



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 5570-5579

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Integritas halal end to end (traceability berbasis event dan AI)

Siti maisaroh<sup>1</sup>, Nur Asnawi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UIN Raden Intan Lampung

<sup>2</sup>UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

[Sitimaisaroh2507@gmail.com](mailto:Sitimaisaroh2507@gmail.com), [asnawi@manajemen.uin-malang.ac.id](mailto:asnawi@manajemen.uin-malang.ac.id)

### Abstrak

*Integritas halal tidak hanya bergantung pada kepatuhan prosedural di setiap tahapan proses, tetapi juga pada keterhubungan bukti yang dapat diverifikasi secara menyeluruh dan berkesinambungan dari hulu ke hilir. Penelitian ini menggunakan desain kualitas dengan metode analisis dokumen dan telaah literatur terkini untuk menyintesis komponen kunci yang diperlukan agar status halal dapat diverifikasi secara end to end dalam sistem rantai pasok modern. Analisis dilakukan menggunakan inductive qualitative content analysis guna memetakan titik-titik kerentanan utama, meliputi pengadaan bahan baku, proses produksi khususnya pada aktivitas changeover dan pembersihan logistik dan penyimpanan termasuk cold chain, hingga tahapan ritel dan pengelolaan produk retur. Hasil analisis menunjukkan bahwa risiko terbesar dalam menjaga integritas halal bukan semata-mata disebabkan oleh ketidakpatuhan terhadap standar operasional, melainkan oleh terputusnya keterhubungan informasi dan bukti antar simpul proses. Kondisi ini berpotensi memperlambat penelusuran insiden, mendorong penerapan broad recall, serta meningkatkan pemborosan dan biaya operasional. Studi ini menghasilkan dua keluaran operasional utama, yaitu matriks bukti minimum yang wajib tertaut pada setiap lot atau batch produk, serta kerangka Halal Sustainability Digital Scorecard (HSDS) yang mengintegrasikan indikator kinerja, sumber bukti, dan digital enablers. Temuan penelitian menegaskan bahwa event-based traceability yang interoperabel merupakan fondasi penting untuk mempercepat proses trace-back dan trace-forward serta meningkatkan presisi targeted recall. Selain itu, teknologi kecerdasan buatan berperan sebagai pendukung pengambilan keputusan melalui peningkatan kualitas data, deteksi anomali, dan percepatan triase tindakan korektif tanpa menggantikan fungsi audit halal.*

*Kata kunci: Halal Supply Chain, Digital Traceability, Artificial Intelligence*

### 1. Latar Belakang

Industri makanan dan minuman halal saat ini berada pada fase transisi yang signifikan. Tuntutan pasar tidak lagi berhenti pada keberadaan label sertifikasi halal semata, tetapi bergerak menuju pembuktian integritas halal yang konsisten dan berkelanjutan di seluruh rantai pasok, mulai dari hulu hingga hilir (*end-to-end*). Perubahan ini dipicu oleh meningkatnya kesadaran konsumen, kompleksitas rantai pasok global, serta ekspektasi regulator terhadap transparansi dan akuntabilitas yang lebih tinggi.

Pada level operasional, integritas halal menuntut penerapan kontrol yang ketat terhadap segregasi bahan, pencegahan kontaminasi silang, serta pengelolaan proses pembersihan dan *changeover* pada fasilitas produksi. Selain itu, disiplin pemasok, operator logistik, dan penyedia penyimpanan menjadi faktor krusial dalam menjaga status halal produk. Tanpa sistem kontrol yang terukur dan terdokumentasi secara konsisten, risiko ketidakpatuhan cenderung meningkat, terutama ketika rantai pasok melibatkan banyak pelaku dan multi-titik *handover*.

Kompleksitas tersebut semakin diperbesar oleh karakteristik rantai pasok pangan–minuman yang bersifat dinamis dan terfragmentasi. Setiap perpindahan bahan atau produk antar simpul proses berpotensi menjadi titik kerentanan yang dapat mengancam integritas halal. Ketika kontrol hanya bersifat parsial dan tidak terintegrasi, potensi terjadinya kesalahan prosedur, substitusi bahan, atau kontaminasi menjadi sulit dideteksi secara dini.

Di sisi lain, percepatan digitalisasi rantai pasok turut mengubah ekspektasi pemangku kepentingan. Konsumen, regulator, dan mitra bisnis kini menuntut keterlacakan (*traceability*) yang cepat, granular, dan dapat diverifikasi secara objektif. Dokumentasi manual yang terpisah-pisah dan tidak terhubung dinilai tidak lagi memadai karena rentan terhadap kesalahan, keterlambatan, dan manipulasi data.

Literatur mutakhir menunjukkan bahwa paradigma halal supply chain berkembang menuju penguatan tata kelola, integrasi manajemen risiko, serta pengukuran kinerja dan keberlanjutan yang lebih eksplisit. Pendekatan ini menempatkan integritas halal sebagai hasil dari sistem yang terkoordinasi, bukan sekadar kepatuhan administratif

pada satu titik proses. Namun demikian, penerjemahan konsep ini ke dalam praktik operasional masih menghadapi berbagai tantangan.

Dalam konteks negara berkembang, implementasi sistem halal berbasis digital seringkali terhambat oleh keterbatasan *digital readiness* pelaku usaha, khususnya usaha mikro, kecil, dan menengah. Selain itu, biaya adopsi teknologi, kurangnya standar data bersama, serta lemahnya interoperabilitas antar sistem produsen, logistik, distributor, dan lembaga sertifikasi menjadi kendala yang signifikan.

Kondisi tersebut berdampak langsung pada efektivitas jaminan halal. Kesenjangan informasi dan keterlambatan verifikasi menyebabkan deteksi penyimpangan, seperti kontaminasi silang atau pelanggaran prosedur, tidak dapat dilakukan secara *real time*. Akibatnya, respons terhadap insiden cenderung bersifat reaktif dan berujung pada tindakan *broad recall* yang meningkatkan pemborosan dan biaya operasional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan pendekatan baru yang mampu menghubungkan bukti kepatuhan halal secara sistematis dan terverifikasi di seluruh simpul rantai pasok. Pendekatan berbasis bukti (*evidence-based assurance*) yang didukung oleh sistem keterlacakan digital dan pemanfaatan teknologi cerdas menjadi relevan untuk memperkuat integritas halal secara berkelanjutan, sekaligus menjawab tuntutan transparansi dan efisiensi dalam ekosistem bisnis digital.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif berbasis analisis dokumen untuk menyusun model Halal Supply Chain yang berkelanjutan pada industri makanan dan minuman. Pendekatan ini dipilih untuk memungkinkan sintesis sistematis atas berbagai standar, regulasi, dan temuan ilmiah yang relevan dalam membangun integritas halal yang dapat diverifikasi secara menyeluruh (Fathi et al., 2016; Tieman, 2020). Analisis dilakukan menggunakan inductive qualitative content analysis (QCA) guna mengidentifikasi, mengelompokkan, dan mengintegrasikan komponen integritas halal (Halal Supply Chain Integrity/HSCI), keterlacakan berbasis peristiwa (event-based traceability dengan pendekatan EPCIS-like), serta audit halal end-to-end ke dalam satu kerangka implementasi yang operasional (Krippendorff, 2018; GS1, 2022).

Desain penelitian difokuskan pada studi kualitatif dengan strategi analisis dokumen. Unit analisis mencakup tiga aspek utama, yaitu klausul dan ketentuan pada standar halal serta sistem manajemen terkait (OIC/SMIIC, 2019), proses dan titik kendali kritis dalam rantai pasok pangan—meliputi penerimaan bahan, produksi, penyimpanan, dan distribusi—serta elemen data peristiwa (event data) yang relevan untuk mendukung keterlacakan, verifikasi status halal, dan kesiapan penarikan produk (recall) (Aung & Chang, 2014; Behnke & Janssen, 2020). Elemen data tersebut meliputi dimensi what, when, where, dan why yang memungkinkan penelusuran berbasis bukti (GS1, 2022).

Sumber data terdiri atas tiga kelompok dokumen. Kelompok pertama mencakup standar halal internasional, khususnya OIC/SMIIC 17, 18, dan 57 beserta pedoman pendukungnya (OIC/SMIIC, 2019). Kelompok kedua meliputi regulasi dan ketentuan di Indonesia terkait jaminan produk halal serta penahapan kewajiban sertifikasi yang ditetapkan oleh otoritas terkait (Undang-Undang No. 33 Tahun 2014; BPJPH, 2023). Kelompok ketiga mencakup artikel jurnal terindeks periode 2020–2025 yang membahas integritas halal rantai pasok, keterlacakan digital, audit halal, dan teknologi pendukung seperti blockchain dan Internet of Things (IoT) dalam konteks rantai pasok pangan (Kamble et al., 2020; Kshetri, 2021).

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran dokumen resmi dari penerbit standar, lembaga pemerintah, dan basis data akademik. Seluruh dokumen yang memenuhi kriteria inklusi diunduh dan disimpan dalam repositori kerja. Untuk menjaga konsistensi dan transparansi, setiap dokumen diekstraksi menggunakan lembar ekstraksi terstruktur sebagaimana direkomendasikan dalam penelitian berbasis analisis dokumen (Bowen, 2009).

Analisis data mengikuti tahapan inductive qualitative content analysis. Tahap awal dilakukan dengan pembacaan menyeluruh untuk membangun pemahaman kontekstual dan mencatat memo analitis terkait risiko kontaminasi silang dan kebutuhan verifikasi (Krippendorff, 2018). Selanjutnya, meaning units yang relevan diidentifikasi dan diberi kode awal, kemudian dikelompokkan ke dalam kategori deskriptif hingga membentuk tema tingkat tinggi yang menjelaskan model implementasi halal yang terintegrasi (Elo & Kyngäs, 2008).

Pengelolaan dokumen, proses koding, dan pemetaan kategori didukung oleh perangkat lunak computer-assisted qualitative data analysis software (CAQDAS) seperti NVivo atau ATLAS.ti untuk menjaga audit trail analitis (Woolf & Silver, 2018). Keterbatasan penelitian ini terletak pada sifatnya yang berbasis dokumen, sehingga model yang dihasilkan memerlukan pengujian empiris lanjutan melalui studi kasus atau penelitian lapangan (Yin, 2018).

### 3. Hasil dan Diskusi

#### **Pemetaan titik kerentanan integritas halal dan bukti yang dibutuhkan**

Hasil analisis kualitatif berbasis dokumen dan literatur menunjukkan bahwa integritas halal dalam rantai pasok pangan minuman menghadapi kerentanan sistemik yang berulang pada simpul-simpul proses tertentu. Sintesis terhadap standar keamanan pangan, regulasi halal, dan studi empiris mengenai keterlacakan digital mengungkap bahwa kerentanan tersebut terkonsentrasi pada empat simpul utama, yaitu pengadaan bahan baku, proses produksi (khususnya saat change-over peralatan), penyimpanan dan pengiriman, serta distribusi ritel termasuk penanganan returns. Keempat simpul ini membentuk alur kritis di mana kegagalan menjaga bukti yang konsisten berpotensi memutus verifikasi status halal secara end-to-end.

Temuan penting menunjukkan bahwa kerentanan integritas halal tidak semata-mata disebabkan oleh ketidakpatuhan terhadap prosedur formal, melainkan oleh terjadinya information discontinuity, yaitu terputusnya jejak data dan bukti antar proses. Dalam banyak kasus, proses fisik telah dilaksanakan sesuai standar, namun bukti pendukungnya tersebar, tidak terstruktur, atau tidak tertaut secara jelas dengan lot atau batch produk tertentu. Kondisi ini menyebabkan status halal sulit diverifikasi secara cepat dan objektif, terutama pada saat audit atau penarikan produk.

Pada simpul pengadaan bahan baku, literatur dan standar menekankan pentingnya bukti pemasok yang mencakup status halal bahan, validitas sertifikat, serta keterkaitan langsung antara bahan yang diterima dengan lot atau batch produksi. Kerentanan muncul ketika bukti tersebut tersimpan dalam berbagai format terpisah seperti sertifikat halal, certificate of analysis (COA), invoice, korespondensi elektronik, atau catatan manual tanpa mekanisme penautan yang konsisten. Akibatnya, proses verifikasi halal berubah dari pemeriksaan berbasis sistem menjadi pencarian dokumen yang memakan waktu dan rawan kesalahan.

Pada simpul produksi, titik kerentanan paling dominan berkaitan dengan proses pembersihan atau penyucian peralatan serta pengendalian kontaminasi silang selama pergantian produk. Analisis dokumen menunjukkan bahwa bukti yang dibutuhkan auditor tidak terbatas pada keberadaan standar operasional prosedur (SOP), melainkan pada catatan pelaksanaan aktual. Bukti tersebut meliputi waktu pelaksanaan, identitas operator, peralatan yang digunakan, hasil inspeksi, serta keterkaitan langsung dengan batch produksi yang bersangkutan. Ketidakhadiran bukti pelaksanaan yang rinci melemahkan klaim integritas halal meskipun SOP telah tersedia.

Sementara itu, pada simpul penyimpanan, pengiriman, dan distribusi ritel, kerentanan meningkat ketika bukti chain-of-custody, segregasi fisik, dan integritas kondisi penyimpanan tidak tercatat secara konsisten. Risiko menjadi semakin signifikan pada produk yang sensitif terhadap suhu atau memiliki masa simpan terbatas. Selain itu, penanganan returns, relokasi penyimpanan, dan praktik re-packaging di tingkat ritel sering kali tidak didokumentasikan dengan standar yang sama seperti proses hulu. Kondisi ini menciptakan celah verifikasi yang berpotensi merusak integritas halal produk, meskipun tidak terjadi pelanggaran fisik secara langsung.

#### **Information discontinuity sebagai akar masalah dan dampaknya pada keberlanjutan**

Temuan kedua menunjukkan bahwa information discontinuity beririsan secara langsung dengan isu keberlanjutan operasional dan lingkungan dalam rantai pasok pangan–minuman. Ketika sumber kontaminasi atau ketidaksesuaian halal tidak dapat ditelusuri secara presisi, produsen cenderung mengambil keputusan konservatif berupa broad recall untuk melindungi reputasi dan meminimalkan risiko kepatuhan. Meskipun secara manajerial dapat dipahami, pendekatan ini berdampak signifikan terhadap peningkatan pemborosan pangan, biaya logistik balik, serta emisi karbon akibat aktivitas transportasi tambahan dan pembuangan produk. Literatur mengenai keterlacakan digital secara konsisten menegaskan bahwa interoperabilitas data dan penggunaan standar pertukaran informasi merupakan faktor kunci untuk mempercepat respons insiden sekaligus membatasi jumlah produk yang harus ditarik dari pasar.

Dalam kerangka analisis dokumen, hubungan sebab–akibat yang paling konsisten dapat dirumuskan sebagai berikut: rendahnya keterhubungan bukti antar simpul proses menyebabkan rendahnya presisi dalam penetapan lot terdampak, yang pada akhirnya mendorong keputusan penarikan produk secara melebar. Temuan ini mengindikasikan bahwa fokus perbaikan tahap awal seharusnya tidak diarahkan pada penambahan teknologi secara langsung, melainkan pada penyelarasan bukti minimum yang wajib tersedia di setiap simpul proses. Dengan tersedianya bukti yang terstruktur dan saling terhubung, keputusan penarikan dapat dibuat secara lebih terukur dan proporsional. Hal ini sekaligus menegaskan bahwa kepatuhan halal dan keberlanjutan operasional tidak dapat

dipisahkan, karena keduanya memiliki ketergantungan yang sama terhadap kualitas bukti, keterlacakan, dan integritas data end-to-end.

### **Arsitektur digital traceability sebagai pengungkit bukti kepatuhan**

Temuan ketiga memetakan arsitektur digital traceability sebagai enabler utama untuk menutup kesenjangan bukti kepatuhan halal sepanjang rantai pasok. Analisis dokumen menunjukkan bahwa arsitektur keterlacakan berbasis peristiwa (event-based, EPCIS-like) memungkinkan pencatatan sistematis mengenai apa yang terjadi, kapan, di mana, dan oleh siapa suatu aktivitas dilakukan. Struktur ini memungkinkan pembangunan genealogy lot melalui mekanisme trace-back dan trace-forward secara near real-time, tanpa ketergantungan pada konsolidasi manual yang lambat dan rentan kesalahan. Dengan demikian, keterlacakan tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring operasional, tetapi sebagai fondasi penyediaan bukti kepatuhan yang dapat diverifikasi.

Temuan dari literatur studi kasus mengenai penerapan blockchain pada rantai pasok halal memperkuat peran transparansi dan tamper-resistance dalam meningkatkan integritas data dan kepercayaan lintas aktor. Namun demikian, dokumen juga menegaskan bahwa efektivitas teknologi tersebut sangat bergantung pada kesiapan integrasi proses, kualitas data hulu, serta dukungan kebijakan dan regulasi yang memadai. Tanpa prasyarat tersebut, blockchain berisiko menjadi lapisan teknologi tambahan yang tidak menyelesaikan akar permasalahan information discontinuity.

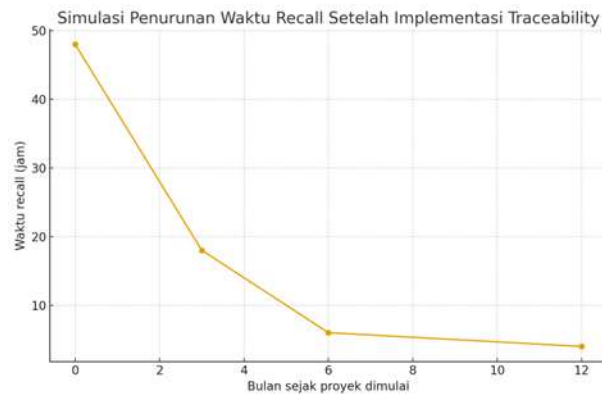
Secara praktis, hasil sintesis dokumen mengarahkan pada strategi implementasi bertahap yang realistis dan berorientasi nilai. Tahap pertama berfokus pada standardisasi identitas dan penautan dokumen ke lot atau batch, misalnya melalui penggunaan QR code atau RFID yang terhubung dengan repositori peristiwa. Tahap kedua menekankan penegakan validasi data-event, mencakup pengendalian duplikasi, konsistensi waktu antar peristiwa, serta kelengkapan referensi dokumen (doc\_ref) yang relevan. Tahap ketiga bersifat opsional dan kontekstual, yaitu peningkatan ke mekanisme distributed ledger yang lebih kuat ketika kebutuhan kepercayaan lintas aktor dan kompleksitas jaringan meningkat.

Dengan pendekatan bertahap tersebut, sistem keterlacakan yang dibangun tidak hanya menghasilkan dashboard operasional, tetapi juga produk bukti (evidence-ready outputs) yang siap diaudit. Bukti ini mencakup keterkaitan yang jelas antara proses fisik, data peristiwa, dan dokumen kepatuhan halal. Temuan ini menegaskan bahwa nilai utama arsitektur digital traceability terletak pada kemampuannya mentransformasikan data operasional menjadi bukti kepatuhan yang terstruktur, transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan dalam konteks audit halal dan keberlanjutan rantai pasok.

### **Temuan khusus pada cold chain: pengawasan real-time dan pengendalian anomali**

Temuan keempat secara khusus menyoroti peran kritis cold chain dalam menjaga integritas halal, keamanan pangan, dan keberlanjutan operasional pada rantai pasok pangan–minuman. Literatur menunjukkan bahwa penerapan real-time monitoring yang dikombinasikan dengan sistem deteksi anomali mampu menurunkan risiko kegagalan cold chain sekaligus mengurangi false alert melalui mekanisme trip detection dan thresholding yang disesuaikan dengan konteks operasional. Temuan ini memiliki relevansi tinggi bagi komoditas halal yang sensitif terhadap suhu, seperti daging, produk susu, dan ready-to-eat food, karena deviasi suhu tidak hanya berimplikasi pada risiko keamanan pangan yang memicu penarikan produk, tetapi juga meningkatkan potensi food waste yang berdampak negatif terhadap kinerja keberlanjutan.

Sintesis dokumen menegaskan bahwa bukti cold chain yang paling bernilai secara operasional bukan semata-mata berupa deret angka suhu, melainkan informasi kontekstual yang menyertainya. Bukti yang dapat ditindaklanjuti mencakup kapan perjalanan dimulai, durasi berhenti, titik serah terima antar pelaku, serta keterkaitan langsung antara deviasi suhu dan batch atau lot yang diangkut. Tanpa konteks tersebut, deviasi kecil berpotensi ditafsirkan sebagai insiden besar dan mendorong keputusan broad recall. Oleh karena itu, event-based traceability yang menautkan data sensor ke entitas pengiriman dan lot produk diposisikan sebagai prasyarat untuk penilaian risiko yang presisi dan proporsional.



Gambar 1. Simulasi penurunan waktu recall setelah implementasi end-to-end traceability.

Nilai praktis dari integrasi keterlacakan end-to-end diilustrasikan melalui Gambar 1 yang mensimulasikan penurunan waktu recall seiring dengan peningkatan kualitas dan keterhubungan data. Grafik tersebut menunjukkan penurunan waktu respons dari 48 jam pada kondisi awal menjadi 18 jam pada bulan ketiga, 6 jam pada bulan keenam, dan 4 jam pada bulan ke-12. Meskipun bersifat simulatif dan berbasis rancangan sistem, ilustrasi ini menegaskan nilai bisnis dari standardisasi jejak data, yaitu percepatan containment insiden dan kemampuan melakukan targeted recall tanpa memperluas penarikan produk secara tidak perlu. Dengan demikian, peningkatan disiplin pencatatan dan kualitas data diposisikan sebagai pengungkit kinerja yang realistis dan bertahap.

Tabel 1. Indikator kunci Halal–Sustainability Digital S corecard (HSDS) berbasis temuan dokumen.

Dimensi	Indikator operasional	Sumber bukti/data	Enabler AI/digital
Integritas halal & kepatuhan	Kejadian deviasi Halal Critical Point (HCP) per 10.000 batch; waktu penutupan CAPA	Log audit internal, bukti sertifikasi, event log produksi	Audit trail berbasis blockchain; analitik risiko berbasis aturan/ML
Traceability & respons insiden	Lead time pelacakan hulu–hilir; ketepatan identifikasi lot terdampak	Event data (RFID/QR), EPCIS-like event repository, catatan distribusi	Pencocokan otomatis; suggestion berbasis graph
Keamanan pangan & cold chain	Persentase pelanggaran ambang suhu; jumlah false alert, downtime pendingin	Sensor suhu/kelembapan, data perjalanan, laporan gudang	IoT data Deteksi anomali real-time dan trip detection
Keberlanjutan operasional	Rasio broad recall vs targeted recall, estimasi waste dan emisi akibat penarikan	Data penarikan, data inventory, data transport	Optimisasi rute/penyaluran ulang, simulasi skenario penarikan

Selanjutnya, Tabel 1 merangkum indikator kunci dalam Halal–Sustainability Digital Scorecard (HSDS) yang disusun berdasarkan temuan dokumen. Scorecard ini menunjukkan bahwa integritas halal, keterlacakan, keamanan pangan, dan keberlanjutan operasional saling terhubung melalui ketergantungan pada bukti digital dan analitik. Indikator seperti kejadian deviasi Halal Critical Point, lead time pelacakan, persentase pelanggaran suhu, serta rasio broad recall dibanding targeted recall menegaskan bahwa kinerja halal dan keberlanjutan berbagi fondasi data yang sama. Peran teknologi digital dan AI diposisikan sebagai enabler untuk meningkatkan presisi analisis risiko, bukan sebagai pengganti pengendalian proses.

Akhirnya, Tabel 2 memformalkan temuan ini ke dalam matriks bukti minimum per simpul proses untuk menjaga integritas halal secara end-to-end. Matriks tersebut menunjukkan bahwa setiap simpul—mulai dari pengadaan, produksi, penyimpanan dan transportasi, hingga ritel dan returns—memiliki kebutuhan bukti spesifik yang harus tertaut langsung dengan lot atau batch. Ketika bukti minimum ini tidak tersedia, risiko yang muncul bukan hanya

ketidakpatuhan halal, tetapi juga lambatnya respons insiden dan memburuknya kinerja keberlanjutan. Dengan demikian, temuan keempat menegaskan bahwa penguatan cold chain berbasis keterlacakan peristiwa dan bukti terstruktur merupakan titik ungu strategis untuk menyelaraskan integritas halal, keamanan pangan, dan keberlanjutan rantai pasok.

## Diskusi

### Menjawab pertanyaan penelitian melalui pola hubungan yang ditunjukkan hasil

Integritas halal sebagai *credence attribute*, yaitu atribut mutu yang tidak dapat diverifikasi hanya melalui inspeksi produk akhir, melainkan memerlukan bukti proses yang menyertainya. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menegaskan bahwa status halal bersifat tidak teramati (*unobservable*) oleh konsumen maupun auditor tanpa dukungan sistem bukti yang memadai (Tieman, 2020; Fathi et al., 2016). Dengan demikian, produk fisik dan produk bukti harus berjalan secara simultan: integritas halal tidak cukup dinyatakan melalui label atau sertifikat akhir, tetapi harus ditopang oleh bukti proses produksi, bukti *chain-of-custody*, serta dokumentasi yang tertaut secara eksplisit dengan lot atau batch. Pola ini menjelaskan mengapa desain sistem dalam penelitian ini mendahulukan penautan bukti minimum per simpul proses sebelum mengejar adopsi teknologi digital yang lebih kompleks.

Hubungan kausal yang konsisten dalam hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas bukti menjadi penentu utama efektivitas keterlacakan dan respons insiden. Semakin lengkap, terstruktur, dan interoperabel bukti yang tersedia, semakin tinggi presisi identifikasi lot terdampak ketika terjadi ketidaksesuaian halal atau insiden keamanan pangan. Temuan ini memperkuat hasil studi Aung dan Chang (2014) serta Behnke dan Janssen (2020) yang menyatakan bahwa kegagalan sistem keterlacakan umumnya bersumber dari fragmentasi data dan lemahnya penautan antar proses, bukan dari ketiadaan teknologi. Dalam konteks halal, fragmentasi tersebut berdampak lebih serius karena memperlemah kemampuan auditor untuk memverifikasi status halal secara end-to-end.

Dalam perspektif respons insiden, penelitian ini menunjukkan bahwa rendahnya presisi identifikasi lot secara langsung mendorong kecenderungan *broad recall*. Pola hubungan yang teridentifikasi adalah: keterhubungan bukti yang rendah menyebabkan ketidakpastian ruang lingkup dampak, yang kemudian direspons dengan penarikan produk secara melebar sebagai strategi mitigasi risiko reputasi. Temuan ini konsisten dengan literatur *digital traceability* yang menunjukkan bahwa interoperabilitas data dan standar pertukaran informasi lintas aktor merupakan faktor kunci dalam menekan kerugian akibat *recall* (Kamble et al., 2020; Kshetri, 2021). Dengan kata lain, keberhasilan *targeted recall* tidak ditentukan oleh kecepatan semata, tetapi oleh presisi berbasis bukti.

Implikasi penting dari temuan ini adalah bahwa nilai bisnis dan keberlanjutan dari sistem keterlacakan tidak muncul dari satu aplikasi atau platform tunggal, melainkan dari kemampuan data untuk bergerak lintas aktor dan tetap dapat diaudit. Literatur perbandingan sistem keterlacakan digital menegaskan bahwa sistem yang bersifat tertutup (*siloed*) cenderung gagal memberikan nilai strategis, meskipun menggunakan teknologi canggih [17]. Hal ini memperkuat argumen bahwa integritas halal dan keberlanjutan operasional berbagi ketergantungan yang sama terhadap kualitas bukti dan keselarasan standar data di tingkat ekosistem.

Secara konseptual, temuan ini memperluas diskursus halal supply chain dengan menggeser fokus dari kepatuhan simbolik menuju kepatuhan berbasis bukti. Integritas halal tidak lagi dipahami sebagai status statis, melainkan sebagai hasil dari sistem dinamis yang menghubungkan proses fisik, data peristiwa, dan mekanisme audit. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa upaya penguatan halal supply chain yang berkelanjutan seharusnya dimulai dari perancangan arsitektur bukti yang konsisten dan interoperabel, sebelum mengadopsi teknologi lanjutan seperti *blockchain* atau analitik berbasis AI.

### Peran blockchain/ledger ialah penguatan kepercayaan, bukan pengganti tata kelola proses

Diskusi berikutnya menempatkan peran *blockchain* atau *distributed ledger* sebagai mekanisme penguatan kepercayaan (*trust-enhancing mechanism*), bukan sebagai pengganti tata kelola proses dan kualitas bukti. Studi kerangka *blockchain* untuk rantai pasok halal secara konsisten menunjukkan bahwa karakteristik *immutability* dan transparansi berpotensi mengurangi asimetri informasi serta memperkuat kepercayaan antar pemangku kepentingan. Namun, manfaat tersebut hanya terealisasi apabila standar operasional prosedur, tata kelola data, dan pengaturan akses lintas aktor telah diselaraskan sejak awal [5]. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian ini yang menempatkan kualitas bukti dan keterhubungan data sebagai prasyarat, bukan konsekuensi, dari adopsi teknologi ledger.

Dalam konteks Indonesia, literatur juga menekankan pentingnya desain implementasi yang realistis dan inklusif, khususnya bagi UMKM sebagai pelaku dominan dalam rantai pasok pangan halal. Studi terdahulu menunjukkan bahwa adopsi teknologi lanjutan akan terhambat apabila tidak interoperabel dengan sistem yang telah digunakan, membutuhkan beban input data yang tinggi, atau meningkatkan biaya kepatuhan secara signifikan [18]. Hasil penelitian ini memperkuat argumen tersebut dengan menunjukkan bahwa masalah utama yang dihadapi pelaku usaha bukan ketiadaan teknologi, melainkan fragmentasi bukti dan lemahnya penautan data antar proses.

Pola hubungan yang ditunjukkan hasil sintesis adalah bahwa peningkatan tingkat kepercayaan lintas organisasi berkorelasi dengan meningkatnya kebutuhan terhadap mekanisme verifikasi yang tahan manipulasi. Namun demikian, kebutuhan tersebut muncul pada tahap tertentu dari kematangan sistem, bukan pada fase awal. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mengarahkan pada strategi implementasi bertahap yang lebih operasional, di mana repositori peristiwa (*event repository*) dan penautan bukti minimum per lot menjadi fondasi awal sistem keterlacakan. Ledger kemudian digunakan secara selektif ketika kompleksitas jaringan meningkat, misalnya pada pemasok multipihak, jaringan distribusi yang panjang, atau pasar ekspor yang mensyaratkan *audit trail* yang ketat.

Pendekatan bertahap ini juga menjelaskan mengapa strategi *blockchain-first* sering kali gagal memberikan nilai tambah yang berkelanjutan. Ketika proses dasar belum matang dan kualitas data belum terjamin, penerapan ledger justru menghasilkan sistem yang sulit digunakan, meningkatkan beban operasional, dan menimbulkan resistensi pengguna. Sebaliknya, ketika ledger ditempatkan sebagai lapisan penguatan kepercayaan di atas tata kelola proses dan bukti yang telah mapan, teknologi tersebut berfungsi sebagai akselerator nilai, bukan sumber kompleksitas baru.

Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan kontribusi penelitian terhadap literatur halal supply chain dan digital traceability, yaitu memperjelas posisi *blockchain* sebagai *means*, bukan *end*. Integritas halal dan keberlanjutan operasional dicapai melalui tata kelola proses dan bukti yang kuat, sementara teknologi ledger berperan untuk memperkuat kepercayaan, meningkatkan akuntabilitas, dan mendukung audit lintas organisasi pada tahap kematangan sistem yang tepat.

### **AI sebagai lapisan decision support untuk kualitas data dan prioritas Tindakan**

Dalam lima tahun terakhir, literatur sistem informasi dan manajemen rantai pasok semakin menempatkan kecerdasan buatan (AI) sebagai *capability enabler* untuk meningkatkan kualitas data dan kapasitas pengambilan keputusan dalam lingkungan operasional yang kompleks. Dari perspektif data-centric AI dan information quality theory kontemporer, nilai AI muncul ketika teknologi ini digunakan untuk meningkatkan akurasi, konsistensi, dan kelengkapan data operasional, bukan menggantikan proses tata kelola yang ada (Batini et al., 2021; Sculley et al., 2021). Sejalan dengan temuan penelitian ini, studi traceability berbasis RFID/IoT dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa pembelajaran mesin efektif digunakan untuk mereduksi noise sensor, menyelaraskan event stream, dan mengidentifikasi pola anomali pergerakan barang, sehingga data traceability dapat diandalkan sebagai bukti kepatuhan [20].

Pada konteks cold chain, teori real-time decision intelligence yang berkembang dalam literatur terkini menjelaskan bahwa AI berfungsi optimal sebagai sistem pendukung keputusan yang mempercepat respons terhadap peristiwa kritis, bukan sebagai pengambil keputusan otonom (Sharma et al., 2022; Davenport & Mittal, 2023). Studi-studi mutakhir menunjukkan bahwa deteksi anomali suhu berbasis AI mampu menentukan secara kontekstual kapan peringatan perlu dikeluarkan, di mana titik kegagalan terjadi, dan aktor mana yang harus merespons, sehingga mengurangi false alert dan pemborosan akibat kerusakan kualitas produk selama distribusi [19]. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa nilai AI dalam cold chain terletak pada peningkatan presisi respons insiden dan penguatan kinerja keberlanjutan.

Namun demikian, literatur tata kelola AI dalam lima tahun terakhir secara tegas menekankan batasan peran AI pada domain kepatuhan dan risiko tinggi. Kerangka human-centered AI dan responsible AI governance menegaskan bahwa keputusan yang berdampak pada kepatuhan regulatif, keamanan pangan, dan legitimasi halal harus tetap berbasis bukti yang dapat diaudit dan melibatkan human-in-the-loop (Floridi et al., 2021; OECD, 2022). Dalam konteks halal supply chain, temuan ini memperkuat generalisasi bahwa AI sebaiknya diposisikan sebagai pendukung keputusan—membantu triase, prioritas risiko, dan percepatan investigasi—bukan sebagai pengganti proses verifikasi halal yang mensyaratkan bukti dokumenter dan jejak audit yang sah.

Implikasi teoretis tersebut tercermin secara langsung dalam perancangan Halal–Sustainability Digital Scorecard (HSDS) pada Tabel 1. Pendekatan yang memasangkan metrik kinerja dengan sumber bukti eksplisit sejalan dengan teori *auditability-by-design* dan *explainable AI* yang berkembang dalam literatur mutakhir (Raji et al., 2020; Wieringa, 2023). Dengan desain ini, setiap rekomendasi atau peringatan yang dihasilkan AI dapat ditelusuri kembali ke data peristiwa dan dokumen pendukung yang sah, sehingga menjaga akuntabilitas keputusan dalam audit halal dan evaluasi keberlanjutan.

Secara keseluruhan, dengan merujuk pada teori dan kajian lima tahun terakhir, penelitian ini menegaskan bahwa peran strategis AI dalam halal supply chain bukan sebagai otoritas verifikasi, melainkan sebagai akselerator kualitas data dan kecerdasan keputusan. Integritas halal yang berkelanjutan dicapai melalui kombinasi tata kelola bukti yang kuat, keterlacakan end-to-end, dan pemanfaatan AI yang bertanggung jawab. Posisi ini memperkaya literatur kontemporer dengan menunjukkan bagaimana AI dapat diintegrasikan secara proporsional dalam sistem kepatuhan berbasis bukti, tanpa mengorbankan prinsip auditabilitas dan legitimasi halal.

### **Hasil yang meragukan, batasan, dan implikasi riset lanjutan**

Secara objektif, terdapat dua area hasil yang perlu dibaca secara hati-hati agar tidak menimbulkan over-generalisasi. Pertama, tren penurunan waktu recall yang ditampilkan pada Gambar 1 bersifat simulatif dan ilustratif, merepresentasikan potensi kinerja dari rancangan sistem, bukan hasil implementasi lapangan. Literatur *traceability* mutakhir pada komoditas tropis dan rantai pasok pangan berkembang menegaskan bahwa performa sistem sangat dipengaruhi oleh kesiapan data di hulu, disiplin pencatatan aktor, serta tata kelola lintas organisasi. Variasi pada faktor-faktor tersebut terbukti menghasilkan perbedaan kinerja yang signifikan antar konteks implementasi, bahkan ketika arsitektur teknologinya serupa. Dengan demikian, hasil simulasi ini perlu dipahami sebagai *proof of concept* desain, bukan proyeksi kinerja operasional yang bersifat universal.

Kedua, rekomendasi adopsi teknologi digital lanjutan seperti ledger terdistribusi memiliki implikasi biaya, kapabilitas, dan kesiapan organisasi yang tidak merata. Teori adopsi sistem digital terkini menekankan adanya risiko *capability benefit mismatch*, yaitu kondisi ketika beban input data dan kompleksitas operasional meningkat, sementara manfaat interoperabilitas dan kepercayaan lintas aktor belum tercapai secara nyata. Risiko ini menjadi lebih relevan pada konteks rantai pasok yang didominasi UMKM, di mana keterbatasan sumber daya dapat menyebabkan teknologi justru memperlemah kepatuhan apabila tidak didahului oleh fondasi proses dan kualitas data yang memadai.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, implikasi utama untuk riset lanjutan adalah kebutuhan studi lapangan yang menguji Halal–Sustainability Digital Scorecard (HSDS) pada rantai pasok nyata. Studi tersebut perlu mengukur indikator kinerja yang lebih operasional dan berdampak langsung, seperti pergeseran dari *broad recall* ke *targeted recall*, perubahan *Corrective and Preventive Action (CAPA)* aging, serta dampaknya terhadap pemborosan pangan dan efisiensi respons insiden. Pendekatan ini sejalan dengan literatur evaluasi sistem kepatuhan digital terkini yang menekankan pengukuran *outcome*, bukan hanya kelengkapan kontrol.

Secara keseluruhan, generalisasi utama yang dapat ditarik dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut. Pertama, integrasi bukti kepatuhan halal dan keberlanjutan paling efektif dibangun di atas *traceability* berbasis-event yang interoperable dan dapat diaudit. Kedua, AI menunjukkan nilai tertingginya ketika diposisikan sebagai lapisan peningkatan kualitas data dan *decision support*, bukan sebagai pengganti verifikasi. Ketiga, ukuran keberhasilan sistem tidak cukup dinilai dari kepatuhan formal semata, tetapi harus mencakup presisi penarikan produk, pengurangan waste, dan peningkatan kecepatan serta ketepatan respons insiden. Dengan kerangka ini, hasil penelitian memberikan kontribusi yang realistis dan aplikatif bagi pengembangan sistem halal digital yang berkelanjutan dan dapat diadopsi secara luas.

## **4. Kesimpulan**

Penelitian ini menyimpulkan bahwa integritas halal dan keberlanjutan dalam rantai pasok tidak dapat dipastikan hanya melalui inspeksi produk akhir, melainkan harus dipahami sebagai *credence attribute* yang memerlukan bukti proses, bukti *chain-of-custody*, dan bukti dokumenter yang tertaut secara konsisten pada level lot atau batch. Temuan sintesis menunjukkan bahwa event-based *traceability* yang interoperable merupakan fondasi utama untuk menutup kesenjangan bukti kepatuhan, sekaligus meningkatkan presisi respons insiden dan mengurangi kecenderungan *broad recall*. Hasil penelitian juga menegaskan bahwa nilai bisnis dan regulatif dari sistem

traceability tidak terletak pada adopsi satu teknologi tertentu, melainkan pada kelengkapan, kualitas, dan keterhubungan bukti lintas aktor. Dalam kerangka ini, repositori event dan penautan bukti minimum per simpul proses menjadi prasyarat sebelum peningkatan ke mekanisme kepercayaan yang lebih kuat, seperti ledger terdistribusi. Blockchain berperan sebagai penguat kepercayaan dan auditabilitas, bukan sebagai pengganti tata kelola proses dan disiplin pencatatan. Dari sisi kecerdasan buatan, penelitian ini menemukan bahwa AI paling bernilai ketika diposisikan sebagai lapisan peningkatan kualitas data dan decision support, khususnya dalam konteks cold chain melalui deteksi anomali real-time dan pengurangan false alert. Namun, tindakan korektif dalam sistem halal tetap harus berbasis bukti yang dapat diaudit, sehingga AI tidak menggantikan fungsi verifikasi, melainkan mempercepat triase dan investigasi. Secara keseluruhan, penelitian ini menggeneralisasi tiga implikasi utama: (i) integrasi kepatuhan halal dan keberlanjutan harus dibangun di atas traceability berbasis-event yang standar dan interoperable, (ii) AI berfungsi optimal sebagai pendukung kualitas data dan pengambilan keputusan, dan (iii) keberhasilan sistem perlu diukur tidak hanya dari kepatuhan formal, tetapi juga dari presisi penarikan produk, pengurangan pemborosan, dan peningkatan respons insiden. Temuan ini memberikan dasar konseptual dan operasional bagi pengembangan sistem halal digital yang realistis, dapat diaudit, dan berkelanjutan.

## Referensi

1. Alamsyah, N. Hakim, and R. Hendayani, "Blockchain-Based Traceability System to Support the Indonesian Halal Supply Chain Ecosystem," *Economics*, vol. 10, no. 6, p. 134, 2022, doi: 10.3390/economics10060134.
2. D. Ganesh and P. Kalpana, "Future of artificial intelligence and its influence on supply chain risk management -- A systematic review," *Comput. & Ind. Eng.*, vol. 169, p. 108206, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108206.
3. E. Cader and others, "Improving tropical fruit traceability: review of requirements for enhancing traceability systems," *Food Control*, vol. 176, p. 111403, 2025, doi: 10.1016/j.foodcont.2025.111403.
4. M. Khedr and S. R. S. Sheeja Rani, "Enhancing supply chain management with deep learning and machine learning techniques: A review," *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 10, no. 4, p. 100379, 2024, doi: 10.1016/j.joitmc.2024.100379.
5. Rejeb, K. Rejeb, S. Zailani, H. Treiblmaier, and K. J. Hand, "Integrating the Internet of Things in the halal food supply chain: A systematic literature review and research agenda," *Internet of Things*, vol. 13, p. 100361, 2021, doi: 10.1016/j.iot.2021.100361.
6. Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, 39, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>
7. Badan Penyelenggara Jaminan Produk Halal. (2023). Peraturan dan kebijakan penahapan kewajiban sertifikasi halal. BPJPH. Batini, C., Cappiello, C., Francalanci, C., & Maurino, A. (2021). Data quality: Concepts, methodologies and techniques (updated perspective). *ACM Computing Surveys*, 54(6), 1–37. <https://doi.org/10.1145/3450505>
8. Badia-Melis, R., McCarthy, U., & Ruiz-Garcia, L. (2020). Data-driven cold chain management: Anomaly detection and decision support for perishable food logistics. *Food Control*, 110, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107016>
9. Behnke, K., & Janssen, M. F. W. H. A. (2020). Boundary conditions for traceability in food supply chains using blockchain technology. *International Journal of Information Management*, 52, 101969. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.025>
10. Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
11. N. Lyhne, J. Thisted, and M. Bjerrum, "Qualitative content analysis--framing the analytical process of inductive content analysis to develop a sound study design," *Qual. & Quant.*, vol. 59, pp. 5329–5349, 2025, doi: 10.1007/s11135-025-02220-9.
12. O'Connor and H. Joffe, "Intercoder reliability in qualitative research: debates and practical guidelines," *Int. J. Qual. Methods*, vol. 19, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1177/1609406919899220.
13. A. Kurniawati and A. Cakravastia, "A review of halal supply chain research: Sustainability and operations research perspective," *Clean. Logist. Supply Chain*, vol. 6, p. 100096, 2023, doi: 10.1016/j.clsen.2023.100096.
14. P. Alamsyah, T. Aryanto, E. S. Ramdhani, and S. W. Sakti, "Can halal blockchain technology improve halal supply chain management? Evidence from Indonesia," *Economics*, vol. 10, no. 6, p. 134, 2022, doi: 10.3390/economics10060134.
15. Davenport, T. H., & Mittal, N. (2023). Decision intelligence: Turning data into better decisions. *MIT Sloan Management Review*, 64(3), 1–9.
16. Elo, S., & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of Advanced Nursing*, 62(1), 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x>
17. Lestari, M. Mawardi, M. Yola, Y. Muda, and A. B. Abdul Hamid, "A model for assessment of Halal good manufacturing practice in meat industry," *Prod. & Manuf. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 666–695, 2022, doi: 10.1080/21693277.2022.2117742.
18. Fathi, E., Zailani, S., Iranmanesh, M., & Kanapathy, K. (2016). Drivers of consumers' willingness to pay for halal logistics. *British Food Journal*, 118(2), 464–479. <https://doi.org/10.1108/BFJ-06-2015-0212>
19. Floridi, L., Cows, J., Beltrametti, M., et al. (2021). AI4People—An ethical framework for a good AI society. *Minds and Machines*, 31, 1–30. <https://doi.org/10.1007/s11023-021-09539-8>
20. Alfian et al., "Improving efficiency of {RFID}-based traceability system for perishable food by utilizing {IoT} sensors and machine learning model," *Food Control*, vol. 110, p. 107016, 2020, doi: 10.1016/j.foodcont.2019.107016.
21. Culot, M. Podrecca, and G. Nassimbeni, "Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review of empirical studies and research directions," *Comput. Ind.*, vol. 162, p. 104132, 2024, doi: 10.1016/j.compind.2024.104132.
22. GS1. (2022). GS1 EPCIS and Core Business Vocabulary (CBV) Standard (Release 2.0). GS1 Global Office.
23. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1649144>
24. Surjandari, N. R. Maulina, and C. Bahri, "Efficiency analysis of halal certification bodies in Indonesia: A hybrid DEA and machine learning approach," *Qual. & Quant.*, vol. 59, pp. 1201–1226, 2025, doi: 10.1007/s11135-024-02006-5.
25. Gillespie and others, "Real-Time Anomaly Detection in Cold Chain Transportation Using {IoT} Technology," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2255, 2023, doi: 10.3390/su15032255.
26. Li, J. Y. Lee, and A. Gharehgozli, "Blockchain in food supply chains: A literature review and synthesis analysis of platforms, benefits and challenges," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, no. 11, pp. 3527–3546, 2023, doi: 10.1080/00207543.2021.1970849.

27. Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Arha, H. (2020). Understanding the blockchain technology adoption in supply chains. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2009–2033.
28. Krippendorff, K. (2018). *Content analysis: An introduction to its methodology* (4th ed.). SAGE Publications.
29. Kshetri, N. (2021). Blockchain and supply chain management: Emerging uses, potential and challenges. *International Journal of Information Management*, 60, 102376. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102376>
30. E. Kiger and L. Varpio, “Thematic analysis of qualitative data: {AMEE} Guide No. 131,” *Med. Teach.*, vol. 42, no. 8, pp. 846–854, 2020, doi: 10.1080/0142159X.2020.1755030.
31. H. Ali, L. Chung, A. Kumar, S. Zailani, and K. H. Tan, “A sustainable blockchain framework for the halal food supply chain: Lessons from Malaysia,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 170, p. 120870, 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120870.
32. Pourmader, H. Ghaderi, A. Hassanzadegan, and B. Fahimnia, “Artificial intelligence applications in supply chain management,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 241, p. 108250, 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108250.
33. OECD. (2022). OECD framework for the classification of AI systems. Organisation for Economic Co-operation and Development.
34. OIC/SMIIC. (2019). OIC/SMIIC 17, 18, and 57: Halal standards and conformity assessment. Standards and Metrology Institute for Islamic Countries.
35. R. N. Boute and M. Udenio, “AI in Logistics and Supply Chain Management,” in *Global Logistics and Supply Chain Strategies for the 2020s*, R. Merkert and K. Hoberg, Eds. Cham: Springer, 2023, pp. 49–65.
36. Raji, I. D., Smart, A., White, R. N., et al. (2020). Closing the AI accountability gap: Defining an end-to-end framework for internal algorithmic auditing. *Proceedings of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 33–44. <https://doi.org/10.1145/3351095.3372873>
37. S. Charlebois, N. Latif, I. Ilahi, B. Sarker, J. Music, and J. Vezeau, “Digital Traceability in Agri-Food Supply Chains: A Comparative Analysis of {OECD} Member Countries,” *Foods*, vol. 13, no. 7, p. 1075, 2024, doi: 10.3390/foods13071075.
38. Sculley, D., Holt, G., Golovin, D., et al. (2021). Hidden technical debt in machine learning systems. *Communications of the ACM*, 64(6), 45–52. <https://doi.org/10.1145/3448250>
39. Sharma, R., Mithas, S., & Kankanhalli, A. (2022). Transforming decision-making processes with decision intelligence. *MIS Quarterly*, 46(2), 1171–1194. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2022/16031>
40. T. Moysiadis et al., “AgriFood supply chain traceability: data sharing in a farm-to-fork case,” *Benchmarking*, vol. 30, no. 9, pp. 3090–3123, 2023, doi: 10.1108/BIJ-01-2022-0006.
41. Tieman, M. (2020). Halal supply chain management: An update. *British Food Journal*, 122(5), 1591–1605. <https://doi.org/10.1108/BJFJ-03-2019-0187>
42. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2014 tentang Jaminan Produk Halal.
43. Wieringa, M. (2023). What to account for when accounting for algorithms: A systematic literature review on algorithmic accountability. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 7(CSCW1), 1–33. <https://doi.org/10.1145/3579493>
44. Woolf, N. H., & Silver, C. (2018). *Qualitative analysis using ATLAS.ti: The five-level QDA method*. Routledge.
45. Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.