR) per jenis menu.

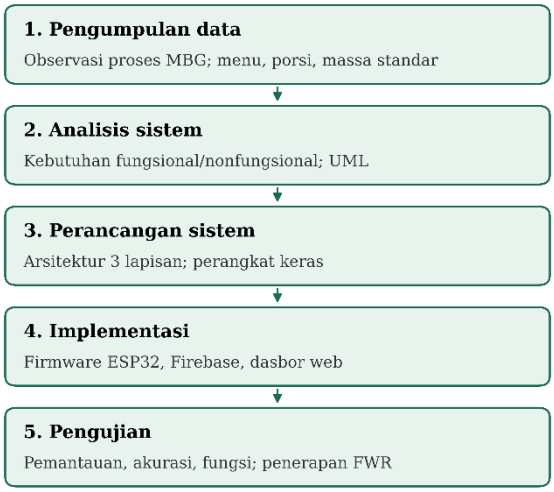
Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan lingkungan secara *real-time* dengan memadukan *sensor*, jaringan komunikasi, dan layanan *cloud* (Hidayat and Sutabri 2024; Latief, Irmansyah, and Rosyidi 2024), dan telah diterapkan pada pengelolaan sampah dan lingkungan kampus (Sangwan, Kumar, and Divyashree 2024; Yadav et al. 2025). Dua studi IoT sampah di Indonesia yang ditinjau memantau tingkat keterisian wadah untuk menentukan waktu pengosongan atau pengangkutan (Firmansyah et al. 2023; Somantri et al. 2023).

Massa sisa *absolut* dan tingkat keterisian wadah belum cukup untuk membandingkan menu, karena menu yang disajikan dalam jumlah besar dengan sendirinya menyisakan massa lebih besar. FWR, yaitu perbandingan massa sisa terhadap massa yang disajikan, menormalkan perbedaan tersebut sehingga menu dengan massa saji berbeda dapat dibandingkan. Ambang kategori sisa makanan belum memiliki acuan baku lintas studi (Fiori et al. 2025) dan tingkat sisa bergantung pada jenis layanan makan (Guimarães et al. 2024), karena itu ambang FWR dalam penelitian ini diperlakukan sebagai ketetapan kerja.

Berdasarkan kajian yang sudah disampikan kontribusi pada penelitian ini yaitu integrasi *sensor* massa dan jarak, penyimpanan *cloud*, dashboard, dan perhitungan FWR per menu dalam satu sistem informasi SIMONSA-MBG. Yang bertujuan untuk membangun sistem informasi SIMONSA-MBG berdasarkan analisis FWR. Melakukan evaluasi pengukuran massa dan jarak terhadap instrumen acuan serta fungsi sistem, dan menghasilkan sistem informasi perhitungan FWR per jenis menu. Penelitian ini juga menghasilkan informasi sebagai dasar evaluasi setiap menu yang akan dijadikan acuan oleh SPPG.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang terdiri atas lima tahapan, yaitu pengumpulan data, analisis sistem, perancangan sistem, implementasi, dan pengujian (Judijanto et al. 2024). Seperti pada Gambar 1. Tahap-tahap tersebut dijalankan berurutan untuk menghasilkan sistem SIMONSA-MBG dan mengevaluasinya pada satu sesi uji.



Gambar 1. Tahapan Penelitian R&D SIMONSA-MBG Berbasis IoT

2.1 Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui observasi proses bisnis penyaluran MBG dan wawancara dengan SPPG dan Kepala Sekolah (Ardiansyah, Risnita, and Jailani 2023). Data yang dikumpulkan meliputi jenis menu harian, jumlah porsi yang didistribusikan, dan berat standar setiap porsi. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan berat (massa) makanan yang disajikan dan menghitung *Food Waste Ratio* (FWR) berdasarkan jenis menu. Observasi pada penelitian dilakukan terhadap sepuluh jenis menu masing-masing disajikan sebanyak 1.500 porsi (masing-masing 150 porsi setiap harinya selama tiga hari dengan *sample* menu harian yang berbeda-beda). Massa makanan yang disajikan merupakan estimasi, yaitu jumlah porsi dikalikan massa standar (Persamaan 4), bukan hasil penimbangan aktual setiap porsi.

2.2 Analisis Sistem

Analisis kebutuhan fungsional dan nonfungsional dilakukan berdasarkan proses bisnis penyaluran MBG. Sistem dirancang untuk melayani dua kelompok pengguna, yaitu

pengguna umum yang mencakup guru dan siswa dengan hak akses baca tanpa *autentikasi* serta administrator dan pengelola SPPG dengan *autentikasi* untuk mengelola data menu, ambang notifikasi, dan kredensial sistem. Kebutuhan sistem dimodelkan menggunakan *Unified Modeling Language* (UML) yang meliputi *use case diagram*, *activity diagram*, dan *class diagram*. Data yang ditampilkan kepada pengguna umum dibatasi pada kondisi wadah dan FWR per menu serta tidak memuat identitas siswa.

2.3 Perancangan Sistem

Arsitektur SIMONSA-MBG terdiri atas tiga lapisan IoT. Lapisan persepsi berupa sensor massa, jarak, suhu, dan kelembapan pada satu wadah sampah. Lapisan jaringan memakai modul Wi-Fi ESP32 untuk mengirim data berformat JSON ke *Firebase Realtime Database* melalui HTTPS setiap lima menit. Lapisan aplikasi terdiri atas dashboard web *real-time* dan LCD sebagai penampil lokal. Penulisan data oleh perangkat dibatasi melalui *token terautentikasi* dan *security rule* yang ada di *API Firebase*. Sedangkan akses baca publik terbatas pada data agregat wadah dan FWR. Sensor DHT22 berperan untuk mengukur suhu dan kelembaban Udara disekitar tempat sampah.

Tempat sampah IoT ini menggunakan ESP32 DevKit V1, *load cell* 20 kg dengan HX711 sebagai *analog-to-digital converter* (ADC) 24-bit untuk massa, sensor ultrasonik HC-SR04 (jangkauan 2–400 cm) untuk jarak permukaan sisa makanan, DHT22 untuk suhu dan kelembapan, serta LCD 16 × 2 berantarmuka I2C sebagai penampil local. Sambungan tiap komponen diringkas pada Tabel 2. Rentang operasi massa dibatasi pada kapasitas *load cell* dan rentang pengujian, yaitu sampai 20 kg, massa di atas rentang itu tidak divalidasi. Kombinasi *load cell* dan HX711 memerlukan kalibrasi linear, jika tidak beberapa waktu kemudian akan mengalami *drift* (Kok et al. 2024; Guimarães et al. 2024).

Tabel 1. Perangkat Keras SIMONSA-MBG

Komponen	Fungsi	Sambungan ke ESP32
ESP32 DevKit V1	Mikrokontroler, Wi-Fi, pengiriman HTTPS	-
Load cell 20 kg + HX711	Massa sisa makanan (ADC 24-bit)	DT, SCK: [GPIO 2 & 4]
HC-SR04	Jarak ke permukaan sisa makanan (2–400 cm)	TRIG, ECHO: [GPIO 5 & 18]
DHT22	Suhu dan kelembapan di sekitar wadah	Data: [GPIO 15]
LCD 16 × 2 (I2C)	Penampil local	SDA, SCL: [GPIO 21 & 22]

Jarak yang terukur oleh *sensor ultrasonik* dinyatakan sebagai $d\,(cm)$ dan dikonversi menjadi ketinggian sisa makanan h serta tingkat keterisian wadah V berdasarkan tinggi efektif wadah $H = 50\ cm$ menggunakan Persamaan (1) dan (2).

$$h = H - d \tag{1}$$

$$V = \frac{H-d}{H} x\ 100\% \tag{2}$$

Dengan h merupakan ketinggian sisa makanan (cm), H merupakan tinggi efektif wadah (cm), dan d merupakan jarak antara sensor dengan permukaan sisa makanan (cm).

Massa sisa makanan W dihitung berdasarkan nilai pembacaan ADC R, nilai ADC pada kondisi antara R_0, dan faktor kalibrasi CF menggunakan Persamaan (3).

$$W = \frac{R-R_0}{CF} \tag{3}$$

Nilai tingkat keterisian V diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu rendah untuk $V \leq 30\%$, sedang untuk $30\% < V \leq 60\%$, dan tinggi untuk $V > 60\%$. Status keterisian wadah juga digunakan untuk memberikan notifikasi pengosongan ketika tingkat keterisian melebihi 60%. Kategori ini hanya menyatakan status wadah dan tidak memengaruhi perhitungan FWR.

Massa makanan yang disajikan pada hari ke-i untuk menu m dihitung berdasarkan jumlah porsi

yang didistribusikan dan berat standar setiap porsi menggunakan Persamaan (4).

$$W_{saji}(m,i) = N_{porsi}(m,i)\ x\ m_{porsi}(m) \quad (4)$$

Massa sisa makanan diperoleh dari selisih pembacaan *load cell* pada akhir dan awal periode pengamatan masing-masing menu. setiap hari terdapat 4 menu yang berbeda (karbohidrat, sayur, protein hewani dan protein nabati). Pengamatan dilakukan selama 10 hari dengan durasi 120 menit perhari untuk mendapatkan 10 menu yang berbeda. Selanjutnya, FWR untuk setiap menu dihitung berdasarkan perbandingan antara akumulasi massa sisa makanan dan akumulasi massa makanan yang disajikan (persamaan 5).

$$FWR(m) = \frac{\sum_i W_{sisa}(m,i)}{\sum_i W_{saji}(m,i)}\ x\ 100\% \quad (5)$$

Nilai FWR digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pengelolaan menu oleh SPPG. Penentuan nilai ini sebagai acuan dari peneliti dan tidak bisa dijadikan sebagai acuan standar yang tertulis di buku, karena setiap tempat punya standar aturan tersendiri (Fiori et al. 2025).

Tabel 2. Aturan Keputusan Berbasis Ambang *Food Waste Ratio*

Rentang FWR	Kategori	Rekomendasi bagi SPPG
FWR ≤ 10%	Rendah	Menu dipertahankan
10% < FWR ≤ 20%	Sedang	Menu dievaluasi dan dipantau
FWR > 20%	Tinggi	Menu dipertimbangkan untuk dirotasi

2.4 Implementasi

Tempat sampah berbasi IoT diimplementasi-kan menggunakan *firmware ESP32* yang membaca data dari sensor massa, jarak, suhu, dan kelembapan setiap lima menit. Data hasil pembacaan dikirimkan ke *Firebase Realtime Database* dalam struktur data berbasis JSON. *Dashboard* dikembangkan menggunakan *React* dengan *Vite* dan dirancang untuk memperbarui informasi secara *real-time*. Sistem juga dilengkapi *autentikasi administrator*, *security rules* pada sisi server, dan validasi masukan untuk mencegah masuknya data yang tidak valid atau pengiriman data secara berlebihan.

2.5 Pengujian

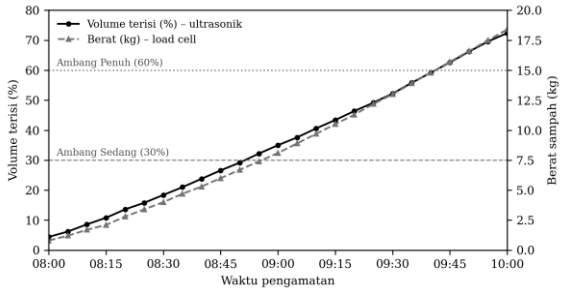
Pengujian dilakukan terhadap empat aspek utama. Pertama, pengujian pemantauan kontinu dilakukan selama 120 menit pada empat titik pengamatan dengan interval lima menit untuk mengevaluasi kestabilan akuisisi data dan memodelkan laju peningkatan ketinggian sisa makanan menggunakan regresi linear $h(x) = a + b \cdot x$.

Kedua, kesesuaian pembacaan sensor dievaluasi menggunakan korelasi *Pearson* dan *Spearman* untuk menilai kekuatan hubungan antara hasil pengukuran sistem dan data pembanding. Konsistensi pengukuran dievaluasi menggunakan *Cronbach's Alpha* dan *Spearman-Brown* berdasarkan pembagian data pengamatan ganjil dan genap. Ketiga, akurasi pengukuran dibandingkan dengan instrumen acuan berupa timbangan digital dan meteran pada empat titik pengujian menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Keempat, pengujian fungsional dilakukan menggunakan metode *black-box* terhadap seluruh skenario kebutuhan sistem.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengujian Sensor

Tempat sampah berbasis IoT SIMONSA-MBG berhasil direalisasikan dan mampu beroperasi secara kontinu dengan interval pengiriman data setiap lima menit tanpa mengalami kegagalan akuisisi. Pengujian selama 120 menit pada empat titik pengamatan menunjukkan peningkatan tingkat keterisian wadah dari 4,4% menjadi 72,4%. Pada periode yang sama, massa sisa makanan meningkat dari 0,8 kg menjadi 18,4 kg dengan pertambahan massa bersih sebesar 17,6 kg. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa sistem mampu merekam perubahan tingkat keterisian dan massa sisa makanan secara berkelanjutan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Kurva Tingkat Keterisian dan Massa Sisa Makanan Selama Periode Pengamatan

Regresi linear menghasilkan $h(x) = 0{,}878 + 0{,}2856x$ dengan $R^2 = 0{,}9965$, yaitu kenaikan ketinggian sekitar 0,29 cm per menit pada sesi ini. Karena data berasal dari satu sesi dan satu wadah dengan pengisian yang tidak dikontrol, persamaan ini bersifat deskriptif dan tidak dipakai untuk memproyeksikan waktu penuh maupun kapasitas wadah. Status keterisian ditentukan oleh aturan ambang pada pembacaan yang sama sehingga kesesuaian klasifikasi dengan ambang tidak dilaporkan sebagai akurasi.

Korelasi antara ketinggian dan massa pada empat titik adalah $Pearson\, r = 0{,}9995$ ($p < 0{,}001$) dan $Spearman\, \rho = 1{,}000$, sehingga kedua kanal bergerak koheren. Hasil ini hanya uji kewajaran antarkanal, karena korelasi tinggi tetap dapat terjadi bila terdapat bias sistematik. Ketepatan dinilai terhadap instrumen acuan (Tabel 4): kanal massa menghasilkan MAE 0,081 kg dan MAPE 0,85% pada 2–20 kg, dan kanal jarak menghasilkan MAE 0,125 cm dan MAPE 0,60% pada 5–50 cm.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Pengujian Sensor

Kanal, acuan	Rentang uji	MAE / MAPE
Massa (load cell), timbangan digital	2–20 kg (4 titik)	0,081 kg / 0,85%
Jarak (HC-SR04); meteran	5–50 cm (4 titik)	0,125 cm / 0,60%

Galat massa (MAE 0,081 kg) dipakai pada Subbab 3.2 untuk menaksir ketidakpastian FWR. Karena rentang uji massa dimulai dari 2 kg, sedangkan massa sisa per menu hanya 0,8–3,2 kg, galat pada massa rendah belum terkarakterisasi sepenuhnya.

3.2 Penerapan Model *Food Waste Ratio*

Model *Food Waste Ratio* (FWR) diterapkan pada siklus pengamatan yang mencakup sepuluh jenis menu dengan total 1.500 porsi. Berdasarkan hasil penimbangan, total massa makanan yang disajikan mencapai 157,50 kg, sedangkan total massa makanan tersisa mencapai 17,60 kg. Rekapitulasi nilai FWR untuk setiap jenis menu disajikan pada Tabel 4 dan divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 4. Rekapitulasi *Food Waste Ratio* per Jenis Menu

Menu	Saji (kg)	Sisa (kg)	FWR (%)
Nasi Putih	22,50	1,40	6,22
Ayam Goreng	18,00	1,50	8,33
Sayur Sop	15,00	1,80	12,00
Tumis Sayuran	13,50	2,10	15,56
Ikan Goreng	16,50	1,70	10,30
Telur Balado	12,00	0,80	6,67
Tempe Goreng	10,50	0,90	8,57
Pisang	12,00	1,40	11,67
Nasi Goreng	22,50	2,80	12,44
Sayur Lodeh	15,00	3,20	21,33
Total	157,50	17,60	11.17

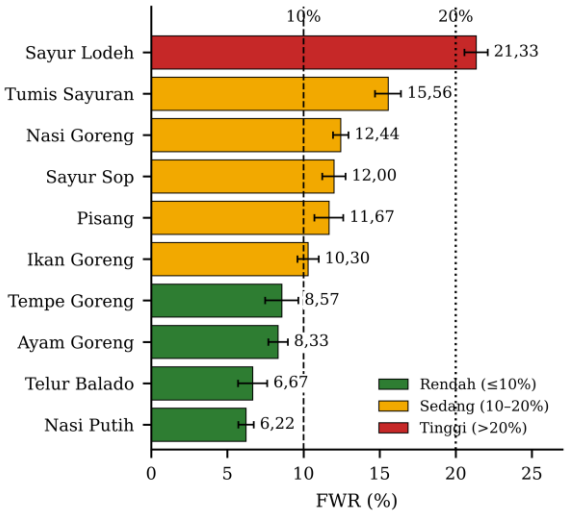
FWR agregat sebesar 17,60/157,50 kg, sekitar 11,17% massa makanan yang disajikan menjadi sisa. Berdasarkan Tabel 4, empat menu berada pada kategori rendah (FWR ≤ 10%), lima menu pada kategori sedang (10% < FWR ≤ 20%), dan satu menu pada kategori tinggi (FWR > 20%).

Kategori rendah ditempati Nasi Putih (6,22%), Ayam Goreng (8,33%), Telur Balado (6,67%), dan Tempe Goreng (8,57%). Kategori sedang ditempati Sayur Sop (12,00%), Tumis Sayuran (15,56%), Ikan Goreng (10,30%), Pisang (11,67%), dan Nasi Goreng (12,44%). Sayur Lodeh memiliki FWR tertinggi (21,33%) sehingga masuk kategori tinggi dan ditinjau penyebabnya sebelum rotasi dipertimbangkan.

Menu sayur (Sayur Lodeh 21,33%; Tumis Sayuran 15,56%) memiliki FWR tertinggi, sedangkan Nasi Putih terendah (6,22%). Sayur termasuk kelompok dengan sisa terbanyak pada penimbangan di Thailand dan Aceh Timur (Petchoo, Kaewchutima, and Tangsuphoom 2022; Zuhra et al. 2026). Tetapi pada studi Aceh Timur makanan pokok juga banyak tersisa sedangkan

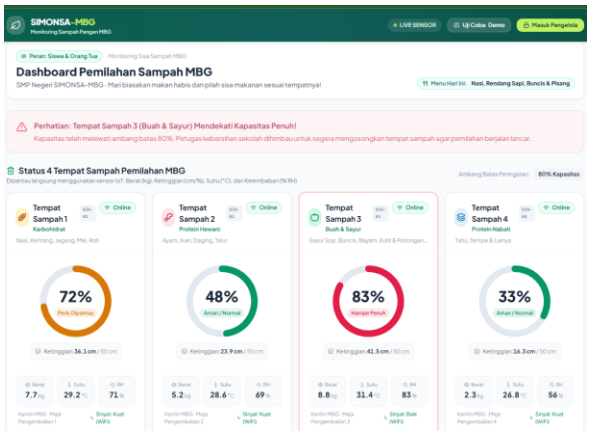
pada penelitian ini Nasi Putih paling rendah, dan rata-rata sisa di sana (24,3%) lebih tinggi daripada FWR agregat di sini. Perbedaan menu, usia siswa, dan metode ukur membuat perbandingan angka tidak langsung. Karena hanya satu siklus dan satu kali penyajian per menu, perbedaan antarmenu belum diuji secara statistik dan tidak dapat dipisahkan dari porsi, suhu makanan, waktu makan, komponen yang tidak dimakan, dan cara penyajian. FWR tinggi belum membuktikan rendahnya kesukaan siswa terhadap menu.

Ketidakpastian FWR dihitung dari massa saja, karena Persamaan 5 hanya memuat massa sisa dan massa saji, galat kanal jarak tidak memengaruhi FWR dan hanya memengaruhi status keterisian. Karena W_{sisa} diperoleh dari selisih dua pembacaan *load cell*, galatnya ditaksir $\sqrt{2} \times$ MAE = 0,115 kg (MAE diperlakukan sebagai taksiran kasar, bukan ketidakpastian baku), sehingga $\Delta FWR \approx 100 \times 0{,}115 \,/\, W_{saji}$, yaitu ±0,51 sampai ±1,09 poin persentase menurut menu (Gambar 3). Ikan Goreng (10,30%) hanya 0,30 poin di atas ambang 10% sehingga kategorinya tidak dapat dibedakan dari kategori rendah. Sembilan menu lain berjarak dari ambang lebih besar daripada ΔFWR-nya. Taksiran ini belum memasukkan ketidakpastian antara, resolusi pembacaan, galat pada massa di bawah 2 kg, dan selisih massa porsi sebenarnya terhadap massa standar.



Gambar 3. Perbandingan *Food Waste Ratio* Antarjenis Menu

Selain penerapan model FWR, dilakukan pengujian fungsional menggunakan metode *black-box* terhadap seluruh skenario kebutuhan sistem. Seluruh skenario berhasil dijalankan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan sehingga diperoleh tingkat keberhasilan pengujian sebesar 100%.



Gambar 4. *Dashboard* SIMONSA-MBG berbasis website

3.3 Kemanfaatan Bagi Pengambilan Keputusan

Data sensor menghasilkan tiga jenis informasi, yaitu status keterisian dan massa wadah, laju kenaikan selama sesi, dan FWR per menu. Pada sesi uji, satu wadah mencapai 18,4 kg (72,4% keterisian) dalam 120 menit. Kapasitas wadah dan kebutuhan jumlah wadah belum dapat diestimasi karena rentang validasi massa baru sampai 20 kg dan pengamatan baru satu sesi. Tabel 5 memetakan keputusan yang berpotensi didukung, pemetaan ini merupakan usulan penulis dan belum divalidasi bersama pengguna.

Tabel 5. Pemetaan Kemanfaatan bagi Pengambilan Keputusan

No	Pengguna	Keputusan yang Didukung
1	Petugas kebersihan	Penjadwalan pengangkutan secara antisipatif
2	Guru dan siswa	Peningkatan literasi lingkungan dan umpan balik terhadap perilaku makan

No	Pengguna	Keputusan yang Didukung
3	SPPG	Evaluasi porsi dan rotasi menu
4	Manajemen sekolah	Perencanaan kebutuhan wadah dan unit pengolahan sampah

Pada tingkat operasional, informasi kapasitas wadah dan proyeksi timbulan dapat digunakan oleh petugas kebersihan untuk menentukan waktu pengangkutan. Pada tingkat pengguna, informasi mengenai timbulan sisa makanan dapat dimanfaatkan sebagai bahan edukasi lingkungan dan umpan balik terhadap perilaku makan. Pada tingkat taktis, data FWR dapat menjadi dasar bagi SPPG untuk mengevaluasi porsi dan mempertimbangkan rotasi menu. Pada tingkat strategis, informasi kapasitas dan pola timbulan dapat mendukung manajemen sekolah dalam merencanakan kebutuhan wadah dan fasilitas pengolahan sampah. Dengan demikian, satu aliran data sensor dapat menyediakan informasi pendukung keputusan pada tingkat operasional, taktis, dan strategis.

3.4 Pembahasan dan Perbandingan

Perbandingan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya menunjukkan perbedaan objek, metode ukur, dan keluaran. Firmansyah et al. (2023) dan Somantri et al. (2023) memantau keterisian wadah untuk pengangkutan (Firmansyah et al. 2023; Somantri et al. 2023). Malefors, Svensson, and Eriksson (2024) mengukur sisa piring secara otomatis per siswa (Malefors, Svensson, and Eriksson 2024), dan Sundin et al. (2024) melaporkan bahwa umpan balik berbasis plate waste tracker dapat menurunkan sisa piring di kantin sekolah (Sundin et al. 2024). Petchoo, Kaewchutima, and Tangsuphoom (2022), Lonska et al. (2025), dan Zuhra et al. (2026) menimbang sisa secara manual per item, kategori makanan, atau jenjang (Petchoo, Kaewchutima, and Tangsuphoom 2022; Deksne et al. 2023; Zuhra et al. 2026). SIMONSA-MBG berbeda dalam menempatkan pengukuran massa dan keterisian pada wadah serta menghitung FWR per menu pada MBG. Penelitian ini tidak membandingkan kinerjanya secara empiris dengan studi-studi tersebut.

Kontribusi penelitian ini bersifat terapan, yaitu integrasi sensor massa dan jarak, penyimpanan *cloud*, *dashboard*, dan perhitungan FWR per menu dalam satu sistem untuk MBG. Tidak ada algoritma baru yang diusulkan sehingga kebaruan metodologis tidak diklaim, dan pernyataan kebaruan terbatas pada studi yang ditinjau.

FWR menunjukkan berapa bagian makanan yang tersisa, tetapi tidak menjelaskan sebabnya. Untuk menafsirkan menu ber-FWR tinggi diperlukan data pendamping, antara lain porsi, suhu makanan, waktu makan, komponen yang memang tidak dimakan, dan cara penyajian. Pemetaan pada Tabel 5 karenanya tetap berupa potensi, keterpakaian rekomendasi bersama SPPG dan penurunan sisa makanan belum diuji.

Keterbatasan penelitian ini adalah sebagai berikut. Pertama, pemantauan baru mencakup sepuluh menu pada empat wadah sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi. Kedua, massa saji merupakan estimasi porsi × massa standar, bukan penimbangan aktual. Ketiga, rentang uji massa (2–20 kg) tidak mencakup sebagian besar massa sisa per menu (0,8–3,2 kg), dan ketidakpastian serta massa porsi belum dihitung. Keempat, ambang FWR 10% dan 20% adalah ketetapan penelitian ini. Kelima, kemanfaatan bagi keputusan belum divalidasi dan penurunan sisa makanan belum diuji.

4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini menghasilkan purwarupa (tempat sampah berbasis IoT dan *dashboard*) SIMONSA-MBG, yaitu sistem pemantauan sisa makanan MBG berbasis IoT yang mengukur massa dan keterisian wadah serta menghitung FWR per jenis menu. Pada satu sesi uji 120 menit, purwarupa merekam 25 data tanpa kehilangan data, dengan galat terhadap instrumen acuan MAPE 0,85% (massa) dan 0,60% (jarak) pada rentang yang diuji. FWR agregat sepuluh menu sebesar 11,17% dengan Sayur Lodeh tertinggi (21,33%), sedangkan kategori Ikan Goreng berada dalam ketidakpastian ambang. Hasil ini berlaku untuk satu sesi dan satu wadah sehingga belum dapat digeneralisasi, kemanfaatan bagi keputusan masih potensial dan penurunan sisa makanan belum diuji.

Penelitian lanjutan diprioritaskan pada (1) validasi sensor yang lebih lengkap (ulangan, bias,

drift, *histeresis*) dengan beban independen, (2) pencatatan massa saji dan sisa per jenis menu secara aktual, (3) pengamatan lintas sesi pada beberapa sekolah, dan (4) evaluasi keterpakaian rekomendasi bersama SPPG dengan desain sebelum–sesudah. Model prediksi berbasis machine learning baru dipertimbangkan setelah data lintas sesi memadai.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM) Kemdiktisaintek, atas bantuan pendanaan yang diberikan melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun Anggaran 2026. Penghargaan juga diberikan kepada Institut Widya Pratama atas bantuan institusional yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyediaan data, pelaksanaan pengembangan prototipe, dan proses pengujian sistem SIMONSA-MBG. Dukungan itu memiliki peran krusial dalam mendukung kelancaran proses penelitian hingga selesainya artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adjapong, Eunice S, Kathryn E Bender, Sophia Schaefer, and Brian E Roe. 2024. "School and Meal Characteristics Associated with Plate Waste in K-12 Cafeterias in the United States." *Plos One* 19 (12): 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299043.

Ardiansyah, Ardiansyah, Risnita Risnita, and M Syahran Jailani. 2023. "Teknik Pengumpulan Data Dan Instrumen Penelitian Ilmiah Pendidikan Pada Pendekatan Kualitatif Dan Kuantitatif." *IHSAN: Jurnal Pendidikan Islam* 1:1–9.

Deksne, Juta, Lienite Litavniece, Jelena Lonska, and Anda Zvaigzne. 2023. "Circular Economy Strategies For Reducing Food Waste In Schools: A Systematic Literature Review." *Journal of Regional Economic and Social Development* 15:29–39.

Fiori, Federica, Diana Menis, Peter Cautero, Daniela Zago, Marco Driutti, Lucia Lesa, Alessandro Conte, Enrico Scarpis, Laura Brunelli, and Maria Parpinel. 2025. "Plate Waste in Hospital Canteens : A Nutritional and Environmental Analysis in North-Eastern Italy." *Frontiers in Nutrition*, no. May, 1–11. https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1542280.

Firmansyah, Dheka, Aulia Ullah, Ahmad Faizal, and Hilman Zarory. 2023. "Perancangan Sistem Pemantauan Kondisi Tempat Sampah Kampus Berbasis Internet of Things (IoT) (Studi Kasus: Fakultas Sains Dan Teknologi UIN Suska Riau)." *TRANSMISI: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* 25 (4): 165–71.

Guimarães, Nathalia Sernizon, Marcela Gomes Reis, Luciano De Alvarenga Fontes, Renata Puppin Zandonadi, Raquel Braz Assunção Botelho, Hmidan A Alturki, Ariana Saraiva, and António Raposo. 2024. "Plate Food Waste in Food Services : A Systematic Review And." *Nutrients* 16 (1429): 1–19.

Hidayat, Agung, and Tata Sutabri. 2024. "Optimalisasi Pengelolaan Fasilitas Kampus Menggunakan IoT Untuk Monitoring Ketersediaan Ruang Dan Peralatan." *Saturnus: Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi* 3 (1): 1–10.

Judijanto, Loso, Mas'ud Muhammadiah, Rahmawati Ning Utami, Lalu Suhirman, Laurensius Laka, Yoseb Boari, Suri Toding Lembang, et al. 2024. *Metodologi Research and Development (Teori Dan Penerapan Metodologi RnD)*. Edited by Sepriano Sepriano, Efitra Efitra, and Nurzatul Dihniah. Pertama. Jakarta: Sonpedia Publishing Indonesia. www.buku.sonpedia.com.

Kok, Chiang Liang, Chee Kit Ho, Yuwei Dai, Teck Kheng Lee, Yit Yan Koh, and Jian Ping Chai. 2024. "A Novel and Self-Calibrating Weighing Sensor with Intelligent Peristaltic Pump Control for Real-Time Closed-Loop Infusion Monitoring in IoT-Enabled Sustainable Medical Devices." *Electronics* 13 (1724): 1–

18.

Latief, Maulana Fakih, Isep Irmansyah, and Lukman Rosyidi. 2024. "Sistem Pemantauan Ruang Kelas Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Proses Pendidikan Yang Efektif." *Digital Transformation Technology (Digitech)* 4 (2): 1278–84.

Malefors, Christopher, Erik Svensson, and Mattias Eriksson. 2024. "Automated Quantification Tool to Monitor Plate Waste in School Canteens." *Resources, Conservation & Recycling* 200 (November 2023): 107288. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107288.

Petchoo, Jaruneth, Narisara Kaewchutima, and Nattapol Tangsuphoom. 2022. "Nutritional Quality of Lunch Meals and Plate Waste in School Lunch Programme in Southern Thailand" 11 (2): 1–12. https://doi.org/10.1017/jns.2022.31.

Pitriani, Siti, Chalila Putri Komara, Deasy Silvya Sari, and Dina Yulianti. 2025. "Program Makan Bergizi Gratis Di Tengah Krisis Food Waste." *Electronic Journal of Social and Political Sciences (E-SOSPOL)* 12 (2): 361–73.

Sangwan, Ajay, Saurabh Kumar, and Divyashree Divyashree. 2024. "The Evolution of Waste Management Solutions Through IoT Integration : A Survey." *11th International Conference on Cutting-Edge Developments in Engineering Technology and Science*, 1122–26. https://doi.org/https://doi.org/10.62919/kjdj2311.

Somantri, Somantri, Indra Yustiana, Lutvita Dwi Iklima, and Hendra Handoko Syahputra. 2023. "Rancang Bangun Tempat Sampah Organik Dan Non Organik Berbasis Iot Dan Mobile Application." *Jurnal Sistem Informasi (E-Journal)* 15 (2): 3176–88.

Sundin, Niina, Christopher Malefors, Christina Strotmann, Daniel Orth, Kevin Kaltenbrunner, Gudrun Obersteiner, Silvia Scherhaufer, et al. 2024. "Sustainability Assessment of Educational Approaches as Food Waste Prevention Measures in School Catering." *Journal of Cleaner Production* 481 (November): 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144196.

Ulfah, Syafrina, and Fitri Handayani. 2025. "Studi Literatur: Program Pemberian Makan Di Sekolah Dan Hubungannya Dengan Status Gizi." *Jurnal Penelitian Kesmasy* 7 (2): 35–44.

Yadav, Rohit, Xuan-Hoa Nghiem, Mohit Yadav, Ali Najeeb, and Asanga Ranasinghe. 2025. "Internet of Things (IoT) and Smart Campuses." In *AI Smart-Enabled Architecture and Infrastructure for Higher Education*, 55–74. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8915-7.ch003.

Yesi, Emelia, and Muhammad Firman Annur. 2025. "The Influence of Nutritious Food Consumption Patterns in the Free Nutritional Meal Program (MBG) on the Mathematics Learning Achievement of Students at SDS Maniamas Ngabang." *Riemann: Research of Mathematics and Mathematics Education* 7 (2): 160–67.

Zuhra, Fatimah, Ikeu Tanziha, Cesilia Meti Dwiriani, and Muhammad Rizki Ramadhan. 2026. "Estimation of Food Waste and Nutrient Loss in The Free Nutritious Meal Program for Students in East Aceh, Indonesia." *Journal of Health and Nutrition Research* 5 (1): 91–101.