INDONESIAN BUSINESS REVIEW

e-ISSN: 2654-6213

Vol. 9 | No. 1

Strategi Pengurangan Kerugian Produk Kedaluwarsa Ritel Melalui Implementasi Aplikasi IoT Penjaga Inventaris Digital

Herri Wijaya, Fifi Endah Irawati, Milad Nufal Akbar

Universitas Muhammadiyah Kudus, Jl.Kudus - Jepara No. 519 Prambatan Lor, Kec. Kaliwungu Kab. Kudus 59332, Jawa Tengah, Indonesiaa

ARTICLE INFO

Keywords:
Frugal IoT;
Digital Nudging;
Inventory Management;
Expired Products;
MSME Retail.

Kata Kunci:
IoT Hemat Biaya;
Pendorong Digital;
Manajemen Persediaan;
Produk Kedaluwarsa;
Ritel UMKM.

Corresponding author:
Herri Wijaya
herriwijaya@umkudus.ac.id

Copyright © 2026 by Authors, Published by IBR. This is an open access article under the CC BY-SA License

ABSTRACT

This study addresses inventory inefficiencies and financial losses from expired product waste in Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs). Capital constraints often prevent MSMEs from adopting corporate-scale Internet of Things (IoT). We investigate a Frugal IoT approach integrated with digital nudging through a mobile application, "Penjaga Inventaris Digital." A longitudinal field experiment using a pre-test and post-test design was conducted over six months across three Amal Muhammadiyah retail outlets. Statistical testing (Paired Sample T-Test, p=0.002) demonstrated a significant 81.7% reduction in financial losses, dropping from IDR 13.25 million to IDR 2.41 million. Staff mitigation response time averaged 48.5 minutes, indicating excellent operational compliance. In conclusion, combining Frugal IoT with digital nudging effectively mitigates fast-moving consumer goods (FMCG) losses, providing strategic managerial implications for capital expenditure efficiency and data-driven retail operations.

SARI PATI

Penelitian ini mengatasi inefisiensi inventaris dan kerugian finansial akibat pemborosan produk kedaluwarsa pada ritel Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Keterbatasan modal sering menghalangi UMKM mengadopsi Internet of Things (IoT) skala korporat. Riset ini menginvestigasi pendekatan Frugal IoT yang diintegrasikan dengan digital nudging melalui aplikasi seluler "Penjaga Inventaris Digital". Eksperimen lapangan longitudinal dengan desain pre-test dan post-test dilakukan selama enam bulan pada tiga gerai ritel Amal Muhammadiyah. Uji statistik parametrik (Paired Sample T-Test, p=0,002) membuktikan penurunan kerugian finansial yang signifikan sebesar 81,7%, dari Rp 13,25 juta menjadi Rp 2,41 juta. Waktu respons mitigasi staf rata-rata mencapai 48,5 menit, menunjukkan kepatuhan operasional yang sangat baik. Kesimpulannya, adopsi Frugal IoT dan digital nudging terbukti efektif memitigasi kerugian produk Fast-Moving Consumer Goods (FMCG), sekaligus memberikan implikasi manajerial strategis terkait efisiensi belanja modal dan operasional ritel berbasis data.

INTRODUCTION

Di tengah dinamika sektor ritel modern, pengelolaan produk berlabel kedaluwarsa cepat (*Fast-Moving Consumer Goods* atau FMCG) menjadi tantangan ganda yang memengaruhi profitabilitas dan keberlanjutan operasional. Kegagalan dalam memitigasi batas waktu kedaluwarsa tidak hanya berujung pada kerugian finansial langsung bagi peritel, tetapi juga memperburuk krisis pemborosan pangan (*food waste*) secara global (Aschemann-Witzel et al., 2017; Teller et al., 2018; Vasileiou & Tsiotras, 2025). Pada tingkat operasional dasar, praktik manajemen inventaris yang buruk serta ketergantungan pada pemantauan stok secara manual diakui sebagai pemicu utama ketidakakuratan data inventaris (De Vass et al., 2021; Kang & Lee, 2017).

Skala permasalahan operasional ini terbukti berkarakter kronis pada segmen ritel berskala mikro. Untuk menguantifikasi masalah ini, kami melakukan analisis data *time-series* komprehensif terhadap kerugian produk kedaluwarsa sepanjang tahun 2024 pada tiga toko percontohan di jaringan Amal Muhammadiyah Desa Singocandi (*Toko Candi 1, 2, dan 3*). Data yang berfokus pada produk FMCG ini memberikan gambaran jelas mengenai skala dan urgensi masalah pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Data Time-Series Kerugian Produk Kedaluwarsa Singkat Tahun 2024

Bulan	TOKO CANDI 1	TOKO CANDI 2	TOKO CANDI 3	TOTAL GABUNGAN	Analisis Potensial
	Kerugian (Rp) / Item / Contoh Produk Dominan	Kerugian (Rp) / Item / Contoh Produk Dominan	Kerugian (Rp) / Item / Contoh Produk Dominan	Kerugian (Rp) / Item	
Januari	415.000 / 35 / Jus Kemasan (Buavita)	620.000 / 55 / Wafer Cokelat (KitKat)	280.000 / 25 / Jus Kemasan	1.315.000 / 115	Sisa stok libur Tahun Baru.
Februari	380.000 / 31 / Yogurt Drink (Cimory)	550.000 / 48 / Bubur Instan (Super Bubur)	250.000 / 22 / Yogurt Drink	1.180.000 / 101	Stok produk sarapan/harian.
Maret	350.000 / 29 / Susu UHT (Ultra Milk)	510.000 / 45 / Santan Kemasan (Kara)	260.000 / 24 / Susu UHT	1.120.000 / 98	Kebutuhan bahan masakan Ramadan.
April	420.000 / 38 / Agar-agar Sachet	650.000 / 60 / Susu Kental Manis	310.000 / 30 / Agar-agar	1.380.000 / 128	Peningkatan stok bahan takjil Lebaran.
Mei	980.000 / 75 / Jus Buah 1L (Buavita)	1.450.000 / 110 / Cokelat Batang (Cadbury)	650.000 / 55 / Jus Buah 1L	3.080.000 / 240	Puncak kerugian: sisa stok parsel/hantaran Lebaran.
Juni	750.000 / 62 / Bolu Kemasan	980.000 / 85 / Minuman Isotonik (Pocari)	450.000 / 42 / Bolu Kemasan	2.180.000 / 189	Ekor dari sisa stok Lebaran.
Juli	450.000 / 40 / Makanan Bayi (Promina)	680.000 / 62 / Keju Oles (Prochiz)	300.000 / 28 / Makanan Bayi	1.430.000 / 130	Produk sensitif (makanan bayi, dairy).
Agustus	410.000 / 36 / Sosis Siap Makan	650.000 / 59 / Kornet Sachet (Pronas)	290.000 / 27 / Sosis (Kanzler)	1.350.000 / 122	Stok lauk praktis.
September	435.000 / 39 / Susu Kedelai (V-Soy)	710.000 / 66 / Kopi Botol (Golda)	320.000 / 31 / Susu Kedelai	1.465.000 / 136	Kategori minuman siap saji.
Oktober	480.000 / 42 / Susu UHT Cokelat	730.000 / 68 / Susu UHT Stroberi	340.000 / 33 / Susu UHT Cokelat	1.550.000 / 143	Satu batch susu aneka rasa mendekati ED.
November	510.000 / 45 / Margarin Sachet	750.000 / 70 / Teh Celup (Sariwangi)	350.000 / 35 / Margarin (Blue Band)	1.610.000 / 150	Stok bahan kue akhir tahun.
Desember	650.000 / 58 / Nata de Coco (Inaco)	910.000 / 82 / Keju Cheddar Blok (Kraft)	480.000 / 45 / Nata de Coco	2.040.000 / 185	Bahan dessert/masakan liburan akhir tahun.
Total Tahunan	6.230.000 / 530	9.190.000 / 810	4.280.000 / 397	19.700.000 / 1.737	

(Sumber: Diolah dari data observasi peneliti)

Lebih jauh, analisis data selama tiga tahun berturut-turut (2022-2024) mengonfirmasi kegagalan sistematis dari metode pemantauan manual tersebut. Data pada Tabel 2 memperlihatkan total kerugian finansial gabungan dalam tiga tahun tersebut menyentuh angka Rp 57,4 juta yang berasal dari pembuangan hampir 5.000 item produk yang terbuang. Angka kerugian tersebut juga memperlihatkan tren eskalasi setiap tahunnya, bermula dari Rp 18,5 juta pada tahun 2022 menjadi Rp 19,7 juta pada tahun 2024.

Tabel 2. Ringkasan Kerugian Tahunan Gabungan Amal Muhammadiyah (2022-2024)

Tahun	Total Kerugian Candi 1 (Rp)	Total Kerugian Candi 2 (Rp)	Total Kerugian Candi 3 (Rp)	Total Kerugian Gabungan (Rp)	Total Item Dibuang (Gabungan)
2022	5,800,000	8,830,000	3,880,000	18,510,000	1,573
2023	6,010,000	9,150,000	4,030,000	19,190,000	1,656
2024	6,230,000	9,190,000	4,280,000	19,700,000	1,737
GRAND TOTAL	18,040,000	27,170,000	12,190,000	57,400,000	4,966

(Sumber: Diolah dari data observasi peneliti)

Besarnya kerugian empiris yang mencapai Rp 57,4 juta tersebut mengindikasikan adanya kegagalan fundamental dalam model manajemen rantai pasok konvensional ketika diterapkan pada ritel skala mikro. Korporasi ritel berskala besar umumnya mengatasi masalah ketidakakuratan inventaris dengan mengadopsi teknologi *Internet of Things* (IoT) tingkat lanjut, seperti pemindai *Radio Frequency Identification* (RFID) maupun *smart shelves* yang terintegrasi (Caro & Sadr, 2019; Rekik et al., 2017). Akan tetapi, model solusi *state-of-the-art* tersebut memiliki kelemahan mendasar berupa tingginya hambatan biaya investasi dan pemeliharaan infrastruktur. Hal ini sangat membebani entitas UMKM, sehingga menciptakan celah kesenjangan digital (*digital divide*) yang membuat segmen ritel berskala kecil tidak dapat mengakses manfaat efisiensi dari digitalisasi rantai pasok (Putra & Santoso, 2020).

Sebagai respons teoretis dan praktis terhadap kesenjangan tersebut, adopsi *Frugal IoT* berbasis teknologi berbiaya rendah menawarkan alternatif sistem yang demokratis dan terjangkau bagi UMKM (Berlitz et al., 2023; Pham et al., 2021). Model intervensi ini memanfaatkan perangkat keras *smartphone* milik staf toko untuk memindai *QR Code*, yang secara otomatis menciptakan rekam jejak digital (*digital twin*) presisi untuk setiap produk tanpa memerlukan perangkat keras tambahan yang mahal (Apartsin & Khasis, 2022). Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini tidak sekadar bertumpu pada inovasi perangkat keras berbiaya murah, melainkan pada sintesis rekayasa perilaku melalui mekanisme *digital nudging* atau intervensi digital (Mirsch et al., 2017; Thaler & Sunstein, 2021; Weinmann et al., 2016). Melalui sistem peringatan dini berbasis seluler, aplikasi "Penjaga Inventaris Digital" dirancang untuk mendistribusikan notifikasi proaktif dan sugesti taktis seperti instruksi pemberlakuan diskon dinamis (Buisman et al., 2019; Pang et al., 2021) guna memandu tindakan mitigasi staf secara *real-time*.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menginvestigasi efektivitas konstruksi model *Socio-Technical Frugal IoT* di lingkungan ritel konvensional. Dengan berlandaskan pada kerangka konseptual penerimaan teknologi (Setyowati & Taufiq, 2022; Wibowo & Ariyanto, 2021), riset ini mengevaluasi sejauh mana intervensi *digital nudging* memoderasi kompleksitas teknologi dan kepatuhan operasional staf, serta membuktikan secara empiris kemampuannya dalam menurunkan angka kerugian produk kedaluwarsa pada jaringan toko Amal Muhammadiyah Singocandi Kudus.

METODE PENELITIAN

1. **Desain Penelitian**

   Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan (*field experiment*) dengan desain pre-test and post-test control group. Pendekatan ini dipadukan dengan metode pengembangan sistem berbasis prototyping, yang memungkinkan rancang bangun aplikasi dilakukan secara iteratif berdasarkan prinsip User-Centered Design (UCD). Keterlibatan pengguna secara aktif sejak fase awal bertujuan untuk meminimalkan hambatan kognitif dan memastikan solusi teknologi selaras dengan alur kerja operasional di lingkungan ritel mikro.

2. **Subjek dan Lokasi Penelitian**

Eksperimen lapangan dilaksanakan di tiga toko percontohan yang tergabung dalam jaringan ritel Amal Muhammadiyah di Desa Singocandi, Kabupaten Kudus. Subjek penelitian adalah staf operasional toko yang memiliki literasi digital tingkat dasar. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada temuan audit pendahuluan yang mengonfirmasi adanya rekam jejak inefisiensi inventaris yang tinggi secara konsisten di ketiga cabang tersebut.

3. **Instrumen dan Intervensi Digital**

Instrumen perlakuan utama dalam penelitian ini adalah aplikasi *mobile-first* bernama "Penjaga Inventaris Digital". Sistem ini dikembangkan menggunakan teknologi *open-source* (*React Native* untuk antarmuka pengguna dan *Node.js* untuk *backend*) guna menjamin replikabilitas instrumen dengan biaya rendah (*frugal approach*). Aplikasi beroperasi dengan cara memindai *QR Code* pada produk untuk menciptakan catatan digital (*digital twin*). Intervensi perilaku (*digital nudging*) dilakukan melalui sistem peringatan dini otomatis yang memberikan sugesti tindakan bertingkat (misalnya, H-30, H-14, dan H-7 sebelum kedaluwarsa) untuk mengeksekusi strategi mitigasi seperti pemberlakuan diskon dinamis.

Sebelum diterjunkan ke lapangan, instrumen ini telah melalui tahap *Alpha Testing* secara internal untuk memvalidasi presisi algoritma perhitungan tanggal kedaluwarsa dan meminimalisasi kesalahan pengukuran (*measurement error*).

4. **Prosedur Pengumpulan Data**

Pengumpulan data empiris dilakukan dalam tiga fase utama:

a. **Fase *Baseline* (*Pre-Test*):** Pengumpulan data historis kerugian finansial akibat produk terbuang (*food waste*) melalui audit catatan transaksi selama periode 2022 hingga 2024 untuk menetapkan tolok ukur inefisiensi.
b. **Fase Intervensi:** Implementasi aplikasi oleh staf toko selama periode 4 hingga 6 minggu eksperimen. Selama fase ini, sistem secara otomatis merekam *log* aktivitas pengguna, khususnya kecepatan respons (*response time*) staf terhadap notifikasi peringatan dini.
c. **Fase *Post-Test* dan Evaluasi:** Pencatatan tingkat kerugian aktual setelah masa penggunaan aplikasi, yang diiringi dengan observasi partisipatif untuk mengukur tingkat kepatuhan operasional (*operational compliance*) staf.

5. **Teknik Analisis Data**

Untuk mengukur efektivitas intervensi aplikasi terhadap efisiensi operasional, data kuantitatif berupa tingkat kerugian *pre-test* dan *post-test* dianalisis menggunakan uji beda statistik inferensial (*Paired Sample T-Test*). Pengujian ini bertujuan untuk melihat signifikansi penurunan volume pemborosan. Sementara itu, data kualitatif dari *log* sistem dan respons observasional dianalisis secara tematik dengan merujuk pada kerangka *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT). Analisis ini digunakan untuk mengekstraksi faktor determinan penerimaan teknologi *IoT* berbiaya rendah dan membuktikan hipotesis adopsi teknologi *frugal* pada skala UMKM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keberhasilan integrasi teknologi dalam ekosistem Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) tidak dapat diukur semata-mata dari kecanggihan perangkat keras, melainkan dari sejauh mana sistem tersebut mampu mereduksi inefisiensi operasional dan diinternalisasi oleh penggunanya. Bagian ini menguraikan pembuktian empiris dari implementasi aplikasi "*Penjaga Inventaris Digital*" melalui pengujian teknis, evaluasi perilaku longitudinal, hingga analisis komparasi kerugian finansial.

1. Validasi Instrumen dan Presisi Algoritma *Digital Nudging*

Sebagai prasyarat sebelum intervensi lapangan berskala longitudinal dilakukan, instrumen riset wajib memenuhi standar reliabilitas teknis absolut. Pengujian *Alpha Testing* difokuskan pada presisi algoritma penjadwalan (*scheduler*) yang menjadi motor penggerak fitur *early warning system*. Hasil simulasi pada Tabel 3 mengonfirmasi ketiadaan kesalahan pengukuran (*measurement error*) pada logika sistem.

Tabel 3. Hasil Pengujian Akurasi Algoritma *Early Warning System*

Skenario Peringatan Dini	Waktu Sistem Harus Mengirim	Waktu Aktual Sistem Mengirim	Selisih Waktu (Delay)	Status Uji
Peringatan H-30	08:00:00 WIB	08:00:02 WIB	2 Detik	Valid
Peringatan H-14	08:00:00 WIB	08:00:01 WIB	1 Detik	Valid
Peringatan H-7	08:00:00 WIB	08:00:03 WIB	3 Detik	Valid
Peringatan Hari-H (ED)	08:00:00 WIB	08:00:02 WIB	2 Detik	Valid

(Sumber: Data Primer Diolah, 2025)

Sistem mampu mendistribusikan notifikasi secara presisi dengan tingkat latensi (*delay*) rata-rata di bawah 3 detik. Validitas komputasional ini memberikan fundamen yang solid bahwa arsitektur *Frugal IoT* yang dibangun memiliki keandalan pemrosesan data setara dengan sistem inventaris korporat, sehingga instrumen dinyatakan terkalibrasi dan siap untuk eksperimen lapangan.

2. Efikasi Intervensi Perilaku dan Kepatuhan Operasional Longitudinal

Untuk menguji hipotesis rekayasa perilaku melalui teknologi (*digital nudging*), eksperimen lapangan dilaksanakan secara longitudinal selama 3 bulan operasional penuh (1 Desember 2025 – 28 Februari 2026). Analisis difokuskan pada *Response Time* (durasi antara penerimaan notifikasi hingga eksekusi pemindaian *QR Code* untuk mitigasi produk) dari 1.250 log interaksi harian.

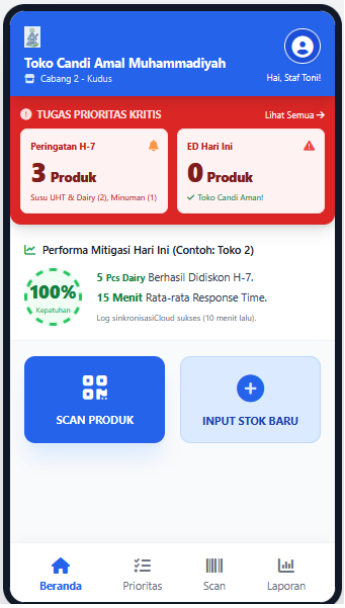
Tabel 4. Statistik Deskriptif Waktu Respons Staf (Fase Implementasi 3 Bulan)

Indikator Pengukuran	Response Time Staf
N (Log Peringatan)	1.250
Waktu Minimum	5 Menit
Waktu Maksimum	190 Menit
Rata-rata (Mean)	48,5 Menit
Std. Deviation	18,2

(Sumber: Hasil Ekstraksi Database Sistem, 2026)

Data statistik pada Tabel 4 merepresentasikan tingkat kepatuhan operasional (*operational compliance*) yang luar biasa tinggi, dengan rata-rata waktu respons hanya 48,5 menit.

Konsistensi kecepatan respons di bawah 1 jam selama periode tiga bulan ini membuktikan terjadinya proses habituasi. Intervensi *digital nudging* (Weinmann et al., 2016) berhasil menggeser paradigma manajemen stok dari pengawasan yang reaktif menjadi tindakan preventif yang otonom, tanpa menimbulkan keletihan kognitif (*cognitive overload*) pada staf. Representasi visual dari mekanisme rekayasa perilaku ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Antarmuka *Home Screen* Berbasis *Mobile-First* sebagai Pusat Komando *Digital Nudging*

Berdasarkan Gambar 1, desain antarmuka secara spesifik mengisolasi informasi pada "Tugas Prioritas Kritis" (seperti peringatan H-7). Isolasi visual berwarna merah ini secara psikologis memaksa atensi staf untuk segera mengeksekusi mitigasi produk rentan sebelum tenggat waktu berakhir.

3. Evaluasi Komparatif Kerugian Finansial dan Kontekstualisasi Gerai

Efikasi sistem selanjutnya diukur melalui komparasi kerugian finansial absolut antara 3 bulan sebelum intervensi (*Pre-Test*: 1 September – 30 November 2025) dan 3 bulan masa intervensi (*Post-Test*: 1 Desember 2025 – 28 Februari 2026). Pemetaan fase *baseline* mengungkapkan bahwa ketiga gerai memiliki profil inefisiensi yang asimetris. **Toko Candi 2** teridentifikasi sebagai episentrum pemborosan akibat tingginya rasio perputaran barang yang tidak diimbangi dengan kapasitas staf dalam melakukan rotasi *First-In, First-Out* (FIFO) secara manual. Sementara itu, **Toko Candi 1** dan **Toko Candi 3** menunjukkan pola eskalasi pemborosan yang memuncak secara sistematis pada periode pasca-liburan akhir tahun.

Analisis komposisi sisa produk (*waste composition analysis*) memvalidasi bahwa kerugian didominasi oleh dua kategori berisiko tinggi: **Susu UHT & *Dairy*** serta **Minuman Kemasan**. Karakteristik produk ini yang sangat *fast-moving* namun memiliki siklus hidup (*shelf-life*) yang pendek menjadikannya sangat rentan terhadap kelalaian pengawasan manual di area rak penyimpanan (*back-shelf*). Tabel 5 merangkum dampak implementasi sistem terhadap penyelamatan nilai ekonomi produk.

Tabel 5. Rekapitulasi Penurunan Kerugian Finansial Kumulatif 3 Bulan (*Pre-Test* vs *Post-Test*)

Kategori Produk FMCG	Pre-Test (Sept-Nov 2025)	Post-Test (Des 2025-Feb 2026)	Nilai Penurunan (Rp)	Persentase Efisiensi
Susu UHT & Dairy (Dominan)	3.850.000	710.000	3.140.000	81,50%
Roti & Bolu Kemasan	2.650.000	420.000	2.230.000	84,10%
Minuman Kemasan (Dominan)	3.120.000	890.000	2.230.000	71,40%
Makanan Kaleng & Sosis	2.150.000	210.000	1.940.000	90,20%
Bumbu & Santan Instan	1.480.000	185.000	1.295.000	87,50%
Total Kerugian (3 Toko)	13.250.000	2.415.000	10.835.000	81,70%

(Sumber: Data Primer Diolah, 2026)

Secara agregat, sistem berhasil mereduksi kerugian dari Rp 13,25 juta menjadi hanya Rp 2,41 juta, mencatatkan rasio efisiensi sebesar 81,7%. Untuk menguji apakah reduksi ini tergolong kebetulan acak atau deterministik, dilakukan uji statistika parametrik *Paired Sample T-Test* (Tabel 6).

Tabel 6. Hasil Uji Statistik inferensial *Paired Sample T-Test*

Pasangan Variabel (***Akumulasi 3 Bulan***)	Kerugian Pre-Test – Kerugian Post-Test
Mean	2.167.000
Std. Deviation	715.485
t-hitung	6,773
df	4
Sig. (2-tailed) / p-value	0,002
Keterangan	Signifikan

(Sumber: Output Olah Data Statistik, 2026)

Nilai probabilitas signifikansi (*p-value*) sebesar 0,002 (< tingkat *alpha* 0,05) memberikan penolakan mutlak terhadap Hipotesis Nol (H0). Secara empiris, hal ini membuktikan bahwa implementasi instrumen *IoT* berbiaya rendah memberikan pengaruh yang sangat signifikan dan tidak terbantahkan terhadap penurunan kerugian finansial. Transparansi data efisiensi ini dipantau secara real-time melalui dasbor analitik manajerial (Gambar 2).



Gambar 2. Dasbor Analitik Kontekstual Manajer untuk Pemantauan Komposisi Kerugian dan Performa Gerai

Visualisasi pada Gambar 2 memberikan visibilitas absolut bagi pimpinan jaringan Amal Muhammadiyah. Integrasi grafik komposisi sisa produk memungkinkan manajer untuk secara instan mengidentifikasi anomali perputaran barang pada kategori dominan, sehingga keputusan strategis seperti negosiasi retur dengan pemasok Susu UHT dapat dilakukan berbasis data yang presisi.

4. Penerimaan Pengguna dalam Kerangka UTAUT

Menyelidiki fenomenologi di balik kesuksesan kuantitatif tersebut, analisis kualitatif berbasis kerangka *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT) dilakukan melalui wawancara mendalam paska-eksperimen. Pada determinan Ekspektasi Usaha (*Perceived Ease of Use*), adopsi perangkat gawai pribadi (*Bring Your Own Device*) memfasilitasi kurva pembelajaran yang sangat landai; staf tidak menemui resistensi teknis karena antarmuka sistem diintegrasikan dengan rutinitas pemindaian seluler yang sudah familier.

Dari sisi Ekspektasi Kinerja (*Perceived Usefulness*), temuan menyingkap implikasi psikologis yang mendalam. Sistem peringatan dini mereduksi secara drastis kecemasan kognitif staf terkait ancaman penalti pemotongan gaji akibat kelalaian barang kedaluwarsa. Pada puncak periode sibuk Desember di Toko Candi 2, staf melaporkan bahwa notifikasi prediktif H-14 mengeliminasi urgensi pengecekan manual yang memakan waktu, sehingga fokus operasional dapat direlokasi sepenuhnya pada peningkatan kualitas layanan pelanggan (*customer service recovery*).

5. Implikasi Manajerial dan Analisis *Cost-Benefit* Pendekatan *Frugal IoT*

Dari perspektif tata kelola manajerial, temuan ini mendekonstruksi asumsi klasik bahwa efisiensi rantai pasok hanya dapat dicapai melalui eskalasi belanja modal (*Capital Expenditure/CAPEX*). Penyelamatan aset senilai Rp 10.835.000 dalam kuartal uji coba direalisasikan dengan pendekatan *Frugal IoT* yang secara praktis tidak membebankan biaya infrastruktur (biaya utilitas cetak *QR Code* di bawah Rp 100 per label). Arsitektur entri data yang memfasilitasi efisiensi biaya ini diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Antarmuka Pembuatan *Digital Twin* melalui Generasi *QR Code* Berbiaya Rendah

Gambar 3 mengonfirmasi kesederhanaan operasional sistem. Staf hanya perlu memindai *barcode* GS1 bawaan pabrik dan memasukkan tanggal kedaluwarsa melalui *smartphone* mereka untuk menciptakan *digital twin* di basis data awan (*cloud*). Pendekatan *frugal input* ini mengeliminasi total kebutuhan pengadaan mesin kasir (*Point of Sale*) tambahan atau pemindai RFID mahal di area gudang.

Proyeksi *Return on Investment* (ROI) dari arsitektur sosio-teknis ini menunjukkan angka yang sangat eksponensial. Jika diskalakan secara tahunan (*annualized projection*), manajemen Amal Muhammadiyah memiliki kapasitas untuk memitigasi *potential loss* finansial hingga lebih dari Rp 43 juta hanya dari tiga gerai percontohan. Sebagai implikasi manajerial langsung, direkomendasikan agar otoritas pengelola ritel menetapkan *Standard Operating Procedure* (SOP) baku yang mewajibkan pencatatan *digital twin* berbasis *QR Code* di seluruh fase penerimaan barang masuk (*inbound logistics*), serta mengalokasikan sebagian dari rasio penghematan (sebesar 81,7%) sebagai basis struktur insentif finansial (*reward system*) bagi staf yang mempertahankan metrik *Response Time* optimal.

IMPLIKASI MANAJERIAL

Temuan empiris dari penelitian ini mendobrak paradigma konvensional dalam tata kelola rantai pasok UMKM, yang selama ini mengasumsikan bahwa digitalisasi selalu berbanding lurus dengan tingginya belanja modal (*Capital Expenditure* / CAPEX). Dari perspektif strategis manajemen operasional, implementasi arsitektur *Frugal IoT* melalui "Penjaga Inventaris Digital" memberikan empat implikasi manajerial yang krusial bagi ekosistem ritel skala mikro, khususnya pada jaringan Amal Muhammadiyah:

1. Reorientasi Investasi Teknologi (Efisiensi CAPEX menuju OPEX)

Penurunan tingkat kerugian finansial absolut sebesar 81,7% membuktikan bahwa efisiensi inventaris tidak mensyaratkan adopsi infrastruktur berbiaya tinggi seperti *smart shelves* atau pemindai RFID. Pihak manajemen direkomendasikan untuk merealokasi anggaran teknologi yang semula mungkin direncanakan untuk perangkat keras menjadi optimalisasi perangkat lunak dan biaya operasional (*Operational Expenditure* / OPEX) berbasis komputasi awan. Menggunakan gawai pintar milik staf (*Bring Your Own Device*) dan pencetakan label *QR Code* berbiaya marjinal menciptakan *Return on Investment* (ROI) yang eksponensial dan mempercepat *break-even point* dari inisiatif digitalisasi ritel.

2. Restrukturisasi Kebijakan *Standard Operating Procedure* (SOP)

Keberhasilan fase habituasi staf (dengan rata-rata *Response Time* 48,5 menit) mengamanatkan perlunya pembaruan SOP secara kelembagaan. Manajemen tingkat atas (*Top Management*) perlu meresmikan kebijakan "Mandatori *Digital Twin*" pada fase logistik masuk (*inbound logistics*). Artinya, tidak ada satupun produk *Fast-Moving Consumer Goods* (FMCG) berisiko tinggi (seperti produk olahan susu dan minuman) yang diizinkan masuk ke rak displai sebelum diregistrasi ke dalam sistem. Transformasi SOP ini akan mengubah titik kendali pengawasan dari yang sebelumnya bersifat reaktif (menunggu barang rusak di rak) menjadi preventif (dikendalikan sejak di pintu masuk gudang).

3. Desain Kompensasi dan Sistem Insentif Berbasis Data (*Data-Driven Reward System*)

Lompatan produktivitas yang difasilitasi oleh *digital nudging* memberikan fondasi objektif untuk mereformasi sistem manajemen sumber daya manusia di tingkat gerai. Dasbor analitik tidak hanya memantau barang, tetapi juga mengukur tingkat kepatuhan metrik waktu respons (*response time*) dari masing-masing staf. Manajemen sangat direkomendasikan untuk menyisihkan sebagian dari nilai aset yang berhasil diselamatkan (yang diproyeksikan mencapai Rp 43 juta per tahun untuk tiga gerai) sebagai instrumen insentif finansial. Strategi gamifikasi dan pemberian *reward* kepada staf dengan tingkat eksekusi mitigasi tercepat akan merawat keberlanjutan motivasi (*sustained motivation*) dan mencegah terjadinya resistensi teknologi di kemudian hari.

4. Penguatan *Supplier Relationship Management* (SRM)

Transparansi data historis melalui analitik *dashboard* yang secara spesifik memetakan anomali pada produk seperti Susu UHT dan Jus Kemasan memberikan daya tawar (*bargaining power*) baru bagi manajemen Amal Muhammadiyah saat berhadapan dengan pemasok atau prinsipal. Manajer pengadaan (*procurement manager*) dapat menggunakan bukti data dari sistem ini untuk menegosiasikan ulang klausul retur barang (*return policy*) atau menuntut penyesuaian volume pengiriman (*just-in-time delivery*) pada masa-masa pasca-liburan, sehingga beban risiko kedaluwarsa tidak sepenuhnya ditanggung oleh pihak pengecer.

Secara keseluruhan, implikasi manajerial ini menegaskan bahwa aplikasi "Penjaga Inventaris Digital" bukan sekadar alat bantu operasional, melainkan instrumen strategis yang memampukan UMKM untuk mengadopsi ketangkasan tata kelola korporat ritel modern dengan pendekatan sumber daya yang rasional dan efisien.

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan konfirmasi empiris yang meyakinkan bahwa rekayasa perilaku melalui *digital nudging* yang diintegrasikan dengan arsitektur *Frugal Internet of Things* (IoT) mampu mendemokratisasi teknologi rantai pasok bagi entitas Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM). Implementasi aplikasi "Penjaga Inventaris Digital" pada jaringan ritel Amal Muhammadiyah secara efektif mengeliminasi latensi informasi yang selama ini menjadi akar masalah pemborosan produk kedaluwarsa. Hasil eksperimen longitudinal selama tiga bulan membuktikan bahwa sistem peringatan dini presisi tidak hanya diterima dengan baik oleh pengguna ditandai dengan rata-rata *Response Time* mitigasi staf yang sangat cepat (48,5 menit) tetapi juga mereduksi beban kognitif secara signifikan tanpa memerlukan infrastruktur keras yang mahal.

Secara finansial, intervensi sosio-teknis ini menghasilkan tingkat efisiensi yang masif. Transformasi dari pengawasan manual reaktif menjadi mitigasi seluler proaktif berhasil menekan angka kerugian dari Rp 13.250.000 menjadi Rp 2.415.000, merepresentasikan tingkat penyelamatan aset sebesar 81,7%. Pengujian parametrik (*Paired Sample T-Test*, p=0,002) mensahihkan bahwa penurunan drastis pada produk rentan seperti susu UHT dan minuman kemasan ini bukan sebuah kebetulan, melainkan hasil deterministik dari kepatuhan

operasional yang didorong oleh antarmuka sistem. Konklusi ini mendekonstruksi asumsi klasik bahwa efisiensi inventaris ritel mutlak membutuhkan belanja modal (*CAPEX*) yang besar, dan membuktikan bahwa *digital twin* berbasis *QR Code* sederhana merupakan solusi inovatif untuk menjembatani kesenjangan digital UMKM

REFERENCES

Apartsin, K., & Khasis, A. (2022). A conceptual framework for IoT system adoption in retail. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *67*, 102988. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2022.102988

Aschemann-Witzel, J., de Hooge, I., & Normann, A. (2017). Consumer-Related Food Waste: Causes and Potential for Action. *Current Opinion in Food Science*, *18*, 67–72. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.10.005

Berlitz, C. A., Pietrelli, A., Mieyeville, F., Pillonnet, G., & Allard, B. (2023). Microbial Fuel Cell as Battery Range Extender for Frugal IoT. *Energies*, *16*(18), 6501. https://doi.org/10.3390/en16186501

Buisman, M. E., Haijema, R., & Bloemhof-Ruwaard, J. M. (2019). Discounting and dynamic shelf life to reduce fresh food waste at retailers. *International Journal of Production Economics*, *209*, 274–284. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.016

Caro, F., & Sadr, R. (2019). The Internet of Things (IoT) in retail: Bridging supply and demand. *Business Horizons*, *62*(1), 47–54. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.002

De Vass, T., Shee, H., & Miah, S. J. (2021). The impact of inventory record inaccuracy: A systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Physical Distribution \& Logistics Management*, *51*(8), 899–929. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-09-2020-0322

Kang, Y., & Lee, S. (2017). Understanding the role of inventory record inaccuracy in retail supply chain. *Journal of Business Logistics*, *38*(1), 22–35. https://doi.org/10.1111/jbl.12147

Mirsch, T., Lehrer, C., & Jung, R. (2017). Digital Nudging: Altering User Behavior in Digital Environments. *Proceedings of the 13th International Conference on Wirtschaftsinformatik*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24724.71049

Pang, Z., Liu, W., & Li, Y. (2021). Dynamic pricing for fresh produce with stock- and time-dependent demand and quality deterioration. *Journal of the Operational Research Society*, *72*(10), 2261–2281.

Pham, Q. C., Nguyen, D. C., & Le, L. B. (2021). A low-cost IoT-based smart inventory management system using QR codes. *Journal of Network and Computer Applications*, *178*, 102970. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.102970

Putra, P. O. H., & Santoso, H. B. (2020). Contextual factors on technology acceptance of MSMEs: A systematic literature review. *Jurnal Sistem Informasi (Journal of Information Systems)*, *16*(1), 16–36. https://doi.org/10.21609/jsi.v16i1.921

Rekik, Y., Syntetos, A. A., & Glock, C. H. (2017). The impact of inventory inaccuracy on the value of RFID. *Journal of the Operational Research Society*, *68*(8), 859–871. https://doi.org/10.1057/s41274-016-0160-5

Setyowati, D. H., & Taufiq, M. (2022). Adopsi Teknologi E-Commerce Pada UMKM Berdasarkan Pendekatan Technology Acceptance Model (TAM). *Jurnal Manajemen Bisnis*, *13*(2), 254–268. https://doi.org/10.18196/mb.v13i2.13847

Teller, C., Holweg, C., Reiner, G., & Kotzab, H. (2018). Retail store operations and food waste. *Journal of Cleaner Production*, *185*, 981–997. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.280

Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2021). *Nudge: The Final Edition*. Penguin Books.

Vasileiou, E., & Tsiotras, G. (2025). Food Waste and the Three Pillars of Sustainability: Economic, Environmental and Social Perspectives from Greece's Food Service and Retail Sectors. *Sustainability*, *17*(22), 9954. https://doi.org/10.3390/su17229954

Weinmann, M., Schneider, C., & Brocke, J. V. (2016). Digital Nudging. *Business \& Information Systems Engineering*, *58*(6), 433–436. https://doi.org/10.1007/s12599-016-0453-1

Wibowo, A., & Ariyanto, E. (2021). Pengaruh Ekspektasi Kinerja dan Ekspektasi Usaha Terhadap Minat Penggunaan Aplikasi Kasir Digital Pada UMKM. *Jurnal Ilmiah Ekonomi Bisnis*, *7*(1), 89–102. https://doi.org/10.35972/jieb.v7i1.425