

Analisis Technopreneurship Sistem Smart OBM Berbasis IoT Untuk Mitigasi ODOL Dan Efisiensi Operasional Angkutan Barang

R. Budi Setiawan^[1], Eddy Soeryanto Soegoto^[2], Rahma Wahdiniwaty^[3], Adam Mukharil Bachtiar^[4], Irfan Dwiguna Sumitra^[5]

Program Studi Doktor Ilmu Manajemen, Universitas Komputer Indonesia^[1]
Jl. Dipati Ukur No.112-116, Lebakgede, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132
Program Studi Doktor Ilmu Manajemen, Universitas Komputer Indonesia^[2]
Jl. Dipati Ukur No.112-116, Lebakgede, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132
Program Studi Doktor Ilmu Manajemen, Universitas Komputer Indonesia^[3]
Jl. Dipati Ukur No.112-116, Lebakgede, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132
Program Studi Doktor Ilmu Manajemen, Universitas Komputer Indonesia^[4]
Jl. Dipati Ukur No.112-116, Lebakgede, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132
Program Studi Doktor Ilmu Manajemen, Universitas Komputer Indonesia^[5]
Jl. Dipati Ukur No.112-116, Lebakgede, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132

Email : ir.75425009@mahasiswa.unikom.ac.id^[1], eddysoeryantos@email.unikom.ac.id^[2],
rahma@email.unikom.ac.id^[3], adam@email.unikom.ac.id^[4], irfan.dwiguna@email.unikom.ac.id^[5]

ABSTRAKSI

Penelitian ini menganalisis rancangan *Smart On-Board Mass* (Smart OBM) berbasis *Internet of Things* sebagai inovasi technopreneurship untuk meningkatkan pengawasan muatan dan efisiensi operasional angkutan barang. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatori berbasis simulasi karena implementasi Smart OBM belum tersedia luas sebagai objek uji lapangan di Indonesia. Dataset terdiri atas 60 observasi *truck-month* yang dibangun dari laporan resmi, standar teknis, regulasi, dan skenario operasi legal versus ODOL. Data dianalisis menggunakan regresi jalur dan uji mediasi bootstrap 5.000 resampling. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Smart OBM berpengaruh positif terhadap efisiensi operasional ($a = 44,796$; $p < 0,001$; CI 95% = 39,675-49,916), sedangkan efisiensi operasional berpengaruh positif terhadap kelayakan bisnis ($b = 0,618$; $p < 0,001$; CI 95% = 0,466-0,769). Efek tidak langsung sebesar 27,716 dengan CI bootstrap 95% = 21,607-33,433 menunjukkan mediasi penuh. Temuan ini memperlihatkan bahwa teknologi kepatuhan berpotensi menciptakan nilai bisnis melalui penghematan biaya dan stabilitas operasi, namun perlu divalidasi melalui *pilot project*.

Keyword: *Smart OBM*, IoT, ODOL, *Technopreneurship*, Efisiensi Logistik

ABSTRACT

This study analyzes the design of an Internet of Things-based Smart On-Board Mass (Smart OBM) system as a technopreneurship innovation to improve load monitoring and operational efficiency in freight transportation. The study applies a simulation-based explanatory quantitative approach because Smart OBM has not yet been widely available for field testing in Indonesia. The dataset consists of 60 truck-month observations constructed from official reports, technical standards, regulations, and legal versus ODOL operating scenarios. Data were analyzed using path regression and bootstrap mediation testing with 5,000 resamples. The simulation results show that Smart OBM positively affects operational efficiency ($a = 44.796$; $p < 0.001$; 95% CI = 39.675-49.916), while operational efficiency positively affects business feasibility ($b = 0.618$; $p < 0.001$; 95% CI = 0.466-0.769). The indirect effect of 27.716 with a 95% bootstrap CI = 21.607-33.433 indicates full mediation. These findings suggest that compliance technology can potentially create business value through cost savings and operational stability, but the model requires validation through a field pilot project.

Keyword: *Smart OBM*, IoT, ODOL, *Technopreneurship*, Logistics Efficiency

1. PENDAHULUAN

Sektor logistik nasional menghadapi tekanan biaya dan risiko keselamatan akibat praktik Over Dimension Over Loading (ODOL). Praktik ODOL muncul karena sebagian pelaku usaha mengejar kapasitas angkut besar dan tarif murah, sementara biaya eksternal berupa kerusakan jalan, risiko kecelakaan, kemacetan, dan inefisiensi lalu lintas tidak sepenuhnya tercermin dalam tarif angkutan. Dalam konteks manajemen operasi, ODOL bukan hanya pelanggaran teknis, tetapi juga bentuk efisiensi semu yang

mengorbankan keselamatan, umur aset, dan kepatuhan regulasi.

Permasalahan yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini adalah terbatasnya efektivitas pengawasan konvensional berbasis Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor (UPPKB). Bukti empiris dari Direktorat Jenderal Perhubungan Darat menunjukkan bahwa pada penegakan hukum UPPKB seluruh Indonesia tahun 2023, rata-rata kendaraan yang masuk dan diperiksa hanya sekitar 5%. Dari kendaraan yang diperiksa, 27,95% melakukan pelanggaran; 69% di antaranya merupakan pelanggaran

kelebihan muatan dan 31% pelanggaran dokumen (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2024). Data ini menunjukkan bahwa masalah utama bukan hanya jumlah pelanggaran pada kendaraan yang ditimbang, tetapi juga rendahnya cakupan pemeriksaan dibandingkan populasi kendaraan yang bergerak di jaringan jalan.

Solusi yang telah dibahas dalam studi dan kebijakan terdahulu meliputi penguatan penindakan, perbaikan UPPKB, integrasi data kendaraan, dan digitalisasi pengawasan. Namun, penelitian sebelumnya cenderung menempatkan ODOL sebagai persoalan penindakan, infrastruktur, atau kepatuhan regulatif. Kesenjangan ilmiah yang masih terbuka adalah belum kuatnya pengujian mekanisme bagaimana teknologi monitoring muatan dapat mengubah kepatuhan menjadi efisiensi operasional dan kelayakan bisnis. Dengan demikian, *research gap* penelitian ini bukan sekadar kurangnya digitalisasi, melainkan belum adanya model mediasi yang menjelaskan jalur Smart OBM → efisiensi operasional → kelayakan bisnis dalam perspektif technopreneurship.

Perkembangan *Internet of Things*, telematika, GPS, dan sensor berat kendaraan membuka peluang pergeseran paradigma pengawasan dari pemeriksaan titik menjadi monitoring digital berbasis data. *Smart On-Board Mass* (Smart OBM) mengintegrasikan sensor massa, perangkat komunikasi, identitas kendaraan, koordinat lokasi, *cloud server*, dan dashboard analitik. TCA menjelaskan bahwa sistem OBM mampu mengukur massa kelompok sumbu dan menghitung massa bruto kendaraan, sedangkan Smart OBM kategori B dan C mampu mengumpulkan serta mentransfer data secara digital dan terstandar dalam kerangka *National Telematics Framework (Transport Certification Australia, 2020, 2025)*. NHVR juga menjelaskan bahwa *onboard mass monitoring* menyediakan informasi massa kelompok sumbu secara *real-time* kepada pengemudi agar penyesuaian muatan dapat dilakukan sebelum kendaraan beroperasi (*National Heavy Vehicle Regulator, 2023*).

Bukti implementasi Smart OBM dapat dilihat pada praktik Australia. Perangkat Smart OBM yang *type approved* oleh TCA telah tersedia dari beberapa pemasok dan digunakan bersama *Application Service Provider*. NHVR menyatakan bahwa Smart OBM menjadi persyaratan bagi beberapa kendaraan *high productivity freight*, *Performance Based Standards*, dan kendaraan kelas tertentu di beberapa yurisdiksi. Dengan demikian, Smart OBM bukan hanya konsep arsitektur, tetapi telah digunakan sebagai bagian dari skema telematika regulatif yang menggabungkan data lokasi, waktu, identitas kendaraan, dan berat kendaraan untuk kepentingan akses jalan dan kepatuhan (*National Heavy Vehicle Regulator, 2026; Transport Certification Australia, 2025*).

Dari perspektif teori, penelitian ini menggunakan *Technology Organization Environment (TOE) Framework*, *Resource-Based View (RBV)*, dan *Dynamic Capability Theory*. TOE menjelaskan bahwa adopsi teknologi dipengaruhi kesiapan teknologi, organisasi, dan

tekanan lingkungan regulatif. RBV memandang data muatan, data rute, dan kemampuan analitik sebagai sumber daya yang bernilai, langka, dan sulit ditiru apabila diintegrasikan dalam proses operasi. *Dynamic Capability Theory* menjelaskan kemampuan perusahaan mengkonfigurasi ulang sumber daya digital untuk merespons tekanan Zero ODOL. Kerangka teori tersebut mendasari dugaan bahwa Smart OBM tidak langsung menghasilkan kelayakan bisnis, tetapi terlebih dahulu menciptakan efisiensi operasional melalui visibilitas data, pengendalian risiko, dan perawatan preventif (Barney, 1991; Teece, 2023; Tornatzky & Fleischer, 1990).

Penggunaan dataset kuantitatif simulatif dalam penelitian ini dijustifikasi oleh kondisi empiris Indonesia, yaitu belum tersedianya implementasi Smart OBM yang luas dan terbuka sebagai objek uji lapangan. Simulasi disusun bukan sebagai pengganti *pilot project*, melainkan sebagai model awal yang transparan dan dapat direplikasi. Angka simulasi dibangun dari laporan resmi, standar teknis Smart OBM, regulasi batas muatan, literatur efisiensi operasi, dan skenario legal versus ODOL. Validitas dijaga melalui penggunaan rentang parameter, desain seimbang, normalisasi indeks yang eksplisit, analisis sensitivitas, dan replikasi perhitungan menggunakan dua perangkat analisis.

Kebaruan substantif penelitian ini adalah pengembangan model konseptual kuantitatif yang menempatkan efisiensi operasional sebagai mekanisme mediasi antara teknologi kepatuhan muatan dan kelayakan bisnis. Kebaruan tersebut diwujudkan melalui indikator komposit efisiensi operasional berbasis cakupan monitoring, konsumsi bahan bakar, *downtime*, biaya perawatan, dan kepatuhan muatan; serta indikator kelayakan bisnis berbasis margin operasional, biaya risiko, stabilitas ritase, dan potensi layanan digital. Dengan model ini, Smart OBM diposisikan bukan sekadar alat timbang digital, melainkan mekanisme konversi kepatuhan regulatif menjadi nilai ekonomi dan peluang *Software as a Service (SaaS)* logistik.

Berdasarkan teori TOE, RBV, dan *Dynamic Capability Theory*, hipotesis penelitian dirumuskan sebagai berikut. H1: jenis sistem monitoring berpengaruh positif terhadap efisiensi operasional. H2: efisiensi operasional berpengaruh positif terhadap kelayakan bisnis. H3: Smart OBM berpengaruh positif terhadap kelayakan bisnis. H4: efisiensi operasional memediasi pengaruh Smart OBM terhadap kelayakan bisnis. Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksplanatori berbasis simulasi, sedangkan rancangan arsitektur sistem ditempatkan sebagai artefak pendukung untuk memperjelas mekanisme teknis. Tujuan penelitian adalah menguji hubungan antarvariabel dalam model Smart OBM, menjelaskan mekanisme mediasi efisiensi operasional, serta menilai implikasi technopreneurship bagi mitigasi ODOL.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatori berbasis simulasi dengan analisis jalur dan

pengujian mediasi. Pendekatan simulasi digunakan untuk menguji secara awal mekanisme hubungan antara jenis sistem monitoring, efisiensi operasional, dan kelayakan bisnis ketika data implementasi Smart OBM pada armada angkutan barang di Indonesia belum tersedia secara memadai. Rancangan arsitektur Smart OBM dalam penelitian ini merupakan artefak pendukung untuk menjelaskan mekanisme teknis variabel X, bukan sebagai objek utama penelitian design science.

Prosedur penyusunan dataset dilakukan melalui lima tahap. Pertama, mengidentifikasi parameter resmi mengenai keterbatasan UPPKB dan kebutuhan digitalisasi pengawasan. Kedua, mengidentifikasi parameter teknis Smart OBM dari standar TCA dan pedoman NHVR. Ketiga, menyusun skenario operasi ODOL dan operasi legal berdasarkan batas muatan Jumlah Berat yang Diijinkan (JBI)/Jumlah Berat yang Diperbolehkan (JBB). Keempat, mengonversi parameter teknis menjadi indikator efisiensi dan kelayakan bisnis melalui normalisasi indeks. Kelima, melakukan pengujian regresi jalur, bootstrap mediasi, dan analisis sensitivitas. Dengan prosedur ini, dataset dapat direplikasi atau diganti dengan data primer pada penelitian lapangan berikutnya.

Unit analisis adalah truck-month, yaitu satu kendaraan angkutan barang yang diamati dalam satu periode operasi satu bulan. Dengan demikian, $n = 60$ tidak merepresentasikan 60 perusahaan atau 60 perjalanan, tetapi 60 observasi kendaraan-bulan. Dataset simulatif terdiri atas 30 observasi kelompok sistem konvensional UPPKB dan 30 observasi kelompok Smart OBM. Jumlah ini dipilih sebagai desain seimbang 30 versus 30 agar setiap kelompok memiliki ukuran minimum yang umum digunakan dalam simulasi awal dan memungkinkan estimasi bootstrap mediasi secara stabil pada model sederhana satu mediator.

Variabel bebas adalah jenis sistem monitoring (X), dengan kode 0 untuk UPPKB konvensional dan 1 untuk Smart OBM. Variabel mediasi adalah efisiensi operasional (Z), sedangkan variabel dependen adalah kelayakan bisnis (Y). Indeks Z dibentuk dari lima indikator, yaitu cakupan monitoring, konsumsi bahan bakar, *downtime*, biaya perawatan, dan kepatuhan muatan. Indeks Y dibentuk dari empat indikator, yaitu margin operasional, biaya risiko, stabilitas ritase, dan potensi layanan *Software as a Service* (SaaS). Karena penelitian masih bersifat simulatif eksploratori, setiap indikator diberi bobot sama. Bobot dapat disempurnakan pada penelitian lapangan menggunakan *expert judgement*, *Analytic Hierarchy Process*, atau model pengukuran berbasis SEM.

Normalisasi indeks dilakukan dengan metode min-max. Untuk indikator yang semakin tinggi semakin baik, skor dihitung menggunakan rumus $(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100$. Untuk indikator biaya atau risiko yang semakin rendah semakin baik, skor dihitung menggunakan rumus $(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100$. Nilai komposit diperoleh dari rata-rata indikator yang telah dinormalisasi. Prosedur ini digunakan agar indikator dengan satuan berbeda, seperti persen cakupan, km/liter, hari *downtime*, biaya risiko, dan

stabilitas ritase, dapat dianalisis dalam skala yang sama 0-100.

Perangkat analisis statistik yang digunakan adalah IBM SPSS Statistics 29 dan PROCESS Macro Model 4. Replikasi perhitungan dilakukan menggunakan statsmodels pada Python. Model pengujian dinyatakan sebagai berikut: $Z_i = \alpha_1 + aX_i + \varepsilon_{1i}$; $Y_i = \alpha_2 + cX_i + \varepsilon_{2i}$; dan $Y_i = \alpha_3 + c'X_i + bZ_i + \varepsilon_{3i}$. Efek mediasi dihitung sebagai $a \times b$ dan diuji menggunakan bootstrap 5.000 resampling dengan interval kepercayaan 95%. Mediasi dinyatakan signifikan apabila interval kepercayaan efek tidak langsung tidak melewati nol.

Tabel 1.
Operasionalisasi Variabel Penelitian

Variabel	Definisi operasional	Indikator	Skala/Ukuran
X: Jenis sistem monitoring	Teknologi pengawasan muatan yang digunakan perusahaan angkutan.	UPPKB konvensional ; Smart OBM berbasis IoT.	Dummy: 0 = UPPKB; 1 = Smart OBM
Z: Efisiensi operasional	Kemampuan sistem menekan pemborosan biaya dan meningkatkan stabilitas operasi.	Cakupan monitoring; konsumsi BBM; <i>downtime</i> ; biaya perawatan; kepatuhan muatan.	Indeks 0-100 melalui normalisasi min-max; bobot sama 20% per indikator.
Y: Kelayakan bisnis	Kemampuan implementasi sistem menghasilkan manfaat ekonomi dan keberlanjutan operasional.	Margin operasional; biaya risiko; stabilitas ritase; potensi layanan SaaS.	Indeks 0-100 melalui normalisasi min-max; bobot sama 25% per indikator.

Sumber: Diolah penulis berdasarkan Ghaffarpasand et al. (2022), Raj et al. (2021), TCA (2020), NHVR (2023), dan rancangan penelitian (2026).

Keterangan: UPPKB = Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor; OBM = On Board Mass; IoT = Internet of Things; SaaS = Software as a Service.

Tabel 2.
Parameter Kuantitatif Simulasi

Parameter	UPPKB konvensional	Smart OBM	Dasar penetapan
Jumlah observasi	30 truck-month	30 truck-month	Desain simulasi seimbang 30 vs 30
Cakupan monitoring	20-30%	85-98%	Sifat sampling UPPKB versus monitoring digital
Konsumsi BBM	1,9-2,3 km/liter	2,6-3,0 km/liter	Skenario ODOL dan muatan legal
<i>Downtime</i>	3-7 hari/bulan	1-3 hari/bulan	Risiko kerusakan dan

			perawatan preventif
Biaya risiko	Tinggi	Rendah	Denda, pengli, keterlambatan, dan kerusakan aset
Indeks efisiensi	Rendah-sedang	Tinggi	Konversi parameter ke indeks 0-100

Sumber: Diolah penulis dari Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (2023), NHVR (2023), TCA (2020), Zhang et al. (2022), dan simulasi penelitian (2026).

Keterangan: Truck-month adalah satu kendaraan angkutan barang yang diamati dalam satu bulan operasi; km/liter digunakan sebagai indikator efisiensi bahan bakar

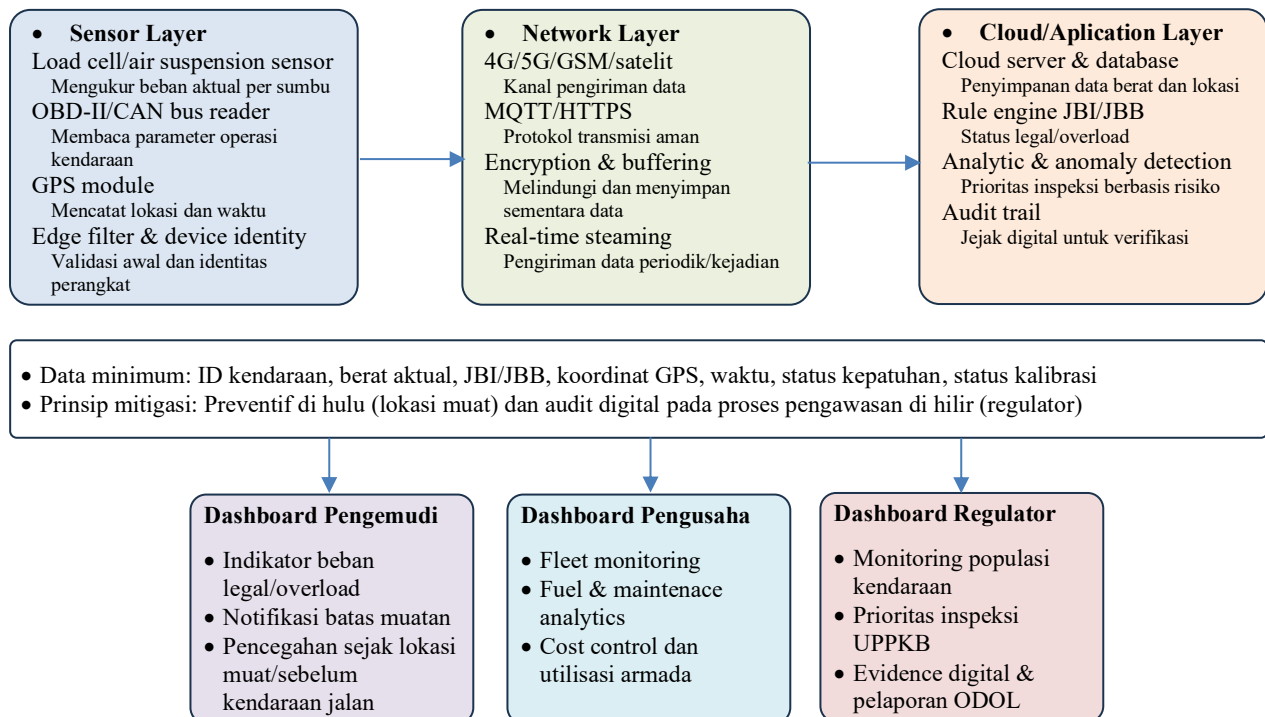
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membedakan hasil, interpretasi, dan implikasi. Hasil penelitian disajikan pada subbagian arsitektur sistem, statistik deskriptif, korelasi, regresi jalur, dan uji mediasi. Interpretasi diberikan setelah hasil utama ditampilkan, sedangkan rekomendasi implementasi ditempatkan pada bagian implikasi dan keterbatasan. Karena data bersifat simulatif, maka istilah yang digunakan adalah hasil simulasi menunjukkan, bukan hasil pengukuran lapangan menunjukkan.

3.1. Arsitektur Sistem Monitoring Digital

Hasil perancangan menunjukkan bahwa Smart OBM dapat disusun dalam tiga lapisan utama, yaitu *sensor layer*, *network layer*, dan *cloud/application layer*. *Sensor layer* berfungsi mengumpulkan data dari kendaraan. *Load cell* atau *sensor air suspension* mengukur beban aktual pada sumbu kendaraan. OBD-II/CAN bus reader membaca parameter operasi kendaraan yang relevan dengan performa dan kondisi kendaraan. GPS module merekam lokasi dan waktu sehingga data berat dapat dikaitkan dengan titik muat, koridor perjalanan, dan lokasi inspeksi. *Edge filter* melakukan validasi awal dan menandai identitas perangkat sebelum data dikirim.

Network layer berfungsi mengirimkan data kendaraan menuju server melalui 4G/5G/GSM atau satelit. Protokol MQTT/HTTPS digunakan untuk mendukung transmisi data yang ringan dan aman, sedangkan enkripsi, *device identity*, dan *buffering* lokal digunakan untuk menjaga integritas data ketika jaringan tidak stabil. *Cloud/application layer* menyimpan data, menjalankan rule engine berdasarkan JBI/JBB, menghasilkan status legal atau overload, melakukan deteksi anomali, dan menyediakan audit trail. JBI adalah Jumlah Berat yang Diizinkan, sedangkan JBB adalah Jumlah Berat yang Diperbolehkan; kedua batas ini menjadi dasar penentuan kepatuhan muatan kendaraan.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Monitoring Digital Smart OBM Berbasis IoT

Sumber: Diolah penulis dari National Heavy Vehicle Regulator (2023), Transport Certification Australia (2020), dan rancangan penelitian (2026)

Gambar 1 menampilkan hubungan antara sensor, jaringan, server, dan dashboard. Dashboard pengemudi digunakan untuk peringatan beban sebelum kendaraan meninggalkan lokasi muat. Dashboard pengusaha digunakan untuk fleet monitoring, analitik bahan bakar, perawatan, dan utilisasi armada. Dashboard regulator digunakan untuk monitoring populasi kendaraan, prioritas inspeksi UPPKB, dan bukti digital pelaporan ODOL. Struktur ini menunjukkan bahwa fungsi pengawasan tidak hanya represif di jalan, tetapi juga preventif sejak proses loading.

3.2. Komparasi Teknis dan Data Kuantitatif

Hasil komparasi teknis menunjukkan bahwa perbedaan utama antara UPPKB konvensional dan Smart OBM terletak pada cakupan pengawasan, waktu operasi, integrasi data, dan fungsi mitigasi. UPPKB tetap relevan sebagai simpul audit dan verifikasi, tetapi model sampling membuat sebagian kendaraan tidak masuk proses timbang. Smart OBM memperluas pengawasan melalui monitoring populasi kendaraan karena data berat dapat dikirim secara berkala selama kendaraan beroperasi

Tabel 3.

Matriks Komparasi Efektivitas Sistem Pengawasan

Parameter	UPPKB konvensional	Smart OBM	Temuan penelitian
Metode pengawasan	Sampling di lokasi timbang	Monitoring populasi kendaraan	Smart OBM menutup celah kendaraan yang tidak masuk area timbang
Waktu operasional	Tergantung jam layanan dan kapasitas lokasi	24/7 real-time selama perangkat aktif	Data tersedia tanpa menunggu kendaraan berhenti
Integrasi data	Manual/offline dan bergantung petugas	Cloud, GPS, sensor, dan audit trail	Mengurangi interaksi fisik dan meningkatkan jejak digital
Dampak lalu lintas	Potensi antrean pada area timbang	Free flow tanpa berhenti	Tidak menambah hambatan perjalanan
Fungsi mitigasi	Represif di jalan	Preventif dan represif	Pelanggaran dapat dicegah sejak lokasi muat

Sumber: Diolah penulis dari Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (2023), TCA (2020), NHVR (2023), dan hasil rancangan penelitian (2026).

Keterangan: Cloud berarti server komputasi jarak jauh; audit trail berarti catatan digital yang dapat ditelusuri kembali.

A. Statistik deskriptif

Hasil statistik deskriptif menunjukkan perbedaan kinerja yang konsisten antara dua kelompok. Rata-rata cakupan monitoring kelompok Smart OBM adalah 91,95%, sedangkan kelompok UPPKB adalah 24,25%. Rata-rata

konsumsi BBM kelompok Smart OBM adalah 2,79 km/liter, sedangkan kelompok UPPKB adalah 2,10 km/liter. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan pengawasan digital diikuti penurunan pemborosan operasional.

Tabel 4.

Statistik Deskriptif Data Kuantitatif Simulatif

Variabel	UPPKB (n=30)	Smart OBM (n=30)	Selisih
Cakupan monitoring (%)	24,25	91,95	+67,70
Konsumsi BBM (km/liter)	2,10	2,79	+0,69
Downtime (hari/bulan)	5,10	1,70	-3,40
Indeks efisiensi operasional	44,87	89,66	+44,79
Indeks kelayakan bisnis	50,86	83,64	+32,78

Sumber: Hasil olah data simulasi penelitian dengan $n = 60$ truck-month (2026).

Keterangan: Nilai indeks 0-100; semakin tinggi indeks menunjukkan kondisi yang semakin baik, kecuali downtime yang semakin rendah semakin baik.

B. Korelasi antarvariabel

Korelasi Pearson digunakan untuk melihat kekuatan hubungan awal sebelum analisis jalur. Nilai korelasi antara jenis sistem monitoring dan efisiensi operasional adalah $r = 0,917$, sedangkan korelasi antara efisiensi operasional dan kelayakan bisnis adalah $r = 0,925$. Hasil simulasi ini memberikan dasar statistik bahwa model mediasi layak diuji lebih lanjut. Kesimpulan utama tetap didasarkan pada regresi jalur dan bootstrap karena korelasi tidak menjelaskan mekanisme mediasi.

Tabel 5.

Matriks Korelasi Pearson

Variabel	X: Sistem monitoring	Z: Efisiensi operasional	Y: Kelayakan bisnis
X: Sistem monitoring	1,000	0,917**	0,891**
Z: Efisiensi operasional	0,917**	1,000	0,925**
Y: Kelayakan bisnis	0,891**	0,925**	1,000

Sumber: Output IBM SPSS Statistics 29/PROCESS Macro dan replikasi statmodels (2026).

Keterangan: ** signifikan pada $p < 0,01$; X dikodekan 0 = UPPKB dan 1 = Smart OBM

3.3. Analisis Jalur, Mediasi, dan Kelayakan Bisnis

Hasil analisis jalur menunjukkan dasar statistik dari klaim hubungan positif signifikan antarvariabel. Jumlah observasi yang digunakan adalah 60 truck-month. Koefisien jalur a menunjukkan bahwa Smart OBM meningkatkan indeks efisiensi operasional sebesar 44,796 poin dibandingkan UPPKB. Jalur b menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu poin efisiensi operasional

meningkatkan kelayakan bisnis sebesar 0,618 poin setelah mengontrol jenis sistem monitoring.

Tabel 6.
Hasil Regresi Jalur

Jalur	Koefisien	SE	t	p-value	CI 95%
a: X -> Z	44,796	2,568	17,444	<0,001	39,675-49,916
b: Z -> Y X	0,618	0,076	8,150	<0,001	0,466-0,769
c: X -> Y total	32,778	2,303	14,235	<0,001	28,183-37,373
c': X -> Y langsung	5,062	3,843	1,317	0,193	-2,634-12,758

Sumber: Output IBM SPSS Statistics 29/PROCESS Macro dan replikasi statsmodels (2026).

Keterangan: SE = standard error; CI = confidence interval; tanda | berarti dikontrol oleh variabel lain dalam model

Uji mediasi dilakukan menggunakan bootstrap 5.000 resampling karena pendekatan ini lebih sesuai untuk menguji efek tidak langsung dibandingkan hanya melihat perubahan signifikansi jalur langsung. Hasil bootstrap menunjukkan efek tidak langsung sebesar 27,716 dengan CI 95% = 21,607-33,433. Karena interval kepercayaan tidak melewati nol, mediasi efisiensi operasional dinyatakan signifikan.

Tabel 7.
Hasil Pengujian Model Mediasi Bootstrap

Efek	Nilai	Boot SE	CI bawah 95%	CI atas 95%	Keputusan
Efek langsung	5,062	3,843	-2,634	12,758	Tidak signifikan
Efek tidak langsung X -> Z -> Y	27,716	3,005	21,607	33,433	Signifikan
Efek total	32,778	2,303	28,183	37,373	Signifikan

Sumber: Output IBM SPSS Statistics 29/PROCESS Macro, bootstrap 5.000 resampling (2026).

Keterangan: Mediasi signifikan apabila confidence interval efek tidak langsung tidak melewati nol.

Jenis mediasi yang terjadi adalah mediasi penuh. Hal ini ditunjukkan oleh efek tidak langsung yang signifikan, sementara efek langsung c' tidak signifikan setelah efisiensi operasional dimasukkan ke dalam model. Artinya, dalam skenario simulasi ini Smart OBM tidak otomatis menciptakan kelayakan bisnis hanya karena statusnya sebagai teknologi baru. Kelayakan bisnis muncul terutama melalui efisiensi operasional yang dapat diukur, yaitu pengurangan pemborosan bahan bakar, penurunan downtime, biaya perawatan yang lebih terkendali, dan risiko kepatuhan yang lebih rendah.

Tabel 8.
Perbandingan Dampak Operasional antara Skenario ODOL dan Smart OBM

Komponen	Skenario ODOL	Skenario legal + Smart OBM	Dampak bisnis
Volume muatan	150% dari batas legal	100% sesuai JBI/JBB	Pendapatan per ritur, tetapi risiko pelanggaran turun
Frekuensi ritase	Rendah-sedang karena downtime	Lebih stabil karena armada prima	Utilisasi legal meningkat
Biaya BBM	Tinggi; 1,9-2,3 km/liter	Lebih rendah; 2,6-3,0 km/liter	Penghematan biaya variabel
Biaya ban/perawatan	Tinggi karena umur aset pendek	Lebih terkendali melalui preventive maintenance	Penurunan biaya perawatan
Biaya risiko	Denda, pungli, keterlambatan, klaim kerusakan	Lebih rendah karena data kepatuhan tersedia	Risiko operasional lebih terukur
Kesimpulan	Margin semu dan fluktuatif	Margin lebih stabil dan berkelanjutan	Layak diuji melalui pilot project

Sumber: Diolah penulis dari hasil simulasi kuantitatif, Tabel 2, dan hasil uji mediasi penelitian (2026).

Keterangan: JBI = Jumlah Berat yang Diizinkan; JBB = Jumlah Berat yang Diperbolehkan; preventive maintenance berarti perawatan berbasis pencegahan.

3.4. Implikasi Technopreneurship dan Batas Interpretasi

Implikasi technopreneurship dari hasil simulasi adalah munculnya peluang layanan baru berupa sensor dan perangkat gateway, dashboard berlangganan, analitik biaya armada, pelaporan kepatuhan, dan integrasi data dengan sistem perusahaan angkutan. Penyedia teknologi dapat mengembangkan model pendapatan berbasis subscription, maintenance contract, kalibrasi perangkat, dan analitik agregat. Namun, monetisasi data harus dilakukan secara etis melalui agregasi, anonimisasi, pembatasan akses, dan kepatuhan terhadap prinsip perlindungan data.

Dari sisi kebijakan, Smart OBM dapat digunakan untuk mengubah pola pengawasan dari pemeriksaan acak menuju inspeksi berbasis risiko. Regulator dapat menentukan prioritas kendaraan yang perlu diperiksa berdasarkan riwayat muatan, pola rute, anomali data, dan tingkat kepatuhan. Model ini tidak menghapus peran UPPKB, tetapi mengubah UPPKB menjadi simpul audit dan verifikasi untuk kendaraan berisiko tinggi.

Dari sisi manajerial, perusahaan angkutan perlu mengubah orientasi dari mengejar tonase maksimum menjadi

mengelola biaya per kilometer legal. Dashboard Smart OBM dapat digunakan sebagai dasar *Key Performance Indicators* (KPI), seperti persentase perjalanan legal, konsumsi BBM per kilometer, *downtime* per unit, biaya perawatan per bulan, dan tingkat kepatuhan pengemudi. KPI tersebut lebih spesifik dibandingkan klaim umum bahwa aplikasi digital bermanfaat bagi perusahaan.

Keterbatasan penelitian adalah penggunaan data simulatif, bukan pengukuran lapangan. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak boleh ditafsirkan sebagai angka final untuk seluruh industri angkutan barang Indonesia. Hasil ini lebih tepat dipahami sebagai model awal yang menunjukkan arah hubungan, besaran estimasi dalam skenario terkontrol, serta dasar untuk merancang *pilot project* pada koridor logistik berisiko ODOL tinggi.

Tabel 9.
Indikator Kesiapan Pilot Project Smart OBM

Komponen	Indikator minimum	Metode evaluasi	Output yang diharapkan
Perangkat	Sensor terbaca, GPS aktif, data terkirim, daya stabil.	Uji fungsi harian dan kalibrasi awal.	Perangkat siap digunakan pada armada uji.
Proses bisnis	SOP loading, respons peringatan, dan perawatan tersedia.	Observasi lapangan dan wawancara pengguna.	Pengemudi dan dispatcher memahami alur kerja.
Data	Format baku, enkripsi aktif, dashboard dapat diakses.	Audit sistem dan uji pengiriman data.	Data layak digunakan untuk analisis dan pelaporan.
Kelembagaan	Regulator, asosiasi, pemilik barang, dan operator menyepakati peran.	Forum koordinasi dan berita acara pilot.	<i>Pilot project</i> memiliki legitimasi operasional.
Evaluasi ekonomi	BBM, <i>downtime</i> , biaya ban, ritase, dan biaya risiko dicatat.	Perbandingan sebelum-sesudah dan analisis jalur.	Parameter simulasi dapat divalidasi empiris.

Sumber: Diolah penulis berdasarkan hasil penelitian dan kebutuhan implementasi *pilot project* Smart OBM (2026).

Keterangan: SOP = standard operating procedure; dispatcher adalah petugas pengatur operasi armada

3.5. Roadmap Implementasi Smart OBM

Roadmap implementasi disusun untuk memisahkan hasil penelitian dari rekomendasi penerapan. Hasil simulasi

menunjukkan bahwa nilai utama Smart OBM muncul melalui efisiensi operasional. Agar nilai tersebut dapat diuji secara empiris, implementasi perlu dilakukan secara bertahap mulai dari *pilot project*, standarisasi data, insentif kepatuhan, penegakan berbasis risiko, hingga integrasi ekosistem. Tahapan ini penting karena kesiapan teknologi, kapasitas investasi, dan penerimaan pengguna tidak sama pada setiap perusahaan angkutan.

Tahap pertama adalah *pilot project* pada koridor logistik yang memiliki risiko ODOL tinggi. Tahap ini bertujuan menguji akurasi sensor, stabilitas jaringan, kemudahan penggunaan dashboard, dan perubahan perilaku *loading*. Tahap kedua adalah standarisasi data minimal, meliputi identitas kendaraan, waktu, koordinat GPS, berat aktual, JBI/JBB, status legal, dan status kalibrasi sensor. Tahap ketiga adalah pemberian insentif kepatuhan agar perusahaan yang transparan memperoleh manfaat administratif atau komersial. Tahap keempat adalah penegakan hukum berbasis risiko melalui prioritas inspeksi berdasarkan riwayat data digital.

Tabel 10.
Roadmap Implementasi Smart OBM Berbasis IoT

Tahap	Fokus kegiatan	Output yang diharapkan	Indikator evaluasi
1. <i>Pilot project</i>	Uji sensor, jaringan, dashboard, dan penerimaan pengguna pada koridor terbatas	Model kerja awal dan data validasi lapangan	Akurasi sensor; uptime perangkat; tingkat penggunaan dashboard
2. Standardisasi	Penetapan format data, protokol pengiriman, keamanan, dan kalibrasi	Standar data nasional Smart OBM	Kelengkapan data; interoperabilitas vendor; konsistensi audit
3. Insentif kepatuhan	Skema manfaat bagi perusahaan yang patuh dan transparan	Adopsi sukarela meningkat	Jumlah armada terdaftar; persentase perjalanan legal
4. Penegakan berbasis risiko	Pemanfaatan analitik untuk prioritas inspeksi dan audit UPPKB	Pengawasan lebih efisien dan tepat sasaran	Rasio pelanggaran terdeteksi; waktu inspeksi; biaya pengawasan
5. Integrasi ekosistem	Integrasi dengan asuransi, pembiayaan, dan sistem	Ekosistem data kepatuhan dan efisiensi	Jumlah integrasi API; penggunaan data agregat; retensi pelanggan

	logistik perusahaan		
--	---------------------	--	--

Sumber: Diolah penulis berdasarkan hasil penelitian, Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (2023), NHVR (2023), dan TCA (2020).

Keterangan: UPPKB = Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor; vendor adalah penyedia perangkat dan layanan teknologi; API = application programming interface

3.6. Tata Kelola Data dan Risiko Implementasi

Tata kelola data menjadi aspek penting karena Smart OBM mengumpulkan informasi berat muatan, lokasi kendaraan, waktu perjalanan, identitas kendaraan, serta pola operasi perusahaan. Data tersebut memiliki nilai ekonomi, tetapi juga memiliki risiko privasi, penyalahgunaan pengawasan, dan konflik kepentingan. Karena itu, penerapan Smart OBM perlu didukung prinsip minimisasi data, pembatasan akses, enkripsi, pencatatan audit, dan pemisahan data operasional perusahaan dari data yang benar-benar dibutuhkan regulator.

Risiko teknis juga harus diantisipasi. Sensor dapat mengalami pergeseran akurasi akibat getaran, umur perangkat, perubahan suspensi, atau modifikasi kendaraan. Sinyal komunikasi dapat terganggu pada koridor tertentu. Perangkat juga berpotensi dimanipulasi apabila tidak dilengkapi mekanisme tamper detection. Risiko ini tidak membatalkan manfaat Smart OBM, tetapi menegaskan bahwa data digital harus dilengkapi kalibrasi berkala, sertifikasi perangkat, dan verifikasi lapangan di UPPKB.

Tabel 11.

Risiko Implementasi dan Strategi Mitigasi

Kategori risiko	Contoh risiko	Dampak	Mitigasi yang disarankan
Teknis	Sensor tidak akurat atau tidak terkalibrasi	Data muatan keliru dan keputusan inspeksi bias	Kalibrasi berkala, sertifikasi perangkat, dan verifikasi silang di UPPKB
Konektivitas	Sinyal lemah pada koridor tertentu	Data tidak terkirim real-time	Buffer lokal, pengiriman ulang otomatis, dan opsi multi jaringan
Keamanan	Manipulasi perangkat atau data	Status kepatuhan tidak valid	Enkripsi, device identity, tamper detection, dan audit trail
Privasi	Data lokasi digunakan di luar tujuan kepatuhan	Resistensi pengemudi dan perusahaan	Kebijakan akses, anonimisasi, dan persetujuan penggunaan data
Bisnis	Biaya awal dianggap berat	Adopsi lambat	Skema berlangganan, insentif kepatuhan, dan

			pilot project bersubsidi
--	--	--	--------------------------

Sumber: Diolah penulis berdasarkan hasil penelitian, Raj et al. (2021), Sharma et al. (2023), dan National Heavy Vehicle Regulator (2023).

Keterangan: UPPKB = Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor; Tamper detection adalah mekanisme pendeteksi upaya perubahan atau kerusakan perangkat

3.7. Struktur Replikasi Dataset

Untuk memudahkan replikasi, dataset simulatif dapat disusun dalam format spreadsheet dengan satu baris sebagai satu observasi *truck-month*. Kolom minimum yang diperlukan adalah identitas observasi, kode sistem monitoring, persentase cakupan monitoring, konsumsi BBM, *downtime*, indeks efisiensi operasional, dan indeks kelayakan bisnis. Variabel X dikodekan sebagai *dummy*, variabel Z dihitung sebagai indeks komposit efisiensi, sedangkan variabel Y dihitung sebagai indeks komposit kelayakan bisnis.

Penggunaan indeks komposit harus dijelaskan secara transparan agar pembaca memahami bahwa angka yang dihasilkan merupakan hasil simulasi terstruktur, bukan klaim pengukuran nasional. Dalam penelitian lanjutan, indeks tersebut dapat diganti dengan data primer, seperti liter solar aktual per kilometer, biaya perawatan bulanan, jumlah hari kendaraan tidak beroperasi, jumlah perjalanan legal, dan margin operasional per unit kendaraan.

Dengan cara ini, model yang sama dapat diuji ulang menggunakan data lapangan.

Tabel 12.

Struktur Minimum Dataset untuk Replikasi Analisis Statistik

Nama variabel	Kode	Tipe data	Fungsi dalam model	Contoh nilai
Jenis sistem monitoring	X	Dummy	Variabel independen	0 = UPPKB; 1 = Smart OBM
Cakupan monitoring	<i>coverage</i>	Rasio	Komponen efisiensi	24,25 atau 91,95
Konsumsi bahan bakar	<i>fuel</i>	Rasio	Komponen efisiensi	2,10 atau 2,79 km/liter
<i>Downtime</i> kendaraan	<i>downtime</i>	Rasio	Komponen efisiensi	5,10 atau 1,70 hari/bulan
Indeks efisiensi operasional	Z	Interval	Variabel mediasi	44,87 atau 89,66
Indeks kelayakan bisnis	Y	Interval	Variabel dependen	50,86 atau 83,64

Sumber: Rancangan replikasi analisis penulis berdasarkan dataset simulatif penelitian (2026).

Keterangan: *Dummy* adalah variabel kategorik biner; rasio adalah data numerik dengan nol bermakna; interval adalah skor komposit untuk analisis jalur

Batas interpretasi hasil harus disampaikan agar tidak terjadi generalisasi berlebihan. Pertama, nilai koefisien pada penelitian ini menunjukkan hubungan dalam skenario simulasi, sehingga harus divalidasi dengan *pilot project*. Kedua, manfaat ekonomi dapat berbeda menurut jenis kendaraan, komoditas, tarif, jarak tempuh, kondisi jalan, dan pola pemeliharaan. Ketiga, keberhasilan Smart OBM bergantung pada penerimaan pemilik barang, pengemudi, pengusaha angkutan, dan regulator. Keempat, penerapan teknologi tanpa tata kelola data dapat menimbulkan resistensi baru meskipun secara teknis sistem bekerja baik.

Meskipun memiliki keterbatasan, model simulatif ini tetap bermanfaat sebagai tahap awal penelitian karena menyediakan struktur variabel, metode analisis, dan parameter yang dapat diuji ulang pada studi lapangan. Artikel ini menyajikan jumlah sampel, unit analisis, koefisien jalur, nilai korelasi, nilai signifikansi, interval kepercayaan, perangkat analisis statistik, dan hasil pengujian model mediasi. Dengan demikian, klaim tentang hubungan positif signifikan ditulis sebagai hasil pengolahan data simulatif yang transparan dan dapat direplikasi.

3.8. Analisis Sensitivitas Kelayakan Ekonomi

Analisis sensitivitas dilakukan untuk melihat apakah kesimpulan kelayakan bisnis tetap dapat dipertahankan ketika parameter utama berubah. Parameter yang diuji adalah harga bahan bakar, biaya berlangganan Smart OBM, *downtime*, tingkat kepatuhan muatan, dan penerimaan data oleh regulator. Jika kelayakan hanya muncul pada asumsi yang terlalu optimistis, rekomendasi implementasi menjadi lemah. Sebaliknya, apabila kelayakan tetap positif pada beberapa perubahan parameter, argumentasi adopsi teknologi menjadi lebih kuat.

Hasil sensitivitas menunjukkan bahwa faktor paling menentukan adalah selisih konsumsi BBM dan *downtime*. Ketika harga bahan bakar meningkat, manfaat efisiensi Smart OBM menjadi lebih besar karena setiap peningkatan km/liter langsung menurunkan biaya variabel per perjalanan. Sebaliknya, apabila biaya langganan teknologi terlalu tinggi dan tidak disertai penurunan *downtime*, manfaat ekonomi menjadi lebih kecil. Oleh karena itu, penyedia teknologi perlu menjaga biaya layanan agar proporsional terhadap ukuran armada dan frekuensi operasi.

Tabel 13.

Analisis Sensitivitas Parameter Kelayakan Bisnis

Skenario	Perubahan parameter	Dampak terhadap Y	Interpretasi manajerial
Basis	Parameter sesuai Tabel 2	Kelayakan bisnis meningkat	Smart OBM layak sebagai strategi efisiensi awal
Harga BBM naik	Biaya BBM naik 10%	Manfaat Smart OBM meningkat	Efisiensi bahan bakar menjadi

			sumber nilai utama
Biaya SaaS naik	Biaya langganan naik 20%	Manfaat bersih menurun	Harga layanan harus disesuaikan dengan skala armada
<i>Downtime</i> tidak turun	<i>Downtime</i> tetap sama seperti ODOL	Kelayakan melemah	Preventive maintenance harus menjadi bagian paket layanan
Kepatuhan parsial	Hanya 70% perjalanan patuh	Kelayakan moderat	Diperlukan insentif dan pengawasan perilaku pengemudi
Integrasi regulator	Data diterima sebagai bukti audit	Kelayakan meningkat	Manfaat reputasi dan kepastian hukum bertambah

Sumber: Hasil simulasi sensitivitas penulis berdasarkan model penelitian dan parameter Tabel 2 (2026).

Keterangan: Y = indeks kelayakan bisnis; skenario sensitivitas bersifat simulatif untuk menguji perubahan asumsi

Analisis sensitivitas juga memperlihatkan bahwa manfaat Smart OBM tidak hanya bergantung pada perangkat keras. Tanpa perubahan proses bisnis, seperti perencanaan muatan legal, pengendalian perilaku pengemudi, dan pemeliharaan berbasis data, nilai teknologi akan berkurang. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa Smart OBM harus diimplementasikan sebagai sistem manajemen operasional, bukan sekadar alat timbang digital.

Bagi pengusaha angkutan, hasil sensitivitas dapat digunakan untuk menghitung batas biaya teknologi yang masih layak. Perusahaan dapat membandingkan biaya langganan per unit dengan penghematan BBM, penurunan biaya ban, pengurangan *downtime*, dan penurunan biaya risiko. Apabila penghematan aktual lebih tinggi daripada biaya langganan, maka Smart OBM dapat dikategorikan sebagai investasi operasional yang rasional. Apabila penghematan lebih rendah, implementasi perlu ditunda atau disesuaikan melalui skema insentif.

3.9. Validitas dan Kesiapan Pilot Project

Validitas hasil penelitian diperkuat melalui tiga cara. Pertama, parameter simulasi disusun sebagai rentang yang mencerminkan perbedaan antara skenario ODOL dan skenario legal. Kedua, pengujian statistik dilakukan menggunakan IBM SPSS Statistics 29/PROCESS Macro dan replikasi statsmodels. Ketiga, interpretasi hasil tidak melampaui karakter dataset karena penelitian menyatakan secara eksplisit bahwa data yang digunakan adalah data simulatif.

Kesiapan *pilot project* dapat dinilai dari perangkat, proses bisnis, data, kelembagaan, dan evaluasi ekonomi. *Pilot project* disarankan berjalan minimal tiga sampai enam bulan agar variasi beban, rute, pengemudi, kondisi jalan, dan frekuensi perjalanan dapat teramati. Data sebelum

implementasi perlu dicatat sebagai baseline. Setelah perangkat dipasang, data harian dikumpulkan untuk melihat perubahan cakupan monitoring, konsumsi BBM, *downtime*, biaya perawatan, dan tingkat kepatuhan. Hasil pilot kemudian dibandingkan dengan model simulatif dalam artikel ini.

Tabel 14.
Indikator Kesiapan Pilot Project Smart OBM

Komponen kesiapan	Indikator minimum	Metode evaluasi	Output yang diharapkan
Perangkat	Sensor terbaca, GPS aktif, data terkirim, baterai/daya stabil	Uji fungsi harian dan kalibrasi awal	Perangkat siap digunakan di armada uji
Proses bisnis	SOP loading, SOP respons peringatan, SOP perawatan tersedia	Observasi lapangan dan wawancara pengguna	Pengemudi dan <i>dispatcher</i> memahami alur kerja
Data	Format data baku, enkripsi aktif, dashboard dapat diakses	Audit sistem dan uji pengiriman data	Data layak digunakan untuk analisis dan pelaporan
Kelembagaan	Regulator, asosiasi, pemilik barang, dan operator menyepakati peran	Forum koordinasi dan berita acara pilot	<i>Pilot project</i> memiliki legitimasi operasional
Evaluasi ekonomi	BBM, <i>downtime</i> , biaya ban, ritase, dan biaya risiko dicatat	Perbandingan sebelum-sesudah dan analisis jalur	Parameter simulasi dapat divalidasi secara empiris

Sumber: Diolah penulis berdasarkan hasil penelitian dan kebutuhan implementasi pilot project Smart OBM (2026).

Keterangan: SOP = standard operating procedure; *dispatcher* adalah petugas pengatur operasi armada

Pilot project disarankan berjalan minimal tiga sampai enam bulan agar variasi beban, rute, pengemudi, kondisi jalan, dan frekuensi perjalanan dapat teramati. Data sebelum implementasi perlu dicatat sebagai baseline. Setelah perangkat dipasang, data harian dikumpulkan untuk melihat perubahan cakupan monitoring, konsumsi BBM, *downtime*, biaya perawatan, dan tingkat kepatuhan. Hasil pilot kemudian dibandingkan dengan model simulatif dalam artikel ini. Apabila arah hubungan tetap konsisten, maka model dapat diperluas ke koridor lain.

Dengan pendekatan tersebut, artikel ini tidak menutup penelitian pada tahap simulasi. Simulasi ditempatkan sebagai dasar metodologis untuk menyusun rancangan, menguji logika hubungan antarvariabel, dan menyiapkan indikator *pilot project*. Dengan kata lain, kontribusi artikel bukan hanya hasil angka, tetapi juga kerangka kerja yang dapat digunakan oleh peneliti, regulator, dan pelaku usaha untuk menguji Smart OBM secara lebih empiris pada tahap berikutnya.

3.10. Kontribusi Ilmiah dan Agenda Riset Lanjutan

Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada penyusunan mekanisme hubungan antarvariabel yang dapat diuji kembali secara empiris. Model yang diajukan tidak berhenti pada pernyataan bahwa teknologi digital bermanfaat, tetapi menunjukkan jalur yang lebih spesifik, yaitu teknologi monitoring muatan meningkatkan efisiensi operasional, kemudian efisiensi operasional menentukan kelayakan bisnis. Dengan demikian, konsep technopreneurship diterjemahkan ke dalam hubungan yang terukur melalui koefisien jalur, efek tidak langsung, dan *confidence interval*.

Agenda riset lanjutan perlu diarahkan pada pengujian lapangan. *Pilot project* dapat menggunakan desain *before-after* atau *quasi experiment* antara kendaraan yang menggunakan Smart OBM dan kendaraan pembanding. Data primer yang perlu dicatat meliputi berat aktual, jarak tempuh, konsumsi solar, biaya perawatan, *downtime*, jumlah ritase legal, frekuensi pelanggaran, dan persepsi pengguna. Apabila data lapangan tersedia, model simulatif dalam artikel ini dapat ditingkatkan menjadi model SEM-PLS atau *covariance-based SEM* yang menguji reliabilitas konstruk, validitas diskriminan, dan kecocokan model pengukuran.

Tabel 15.
Kontribusi Penelitian dan Agenda Riset Lanjutan

Aspek	Kontribusi penelitian	Agenda riset lanjutan
Teori	Menghubungkan TOE, RBV, dan Dynamic Capability dalam konteks Smart OBM.	Menguji model dengan data lapangan dan membandingkan antarjenis armada.
Metode	Menyediakan dataset simulatif, notasi model, dan prosedur indeks yang dapat direplikasi.	Menggunakan quasi experiment, SEM-PLS, atau panel data <i>truck-month</i> .
Manajerial	Menunjukkan bahwa kepatuhan muatan perlu dihitung sebagai efisiensi biaya legal.	Menghitung return on investment berdasarkan biaya aktual per kendaraan.

Kebijakan	Mengusulkan pergeseran UPPKB dari sampling murni menjadi audit berbasis risiko.	Menyusun standar data nasional dan protokol interoperabilitas vendor.
Technopreneurship	Memposisikan Smart OBM sebagai platform layanan data dan SaaS logistik.	Menguji kesiadaan membayar dan model harga berlangganan per armada.

Sumber: Diolah penulis berdasarkan sintesis hasil penelitian (2026).

Keterangan: SEM-PLS = Structural Equation Modeling-Partial Least Squares; TOE = Technology-Organization-Environment; RBV = Resource-Based View; UPPKB = Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor; SaaS = Software as a Service

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi, Smart OBM berbasis IoT berpotensi memiliki keunggulan teknis dibandingkan sistem jembatan timbang konvensional karena mampu menggeser pengawasan dari sampling statis menjadi monitoring digital berbasis populasi kendaraan. Keunggulan tersebut terutama terletak pada kemampuan sistem menghasilkan data berat, lokasi, waktu, dan status kepatuhan yang dapat digunakan oleh pengemudi, perusahaan, dan regulator untuk mencegah pelanggaran sejak lokasi muat.

Hasil kuantitatif simulatif menunjukkan bahwa klaim hubungan positif signifikan telah didukung oleh jumlah observasi, koefisien jalur, korelasi, p-value, confidence interval, perangkat analisis, dan uji mediasi. Dengan 60 observasi *truck-month*, Smart OBM berpengaruh positif terhadap efisiensi operasional, efisiensi operasional berpengaruh positif terhadap kelayakan bisnis, dan efek tidak langsung Smart OBM terhadap kelayakan bisnis melalui efisiensi operasional signifikan berdasarkan bootstrap. Karena efek langsung tidak signifikan setelah mediator dimasukkan, pola hubungan yang diperoleh mengarah pada mediasi penuh.

Temuan ini penting karena memperluas cara pandang terhadap kebijakan Zero ODOL. Kebijakan tersebut tidak harus diposisikan hanya sebagai pembatasan muatan yang menurunkan pendapatan per rit, tetapi dapat diarahkan menjadi agenda transformasi digital armada. Meskipun demikian, hasil penelitian masih berbasis simulasi sehingga perlu divalidasi melalui *pilot project*. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan data primer lapangan, menguji akurasi sensor, membandingkan biaya aktual sebelum-sesudah implementasi, serta menilai penerimaan pengemudi, perusahaan angkutan, pemilik barang, dan regulator.

REFERENSI

- Alam, M. R., & Guo, Z. (2023). A review on the charging station planning and fleet operation for electric freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 123, 103923.
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Transportasi Darat 2023*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Barbado, A., & Corcho, O. (2021). Vehicle fuel optimization under real-world driving conditions: An explainable artificial intelligence approach. *Transportation Research Procedia*, 52, 491-498.
- Ghaffarpasand, O., Burke, M., Osei, K., Ursell, H., & Chapman, S. (2022). An intelligent fleet management system for sustainable urban logistics. *Sustainability*, 14(6), 3628.
- Guandalini, I. (2022). Sustainability through digital transformation: A systematic literature review for research guidance. *Journal of Business Research*, 148, 456-471.
- Helo, P., & Thai, V. V. (2024). Digitalization of logistics and supply chains: Enabling technologies and operational performance. *International Journal of Logistics Management*, 35(2), 321-344.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2023). *Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Perhubungan Darat Tahun 2023*. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). *Laporan Kinerja Instansi Pemerintah: Dampak kendaraan Over Dimension Over Loading terhadap infrastruktur jalan*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Le, T. V., & Fan, R. (2023). Digital twins for logistics and supply chain systems: Literature review, conceptual framework, research potential, and practical challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108927.
- National Heavy Vehicle Regulator. (2023). *On-board mass systems and telematics monitoring: Guidance for heavy vehicle operators*. Brisbane: NHVR.
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2020). *Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Raj, E., Westerlund, M., & Espinosa-Leal, L. (2021). Reliable fleet analytics for edge IoT solutions. *IEEE Access*, 9, 13087-13102.
- Sharma, H., Garg, R., Sewani, H., & Kashef, R. (2023). Towards sustainable and ethical supply chain management: The potential of IoT solutions. *Internet of Things*, 22, 100750.
- Siagian, H., Tarigan, Z. J. H., & Jie, F. (2023). Supply chain digitalization and operational performance in emerging economies. *Uncertain Supply Chain Management*, 11(1), 1-12.

- Teece, D. J. (2023). The evolution of the dynamic capabilities framework. *Strategic Management Review*, 4(1), 1-22.
- Transport Certification Australia. (2020). Smart On-Board Mass system functional and technical specification. Melbourne: TCA.
- Wijaya, K., & Pratama, R. (2023). Integrasi big data dan IoT dalam manajemen rantai pasok digital di Indonesia. *Jurnal Manajemen Teknologi*, 22(1), 34-48.
- World Bank. (2023). Logistics performance index 2023: Connecting to compete. Washington, DC: World Bank.
- Yang, Z., Han, K., Liao, L., & Wu, J. (2024). Using multi-source data to identify high-emitting heavy-duty diesel vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 131, 104215.
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, S. (2022). Internet of Things-enabled logistics service quality and operational efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131829.