BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka Penelusuran Literatur

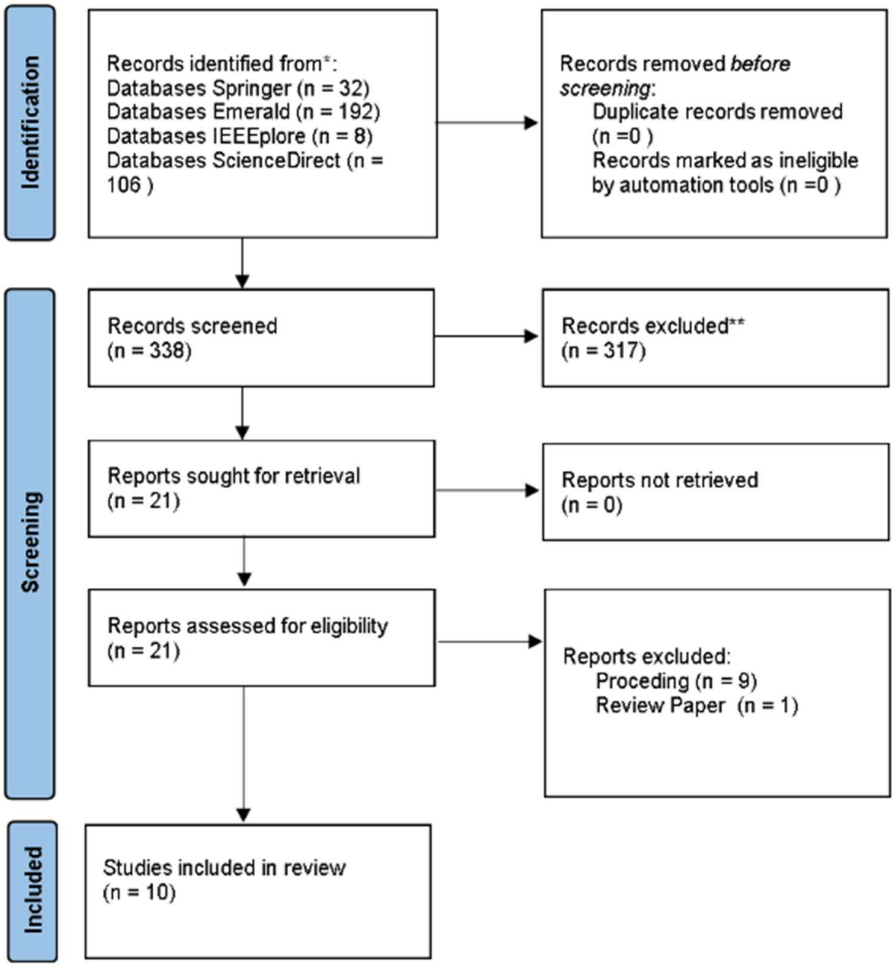
Literatur yang relevan untuk mendukung kajian sistematis terkait topik penelitian, dilakukan proses penelusuran artikel ilmiah menggunakan pendekatan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Strategi pencarian diarahkan pada empat basis data jurnal, yaitu *ScienceDirect, Emerald Insight, IEEE Xplore*, dan *Springer Nature Link*. Keempat basis data ini dipilih karena memiliki reputasi internasional dan menyediakan artikel peer-reviewed di bidang teknologi, sistem informasi, dan studi halal.

Penelusuran pertama dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci: "*blockchain AND (IoT OR 'Internet of Things') AND* halal", yang dirancang untuk mencakup topik-topik yang berada dalam irisan teknologi *blockchain* , penerapan IoT, dan konsep halal. Batasan waktu publikasi ditetapkan antara tahun 2019 hingga 2024 guna memastikan relevansi dan kebaruan informasi.

Tahap identifikasi awal, diperoleh total 338 artikel dari hasil pencarian seluruh database. Jumlah ini terdiri atas 106 artikel dari *ScienceDirect*, 192 artikel dari *Emerald Insight*, 8 artikel dari *IEEE Xplore*, dan 32 artikel dari *Springer Nature* Link. Seluruh artikel kemudian diimpor dan didokumentasikan untuk dianalisis lebih lanjut. Tahap berikutnya adalah proses *screening*, yaitu penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk mengevaluasi kecocokan awal terhadap kriteria inklusi. Tahapan ini, sebanyak 317 artikel dieliminasi karena tidak memenuhi keterkaitan langsung dengan topik atau berada di luar fokus sistem kajian. Hanya 21 artikel yang dinyatakan layak untuk masuk ke tahap penilaian kelayakan (*eligibility*).

Proses penilaian kelayakan dilakukan dengan membaca keseluruhan isi artikel untuk memastikan kesesuaian secara menyeluruh, baik dari segi substansi, metodologi, maupun kontribusi terhadap isu yang dikaji. Tahapan ini, dikeluarkan 11 artikel dari seleksi karena tidak memenuhi kriteria metodologis, merupakan prosiding, atau tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap kajian literatur yang dibangun. Hasil akhir dari proses seleksi dan penilaian menunjukkan bahwa

terdapat 10 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan dinyatakan layak untuk dianalisis dalam studi sistematik ini. Artikel-artikel tersebut menjadi basis utama dalam proses sintesis data dan analisis tematik yang dilakukan pada tahap selanjutnya. Proses seleksi artikel secara sistematis ini dirangkum dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pendekatan litertur PRISMA untuk *blockchain* , IoT dan Halal

Tabel 2.1 memuat kompilasi artikel-artikel ilmiah yang telah diseleksi dan dianalisis menggunakan pendekatan PRISMA. Artikel-artikel tersebut dipilih berdasarkan kesesuaian topik dengan fokus kajian terkait penerapan teknologi *blockchain* , IoT, serta integrasinya dalam sistem produk dan layanan halal. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi keterlibatan ketiga aspek tersebut dalam setiap

publikasi, sekaligus menelaah kontribusi kebaruan (*novelty*) oleh masing-masing penelitian terhadap pengembangan ekosistem halal.

Tabel 2.1. Penelitian Terkait *Blockchain*, IoT dan Halal

No	Author	*Blockchain*	IoT	Halal	Temuan
1	Tang, *Tchao, Agbemenu, Keelson, Klogo, dan Kponyo,* (2024)	v	v	x	Potensi tinggi dalam meningkatkan keamanan dan transparansi pangan, tetapi terdapat hambatan dalam skalabilitas dan regulasi.
2	Ali*, Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan,* (2021)	v	x	v	Mengidentifikasi lima tantangan utama dalam adopsi *blockchain* oleh UKM halal.
3	Purusottama, Sunitiyoso dan Simatupang, (2023)	v	x	v	Teknologi ini dapat menghasilkan nilai multidemensional tergantung pada kompleksitas sistem.
4	Ardiantono, *Ardyansyah, Sugihartanto, Al Mustofa, dan Lisdiantini,* (2024)	v	x	v	Biaya teknologi (seperti *blockchain*) adalah hambatan terbesar bagi UKM
5	Karyani, *Geraldina, Haque, dan Zahir,*. (2024)	v	x	v	Konsumen ingin transparansi, tetapi lembaga belum sepenuhnya siap
6	Vanany, Soon-Sinclair dan Rahkmawati (2024)	v	x	v	Tekanan regulator dan strategi halal adalah faktor dominan
7	Hendayani dan Fernando (2023)	v	x	v	*Blockchain* meningkatkan transparansi, yang berdampak pada daya saing
8	Ahamed, Vignesh dan Alam (2024)	v	v	v	Kombinasi teknologi dapat mengurangi kontaminasi silang
9	Susanty*, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan,* (2024)	v	x	v	Sistem menggunakan PHP dan *QR code* , meski masih manual pada validasi
10	Surjandari, Yusuf, Laoh, dan Maulida (2021)	v	x	v	Tingkat keberhasilan tinggi dan kecepatan transaksi cepat

Berbagai studi telah mengkaji potensi dan tantangan penerapan teknologi *blockchain* dan IoT dalam konteks rantai pasok makanan halal, dengan pendekatan dan fokus yang bervariasi namun saling melengkapi. Tang, Tchao, Agbemenu, Keelson, Klogo, dan Kponyo, (2024) menekankan bahwa implementasi *blockchain* dan IoT pada rantai pasok agrikultur di Afrika berpotensi besar dalam meningkatkan *traceability* dan transparansi sistem pangan, namun perlu disesuaikan dengan konteks sosial ekonomi dan infrastruktur lokal. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan yang kontekstual dalam penerapan teknologi disruptif di wilayah berkembang. Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan (2021), mengusulkan kerangka kerja berkelanjutan untuk rantai pasok makanan halal di Malaysia, dengan mengidentifikasi lima tantangan utama dalam adopsi *blockchain* oleh UKM. Studi ini memperlihatkan bahwa keberhasilan integrasi teknologi ini sangat dipengaruhi oleh regulasi dan integrasi rantai pasok, memberikan dasar yang penting untuk strategi implementasi di sektor halal.

Peneliti Purusottama, Sunitiyoso dan Simatupang (2023), memperkenalkan model tipologi inovasi nilai berbasis *blockchain* untuk industri halal di Indonesia. Model ini menggambarkan spektrum kompleksitas sistem dan intensitas inovasi nilai, memberikan panduan strategis bagi pengambil keputusan dalam mengadopsi *blockchain* secara efektif dan bermakna. Tantangan pembiayaan, Ardiantono, *Ardyansyah, Sugihartanto, Al Mustofa, dan Lisdiantini* (2024), mengidentifikasi bahwa biaya tinggi menjadi hambatan utama dalam implementasi teknologi halal, terutama di kalangan UKM. Temuan ini memperkuat pentingnya pengembangan solusi teknologi yang terjangkau dan sesuai skala, seperti yang juga dikemukakan oleh Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan (2021).

Konsep sertifikasi halal berbasis *blockchain*, Karyani, Geraldina, Haque, dan Zahir (2024), menunjukkan adanya perbedaan kesiapan antara regulator dan lembaga pemeriksa halal di Indonesia. Konsumen dan regulator pusat mendukung teknologi ini, hambatan masih ditemukan pada tingkat pelaksana teknis, menandakan perlunya pendekatan kebijakan yang terintegrasi secara vertikal. Konsep berbeda dilakukan oleh Vanany, Soon-Sinclair dan Rahkmawati (2024), dengan menggunakan pendekatan *Delphi* dan metode *best–worst* untuk

merumuskan struktur hierarkis faktor adopsi *blockchain* halal. Studi ini menekankan bahwa tekanan koersi dari pemangku kepentingan eksternal dan strategi halal perusahaan menjadi pendorong utama adopsi teknologi ini. Hendayani dan Fernando (2023) menunjukkan bahwa adopsi *blockchain* secara positif meningkatkan performa rantai pasok halal dan daya saing perusahaan. Studi ini menyusun kerangka teoretis bahwa integritas dan transparansi yang diberikan oleh *blockchain* berperan sebagai mediasi dalam meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk halal.

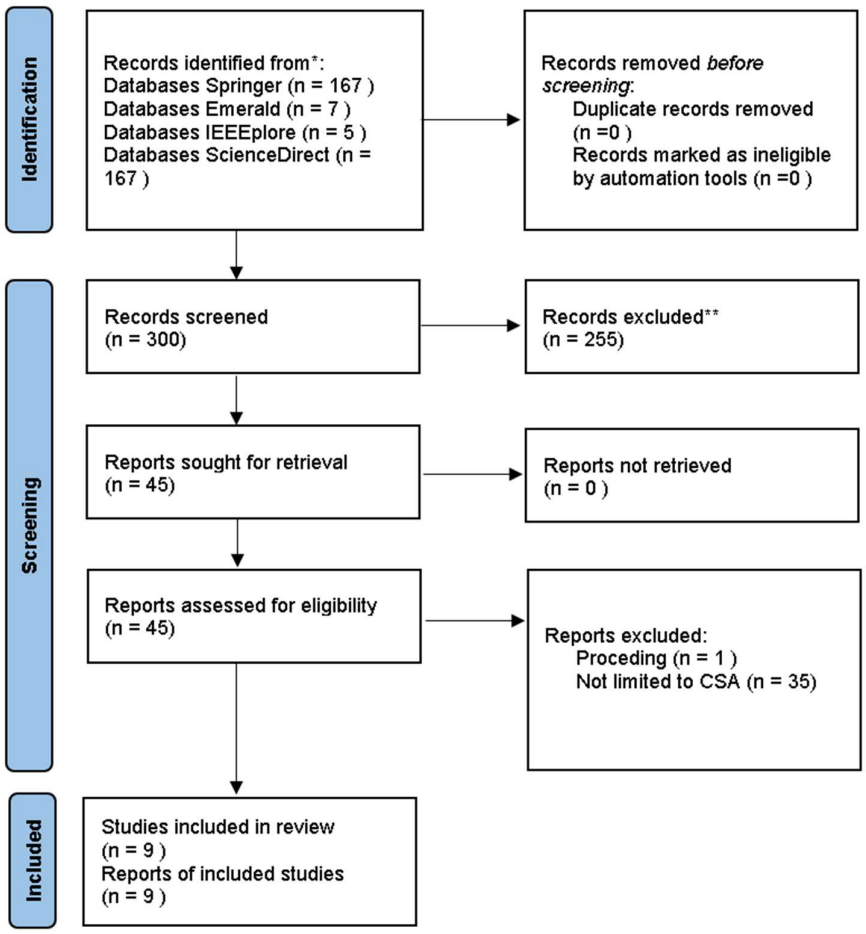
Pengembangan sistem aplikasi juga dilakukan oleh Ahamed, Vignesh, dan Alam (2024), serta Susanty, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan (2024). Ahamed, Vignesh, Alam (2024) menggunakan kombinasi *blockchain* , RFID, dan *Quick Response* (*QR) code* untuk pelacakan halal dari hulu ke hilir, sedangkan Susanty, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan (2024) merancang sistem *web-based* halal *traceability* dengan pendekatan metode SDLC yang berbasis PHP. Kedua studi ini menekankan aspek praktikalitas dan kepercayaan konsumen dalam sistem informasi halal. Surjandari, Yusuf, Laoh, dan Maulida (2021), merancang jaringan *permissioned blockchain* menggunakan *Hyperledger Fabric* dengan *mekanisme* konsensus *Raft*. Hasil simulasi menunjukkan kecepatan dan validitas transaksi tinggi, serta potensi besar dalam menjamin keamanan dan keterlacakan dalam rantai pasok halal.

Keseluruhan studi ini secara kolektif memperlihatkan bahwa integrasi *blockchain* dalam sistem halal bukan hanya menawarkan efisiensi dan transparansi, namun juga menuntut perhatian terhadap aspek biaya, kesiapan infrastruktur, regulasi, dan keterlibatan banyak pemangku kepentingan secara menyeluruh. Untuk memperdalam pemahaman mengenai pendekatan optimasi yang berpotensi mendukung pengelolaan data dan proses pengambilan keputusan dalam konteks ini, dilakukan tinjauan sistematik terhadap penerapan CSA dalam domain IoT.

Penelusuran untuk kajian sistematik selanjutnya diguna menjamin keterlacakan dan transparansi dalam proses seleksi literatur. Penelusuran literatur dilakukan pada empat basis data yang sama, yakni *Springer, Emerald Insight, IEEE Xplore,* dan *ScienceDirect*, dengan cakupan periode yang sama dan batasan yang

sama. Strategi pencarian yang terlihat dalam Gambar 2.2 menggunakan kombinasi kata kunci "*Crow Search Algorithm*" *AND ("Internet of Things" OR* IoT), menghasilkan total 300 artikel dari keempat basis data tersebut dengan jumlah artikel di *Springer* sebanyak 167 artikel, *ScienceDirect* terdiri 121 artikel, *Emerald* terdapat 7 artikel, dan *IEEE Xplore* sejumlah 5 artikel.

Proses penyaringan dilakukan berdasarkan relevansi judul dan abstrak, yang mengerucutkan dengan jumlah artikel menjadi 45 dokumen. Evaluasi lanjutan dilakukan untuk mengecualikan publikasi berupa prosiding dan artikel *non-peer-review*, sehingga tersisa 44 artikel.



Gambar 2.2. Pendekatan litertur PRISMA untuk CSA dan IoT

Pada tahap akhir, dilakukan seleksi penuh terhadap isi artikel berdasarkan kesesuaian konteks, kedalaman metodologis, dan relevansi terhadap integrasi CSA

dan IoT dalam sistem kompleks, menghasilkan 9 artikel utama yang dijadikan fokus kajian yang terlihat dalam tabel 2.2.

CSA telah berkembang menjadi salah satu algoritma *metaheuristik* yang paling adaptif dan efisien dalam menyelesaikan berbagai permasalahan optimisasi kompleks di berbagai domain, mulai dari industri, pertanian, transportasi, hingga sistem komputasi awan dan IoT. CSA merupakan algoritma optimasi *metaheuristik* berbasis populasi yang diperkenalkan oleh Askarzadeh (2016) untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pada ruang pencarian berdimensi tinggi. Algoritma ini mengarahkan proses pencarian solusi melalui *mekanisme* pembaruan posisi kandidat solusi secara *iteratif* dengan memanfaatkan memori solusi terbaik dan parameter kendali yang menjaga keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi. Karakteristik tersebut menjadikan CSA relevan untuk optimasi pada sistem kompleks, termasuk pemrosesan data IoT dan integrasi pada sistem terdistribusi. Sifat *adaptif* dan keseimbangan antara eksplorasi global serta eksploitasi lokal menjadikan CSA unggul dibandingkan algoritma *metaheuristik* konvensional seperti *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan *Ant Colony Optimization* (ACO).

Tabel 2.2. Penelitian Terkait CSA dan IoT

No.	Peneliti (Tahun)	Permasalahan Penelitian	Metode / Pendekatan yang Digunakan	Temuan / Hasil Utama
1	Kumar, Singh, Mishra, dan Daim (2023)	Prediksi beban kerja dan alokasi sumber daya pada *fog computing* untuk mendukung komunikasi IoT industri.	Integrasi CSA dengan D*eep Autoencoder* (DAE) untuk pemetaan sumber daya dan prediksi beban sistem.	CSA meningkatkan efisiensi alokasi *fog nodes*, mengurangi *delay*, dan menekan biaya operasional sistem IoT berbasis *fog*.
2	Panah, Bornapour, Hemmati, dan Guerrero. (2021)	Optimasi penjadwalan pengisian energi pada *Battery Electric Bus* (BEB) dan *Fuel Cell Bus* (FCB) berbasis sistem IoT transportasi cerdas.	*Multi-Criteria* CSA (MC-CSA) yang dikombinasikan dengan metode AHP dan CRITIC untuk analisis keputusan multi-kriteria.	MC-CSA berhasil mengoptimalkan keuntungan operasional harian dan efisien dalam kondisi cuaca dinamis, menunjukkan ketahanan tinggi pada

No.	Peneliti (Tahun)	Permasalahan Penelitian	Metode / Pendekatan yang Digunakan	Temuan / Hasil Utama
				sistem IoT transportasi.
3	Singh, Tyagi, Kumar, Gill, dan Buyya (2021)	Ketidakseimbangan beban (*load balancing*) dalam layanan cloud *computing* yang terhubung ke infrastruktur IoT.	Implementasi CSA untuk pemetaan beban kerja antar *virtual machines* (VM) secara dinamis.	CSA lebih efisien dibanding *Ant Colony Optimization* (ACO) dalam mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan stabilitas layanan *cloud*–IoT.
4	Singh , Tyagi, dan Kumar (2021)	Penjadwalan tugas *heterogen* dan alokasi sumber daya pada lingkungan *cloud computing* untuk mendukung sistem IoT berskala besar.	Perbandingan enam algoritma *metaheuristik* (ACO, PSO, GA, ABC, CSA, PeSOA) untuk analisis optimasi multi-kriteria.	CSA memberikan hasil terbaik dalam hal *makespan* dan efisiensi sumber daya, menjadikannya pilihan unggul dalam sistem IoT terdistribusi.
5	Ledmi, Ledmi, Souidi, Hamdi-Cherif, Maarouk, dan Hamdi-Cherif (2024)	Permasalahan skalabilitas dan waktu eksekusi dalam *High-Utility Itemsets Mining* (HUIM) berbasis data IoT.	*Hibridisasi Crow Search Algorithm* (CSA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) membentuk metode HUIM-ICSO.	HUIM-ICSO meningkatkan kinerja komputasi, mengurangi penggunaan memori, dan mempercepat konvergensi dalam analisis big data IoT.
6	Thaher, Sheta, Awad, dan Aldasht (2024)	Optimasi global dengan peningkatan akurasi pencarian pada lingkungan sistem cerdas berbasis IoT.	*Enhanced CSA* (ECSA) menggunakan pendekatan Island Model untuk memperluas ruang eksplorasi global.	ECSA menunjukkan performa unggul dibandingkan 17 algoritma benchmark dengan peningkatan efisiensi pada 82.6% fungsi uji.
7	Al-Gaphari, Al-Amry dan Al-Nuzaili (2021)	Penyelesaian *Travelling Salesman Problem* (TSP) diskret yang sering digunakan untuk optimasi rute IoT logistik.	*Discrete CSA* berbasis *Modular Arithmetic, Basic Operators,* dan *Dissimilar Solutions.*	*Discrete CSA* menunjukkan akurasi dan kecepatan lebih tinggi dibanding algoritma TSP klasik, relevan untuk rute pengiriman IoT logistik.

No.	Peneliti (Tahun)	Permasalahan Penelitian	Metode / Pendekatan yang Digunakan	Temuan / Hasil Utama
8	Avalos, Haro, Camarena, dan Díaz (2024)	Optimasi perencanaan proses *manufaktur* fleksibel berbasis IoT industri 4.0.	*Improved CSA* (ICSA) dengan penyesuaian parameter adaptif terhadap dinamika proses manufaktur.	ICSA menurunkan waktu produksi dan biaya operasional secara signifikan dibanding metode optimasi konvensional.
9	Meraihi, Gabis, Ramdane-Cherif, dan Acheli (2021)	Keterbatasan kajian menyeluruh tentang penerapan CSA di berbagai bidang termasuk sistem cerdas berbasis IoT.	Kajian literatur sistematis (*Systematic Review*) mengenai varian, hybridisasi, dan aplikasi CSA pada sistem teknik dan industri.	CSA terbukti memiliki kemampuan eksplorasi global yang kuat dan efisien, serta direkomendasikan untuk penerapan dalam sistem IoT *adaptif* dan *otonom*.

Penelitian yang dilakukan oleh Kumar, Singh, Mishra, dan Daim (2023) menunjukkan penerapan CSA dalam konteks *fog computing* berbasis industri IoT melalui integrasi dengan *deep autoencoder* (DAE). Kombinasi tersebut menghasilkan sistem autonomik untuk prediksi beban kerja dan alokasi sumber daya yang efisien pada platform *fog-enabled* industrial IoT. Hasilnya memperlihatkan peningkatan signifikan dalam efisiensi biaya eksekusi dan waktu respons, terutama dalam pengelolaan *fog nodes* di jaringan terdistribusi.

Panah*, Bornapour, Hemmati, dan Guerrero* (2021), mengimplementasikan CSA pada permasalahan penjadwalan pengisian energi kendaraan listrik dan *hidrogen* berbasis IoT dengan mempertimbangkan variabilitas cuaca dan dinamika harga pasar. Pendekatan yang digunakan, yaitu *multi-criteria* CSA (MC-CSA) yang dikombinasikan dengan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dan CRITIC, terbukti mampu meningkatkan keuntungan operasional harian serta memberikan keputusan penjadwalan yang adaptif terhadap kondisi lingkungan yang berubah-ubah.

Al-Gaphari, Al-Amry dan Al-Nuzaili (2021) mengusulkan tiga varian *Discrete CSA* untuk menyelesaikan permasalahan *travelling salesman problem* (TSP). Varian tersebut melibatkan *mekanisme modular arithmetic, basic operators*, dan *dissimilar solutions* yang secara empiris terbukti mengungguli algoritma TSP

modern dalam hal akurasi rute dan waktu komputasi. Hasil penelitian ini menunjukkan fleksibilitas CSA dalam menangani masalah diskrit dan *non-linear*, yang relevan untuk sistem optimasi jalur distribusi pada rantai pasok.

Penelitian yang dilakukan oleh Thaher, Sheta, Awad, dan Aldasht (2024) memperkenalkan *Enhanced CSA* (ECSA) dengan pendekatan *island model kooperatif* untuk mengatasi masalah konvergensi prematur dan meningkatkan kemampuan eksplorasi global. Hasilnya menunjukkan bahwa ECSA berhasil mengungguli 17 algoritma pembanding dalam 82,6% fungsi benchmark, menjadikannya pendekatan yang efektif untuk permasalahan global optimization di sistem berskala besar.

Singh, Tyagi dan Kumar (2021) menerapkan CSA untuk melakukan pemetaan tugas (*task mapping*) pada proses *load balancing*. Algoritma ini menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan ACO dalam hal konsumsi energi dan biaya, sekaligus meningkatkan stabilitas alokasi beban antar *virtual machines* (VMs) pada lingkungan *cloud*-IoT terdistribusi. Avalos, Haro, Camarena, dan Díaz (2024) mengembangkan *Improved* CSA (ICSA) untuk perencanaan proses manufaktur fleksibel dengan mempertimbangkan biaya dan waktu produksi sebagai fungsi kebugaran. Hasilnya menunjukkan bahwa ICSA mampu mengurangi waktu produksi dan biaya secara signifikan dibandingkan metode konvensional lain dalam literatur.

Singh , Tyagi, dan Kumar (2021), melalui kajiannya terhadap enam algoritma *metaheuristik* (ACO, PSO, GA, ABC, CSA, dan PeSOA) menemukan bahwa CSA menghasilkan *makespan* terendah dan efisiensi sumber daya tertinggi pada skenario *multi-criteria scheduling* di lingkungan *cloud computing*. Hasil ini memperkuat bukti empiris bahwa CSA memiliki keunggulan signifikan dalam pengalokasian sumber daya sistem terdistribusi, termasuk pada skenario IoT dengan kebutuhan pemrosesan data *real-time*.

Meraihi, Gabis, Ramdane-Cherif, dan Acheli (2021) menyajikan kajian literatur komprehensif terhadap CSA dan berbagai variannya yang telah diterapkan di berbagai bidang, termasuk sistem teknik, pengolahan citra, seleksi fitur, serta sistem tenaga listrik berbasis IoT. Kajian ini menegaskan bahwa CSA memiliki

kapasitas eksplorasi global yang tinggi dan efisiensi konvergensi yang baik, serta membuka peluang untuk dikembangkan menjadi algoritma hibrida yang lebih adaptif di masa depan.

Ledmi, Ledmi, Souidi, Hamdi-Cherif, Maarouk, dan Hamdi-Cherif (2024) mengusulkan algoritma HUIM-ICSO (*High-Utility Itemsets Mining-Improved Crow Search Optimization*) yang menggabungkan CSA dengan PSO. Hasil eksperimen pada 12 dataset publik menunjukkan peningkatan performa dalam runtime, efisiensi memori, dan kualitas hasil itemsets mining, membuktikan potensi CSA dalam mempercepat proses optimasi berbasis data skala besar seperti sistem sensor IoT.

Hasil penelusuran literatur menunjukkan bahwa kajian sebelumnya telah memberikan dasar yang kuat bagi pemanfaatan *blockchain*, IoT, dan CSA pada sistem yang menuntut transparansi, efisiensi, dan pengolahan data adaptif. Kesenjangan yang masih tampak terletak pada belum hadirnya artefak yang secara simultan memisahkan data transaksi halal dan data sensor lingkungan, menghubungkan validasi digital dengan struktur otoritas halal, serta memanfaatkan CSA sebagai mekanisme komputasional untuk membentuk indikator mutu distribusi. Posisi inilah yang menjadi landasan penelitian ini dalam merumuskan framework dual-blockchain untuk penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal.

2.2. Keaslian Penelitian

Keaslian penelitian ini terletak pada upaya menjembatani kesenjangan yang masih tampak pada penelitian terdahulu. Literatur *blockchain*, IoT, dan halal umumnya menitikberatkan pada keterlacakan transaksi, transparansi data, atau digitalisasi sertifikasi halal, tetapi belum secara eksplisit memisahkan pencatatan data transaksi halal dan data sensor lingkungan ke dalam dua rantai *blockchain* yang berbeda namun saling terintegrasi. Literatur CSA dan IoT juga menunjukkan bahwa CSA banyak digunakan untuk optimasi pada sistem kompleks, tetapi belum diarahkan secara spesifik untuk menghasilkan indikator minimum dan maksimum suhu serta kelembaban sebagai dasar evaluasi mutu distribusi daging segar halal. Penelitian ini menempatkan kesenjangan tersebut dalam satu fokus artefaktual,

yaitu pengembangan *framework dual-blockchain* yang memadukan validasi berbasis otoritas halal melalui PoA, integrasi data sensor berbasis IoT, dan pemrosesan CSA untuk membentuk model halal traceability yang lebih terstruktur, terukur, dan dapat diaudit pada konteks pasar tradisional.

2.3. Landasan Teori

2.3.1. Teknologi *Blockchain*

Sistem *blockchain* menggunakan struktur buku besar yang terdiri dari dokumen digital yang disebut blok, yang menjalani verifikasi kolektif oleh banyak anggota. Teknologi *blockchain* memungkinkan tautan blok menggunakan metode kriptografi (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023). Setiap blok data dalam *blockchain* mempunyai informasi berbeda yang penting bagi sistem dan menciptakan tanda tangan virtual untuk membuktikan bahwa data tersebut benar. Blok saling terhubung, dan menciptakan rantai dasar yang sering disebut *blockchain* . Teknologi *blockchain* menggunakan algoritma *hash* kriptografi. Blok pertama akan berfungsi sebagai blok *genesis*, juga dikenal sebagai blok *header*. Blok *genesis* terdiri dari beberapa elemen penting, termasuk *hash*, stempel waktu, dan catatan *root* (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022; Saxena, Bhushan, dan Abdul, 2021; Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023). Pemanfaatan prosedur ini, unit-unit terpisah saling terhubung dan diperkuat terhadap potensi gangguan atau modifikasi. *Blockchain* didistribusikan ke seluruh sistem komputer semua peserta, berfungsi sebagai *node*, yang mengarah pada pembentukan jaringan terdesentralisasi. Data dipantau secara aktif, dan keakuratannya divalidasi secara kolektif oleh seluruh pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses tersebut, dengan mematuhi prinsip konsensus, sebelum dimasukkan ke dalam *blockchain*. Proses validasi dapat dilakukan melalui penggabungan stempel waktu dengan dokumen atau informasi terkait (Kandi, Kouicem, Doudou, Lakhlef, Bouabdallah, dan Challal, 2022).

Integritas data setiap blok dijamin dengan menggunakan algoritma *hash* yang menggabungkan nilai *hash* dari blok sebelumnya dan algoritma *hash* baru yang dihasilkan secara unik untuk blok saat ini. Koneksitas terbentuk antara blok-blok

yang berurutan, menghasilkan pembentukan struktur seperti rantai. Prosedur *hash* adalah jenis kriptografi yang digunakan untuk memastikan bahwa kata kode tidak dapat diubah. Hal ini memastikan integritas data atau informasi transaksi tidak dapat diubah oleh *user* yang tidak seharusnya (Saxena, Bhushan and Abdul, 2021). *User* dapat melakukan modifikasi terhadap data atau informasi yang disimpan dalam suatu blok, stempel waktu yang terkait dengan blok tersebut akan segera disesuaikan. Perubahan stempel waktu akan menyebabkan perubahan yang sesuai pada nilai *hash* yang dihasilkan, sehingga membuat data atau informasi yang terkandung dalam blok menjadi tidak valid. Fungsi utama *blockchain* adalah sebagai representasi *komprehensif* dari nilai-nilai yang terkandung di setiap *node* (Voundi Koe, Ai, Chen, Tang, Chen, Zhang, dan Li, 2023). *Node-node* ini masing-masing menyimpan nilai *hash* yang terkait dengan data atau informasi yang terkandung dalam blok.

2.3.1.1 Karakteristik *Blockchain*

Penerapannya dalam konteks penelusuran produk halal bertujuan untuk menjamin keamanan, transparansi, dan kepercayaan konsumen. *Blockchain* memiliki enam karakteristik utama sebagai berikut:

1. *Immutability*

Immutability merujuk pada kemampuan sistem untuk menjaga agar data yang telah dicatat tidak dapat diubah atau dihapus setelah divalidasi dan dimasukkan ke dalam blok yang telah terhubung dalam rantai. Karakteristik ini menjadi dasar kepercayaan dan integritas data yang disimpan sehingga setiap bentuk manipulasi dapat langsung terdeteksi oleh sistem. Dalam sistem penelusuran halal, *immutability* memastikan bahwa informasi seperti data penyembelihan, rantai distribusi, hingga proses sertifikasi tidak dapat dimodifikasi setelah direkam, yang menjadi prasyarat penting dalam menjaga keabsahan status halal suatu produk (Saxena, Bhushan and Abdul, 2021). Karakteristik *immutability* merupakan pilar utama dalam arsitektur *blockchain* yang menjamin integritas dan keaslian data melalui *mekanisme* teknis.

Implementasi *immutability* dalam *blockchain* secara teknis dicapai melalui tiga komponen utama, yaitu:

a. *Hash* Kriptografi (SHA-256) digunakan untuk menghasilkan nilai unik dari data yang dimasukkan ke dalam blok. Fungsi ini bersifat *deterministik* dan *irreversible*, yang berarti perubahan sekecil apa pun pada data akan menghasilkan nilai *hash* yang sama sekali berbeda (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023).
b. *Chaining* adalah proses penghubung antarblok di mana setiap blok menyimpan nilai *hash* dari blok sebelumnya, membentuk sebuah struktur berantai. Jika satu blok dimodifikasi, seluruh *hash* dalam rantai akan berubah, sehingga sistem dengan mudah dapat mengenali manipulasi (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022).
c. Tanda tangan digital diterapkan oleh entitas yang sah untuk menandatangani transaksi atau data yang dikirim ke jaringan. Tanda tangan digital ini menggunakan kunci privat dan diverifikasi menggunakan kunci publik, sehingga menjamin otentikasi dan *non-repudiasi* data transaksi (Nwankwow, Shin, Ansori, Lee, dan Kim, 2025).

Hal ini dicapai melalui struktur blok yang saling terhubung secara kriptografis, di mana setiap blok mengandung nilai *hash* unik yang dihasilkan dari isi blok dan nilai *hash* dari blok sebelumnya. Perubahan pada satu blok, maka nilai *hash*nya juga berubah, yang otomatis menyebabkan inkonsistensi dalam seluruh rantai blok berikutnya. Hal ini yang memungkinkan deteksi instan terhadap upaya modifikasi data (Saxena, Bhushan and Abdul, 2021).

Berbagai studi telah menyoroti peran *immutability* dalam sistem *blockchain* halal, terutama dalam menjamin transparansi dan kepatuhan proses sertifikasi. Ali, Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, (2021), dalam penelitiannya mengembangkan *framework blockchain* untuk rantai pasok halal dan menemukan bahwa *immutability* adalah karakteristik paling penting dalam memastikan keaslian jejak audit halal, terutama untuk pelaku UMKM. Penelitian oleh Karyani *Geraldina, Haque, dan Zahir* (2024), menunjukkan bahwa konsumen halal Indonesia memiliki kepercayaan lebih tinggi terhadap sertifikat halal digital berbasis *blockchain* karena jaminan integritas data yang disediakan oleh karakteristik *immutability*. Susanty*, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan*

Kurniawan (2024) merancang sistem *traceability* halal berbasis web yang menggunakan struktur *blockchain* untuk mencatat alur informasi dari peternak hingga konsumen, dan menyimpulkan bahwa *immutability* menjamin rekaman proses yang tidak dapat diubah.

2. *Decentralization*

Desentralisasi merupakan salah satu pilar *fundamental* dalam arsitektur *blockchain* yang berperan penting dalam menjamin integritas dan kepercayaan terhadap sistem. Desentralisasi mengacu pada distribusi otoritas dan pengelolaan data kepada berbagai pemangku kepentingan yang terlibat, seperti RPH, produsen, auditor halal, distributor, hingga konsumen akhir (Saxena, Bhushan and Abdul, 2021). Sistem terpusat memiliki satu titik kegagalan dan risiko manipulasi data yang tinggi, pendekatan desentralisasi dalam *blockchain* memberikan jaminan bahwa tidak ada entitas tunggal yang dapat secara sepihak mengubah atau mengendalikan data yang terekam di dalam rantai pasok.

Teknologi *blockchain* dalam sistem penelusuran mengadopsi model *permissioned decentralization*, di mana *node-node* otoritatif memiliki hak untuk membaca, mencatat, dan memverifikasi informasi transaksi. Setiap *node* memiliki salinan buku besar yang identik, dan setiap perubahan data hanya bisa dilakukan melalui konsensus multi-pihak, bukan keputusan tunggal (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023). Penerapan desentralisasi dalam konteks halal memberikan dampak signifikan terhadap penguatan sistem sertifikasi dan pelacakan, misalnya data lokasi dan waktu pemotongan hewan yang dikirim dari titik awal dapat langsung disimpan dalam *blockchain* dan diverifikasi oleh *node* auditor. Hal ini meningkatkan transparansi operasional dan validitas sertifikasi, yang sangat krusial dalam menjamin kepercayaan konsumen Muslim terhadap kehalalan produk (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022).

Desentralisasi memungkinkan sistem untuk tetap berjalan meskipun salah satu *node* mengalami gangguan. Hal ini juga membuka peluang adopsi sistem *blockchain* halal secara lintas lembaga atau bahkan lintas negara, selama mengikuti protokol standar *interoperabilitas*. Banaeian Far, Imani Rad and Rajabzadeh Asaar (2023), desentralisasi dalam jaringan *blockchain* terbukti mampu mengurangi

ketergantungan terhadap otoritas tunggal dan mendorong kolaborasi berbasis verifikasi digital yang efisien. Desentralisasi tidak hanya menjadi pendekatan teknis, tetapi juga pendekatan etis dan strategis dalam menjawab kompleksitas sertifikasi halal yang selama ini bersifat hierarkis dan tidak transparan. Sistem yang dirancang berdasarkan prinsip desentralisasi dapat membentuk kepercayaan bersama dan memperkuat akuntabilitas antar aktor dalam rantai pasok halal.

3. *Distributed*

Karakteristik terdistribusi merupakan elemen utama dalam teknologi *blockchain* yang membedakannya dari sistem konvensional berbasis pusat data terpusat. Sistem *blockchain*, data tidak disimpan pada satu lokasi sentral melainkan tersebar di banyak *node* yang saling terhubung dalam jaringan *peer-to-peer*. Setiap *node* menyimpan salinan lengkap dari buku besar yang mencatat seluruh transaksi dimulai dari blok *genesis*, sehingga membentuk *redundansi* yang memastikan keutuhan dan ketersediaan data (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023).

Karakteristik terdistribusi memainkan peran penting dalam menjamin keandalan sistem pelacakan. Setiap entitas yang terlibat dalam rantai pasok dimulai dari RPH, produsen, distributor, auditor halal, hingga konsumen, memiliki akses terhadap data yang sama, yang telah dienkripsi dan disimpan secara permanen pada berbagai *node*. Distribusi ini menjamin bahwa tidak ada satu pun pihak yang memiliki kontrol eksklusif atas data, serta menghindari risiko manipulasi atau kehilangan data akibat kerusakan pada satu titik sistem (Saxena, Bhushan and Abdul, 2021).

Implementasi arsitektur terdistribusi dalam sistem *blockchain* halal juga memungkinkan peningkatan *interoperabilitas* antara lembaga. Lembaga Pemeriksa Halal dan *auditor independen* dapat mengakses jejak logistik produk secara *real-time*, tanpa harus menunggu laporan manual atau akses dari sistem terpusat. Hal ini secara langsung meningkatkan efisiensi pengawasan dan akurasi data sertifikasi halal. Teknologi distribusi juga mendukung *mekanisme* replikasi otomatis di seluruh *node*. Setiap kali terjadi transaksi baru terjadi misalnya pemindahan produk dari gudang ke pengecer, informasi tersebut akan tercermin serentak ke seluruh

node dalam jaringan, yang kemudian memvalidasinya melalui *mekanisme* konsensus. Sistem *blockchain* halal menjadi lebih tahan terhadap serangan siber, lebih efisien dalam audit, dan lebih transparan secara keseluruhan (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022).

Keseluruhan keunggulan ini menjadikan sifat terdistribusi sebagai fondasi utama dalam pengembangan sistem informasi halal yang berbasis *blockchain*. Karakteristik ini tidak hanya mendukung keamanan dan ketersediaan data, tetapi juga menjadi jaminan teknis atas prinsip syariah yang menuntut kejelasan, kejujuran, dan ketelusuran dalam seluruh proses produksi dan distribusi produk halal.

4. *Consensus*

Algoritma *consensus* merupakan *mekanisme* fundamental yang digunakan untuk memastikan seluruh node dalam jaringan mencapai kesepakatan terhadap validitas data sebelum blok baru dapat ditambahkan ke dalam rantai. Peran konsensus sangat krusial dalam sistem yang bersifat terdistribusi, karena tidak adanya entitas pusat yang mengontrol proses validasi. Setiap transaksi harus diverifikasi secara kolektif oleh node-node dalam jaringan yang telah ditentukan otoritas dan perannya.

Beberapa jenis algoritma konsensus telah dikembangkan dan digunakan dalam berbagai implementasi teknologi *blockchain* . Salah satu yang paling awal adalah *Proof of Work* (PoW). PoW bekerja dengan melibatkan node komputasi, atau penambang, yang bersaing memecahkan teka-teki matematika kompleks untuk memperoleh hak menambahkan blok baru ke rantai. Proses ini membutuhkan sumber daya komputasi tinggi dan konsumsi energi yang besar, menjadikannya metode yang mahal dan tidak efisien untuk sistem yang mengutamakan efisiensi sumber daya (Kandi, Kouicem, Doudou, Lakhlef, Bouabdallah, dan Challal, 2022). Alternatif terhadap kelemahan PoW, dikembangkanlah *Proof of Stake* (PoS) yang menghilangkan kebutuhan akan perangkat keras khusus. Sistem PoS, validator dipilih berdasarkan jumlah koin yang dimiliki dalam jaringan. *Mekanisme* ini memungkinkan penghematan energi serta menyediakan insentif ekonomi bagi

partisipan untuk menjaga integritas sistem (Kandi, Kouicem, Doudou, Lakhlef, Bouabdallah, dan Challal, 2022).

Sistem *blockchain* yang bersifat *permissioned*, seperti pada implementasi rantai pasok halal, konsensus yang paling sesuai adalah PoA. PoA tidak mengandalkan komputasi intensif maupun kepemilikan aset digital, melainkan pada kredibilitas entitas yang diberi wewenang sebagai validator. Sistem ini, hanya node tertentu yang telah diverifikasi yang memiliki hak untuk memverifikasi dan mengesahkan transaksi dalam jaringan (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022). Penerapan PoA dalam *blockchain* halal menghadirkan pendekatan validasi yang sesuai dengan prinsip kehalalan dan struktur kelembagaan yang berlaku. Setiap data terkait aktivitas logistik, penyembelihan, atau sertifikasi hanya dapat dicatat dalam *blockchain* setelah melalui proses verifikasi oleh minimal dua *node otoritatif*. Validasi ini dijalankan secara otomatis melalui kontrak pintar yang dirancang khusus untuk memeriksa kesesuaian data terhadap standar halal. Pendekatan ini tidak hanya menciptakan lapisan keamanan tambahan, tetapi juga mencegah manipulasi data oleh pihak yang tidak sah (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023).

5. *Transparency*

Transparansi merupakan salah satu karakteristik utama dari teknologi *blockchain* yang berfungsi sebagai *mekanisme* fundamental untuk menjamin keterbukaan dan akuntabilitas dalam pencatatan dan pertukaran data. Sistem penelusuran produk halal, transparansi berperan penting untuk memastikan bahwa seluruh informasi terkait proses halal, dari penyembelihan, pemrosesan, distribusi, hingga konsumsi, tersedia secara terbuka dan dapat diverifikasi oleh para pemangku kepentingan yang relevan (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023; Saxena, Bhushan and Abdul, 2021; Susanty*, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan,* 2024). Arsitektur *blockchain* transaksi halal yang berbasis *permissioned blockchain* , transparansi dicapai melalui *mekanisme* pencatatan data yang tidak dapat dimodifikasi dan dapat diakses secara terbatas oleh *node-node otoritatif*. Hal ini menciptakan jalur transparansi yang memungkinkan semua

entitas dalam rantai pasok untuk mengakses histori transaksi tanpa mengorbankan kerahasiaan data sensitif (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022).

Penerapan kontrak pintar dalam *blockchain* halal menambah dimensi transparansi, karena seluruh aturan logika dan validasi proses halal dikodekan secara eksplisit dan dijalankan secara otomatis tanpa campur tangan manusia, dengan demikian, tidak hanya data hasil proses halal yang tercatat secara transparan, tetapi juga proses validasinya. Hal ini menghilangkan ambiguitas prosedural yang sering menjadi sumber ketidakpercayaan dalam sistem konvensional. Desain sistem *blockchain* juga memungkinkan visualisasi data melalui *dashboard* audit halal berbasis web, yang memberikan akses terhadap riwayat transaksi dan data verifikasi kepada auditor halal, lembaga pengawas, serta konsumen akhir. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip keterbukaan dan kepercayaan yang menjadi fondasi dalam pengembangan sistem sertifikasi halal digital (Kandi, Kouicem, Doudou, Lakhlef, Bouabdallah, dan Challal, 2022). Transparansi dalam *blockchain* halal tidak hanya mencerminkan keterbukaan data, tetapi juga menjadi prasyarat mutlak untuk mencapai validitas proses dan kepercayaan publik terhadap kehalalan suatu produk.

6. *Auditability*

Kemampuan sistem untuk diaudit, merupakan salah satu karakteristik utama *blockchain* yang memungkinkan setiap aktivitas atau transaksi yang tercatat dapat ditelusuri kembali secara sistematis dan tidak dapat disangkal. Sistem penelusuran produk halal, *auditability* menjadi pilar penting yang mendukung keabsahan halal, terutama dalam menjamin keterlacakan proses dari hulu ke hilir (Banaeian Far et al. 2023). *Blockchain* menyimpan setiap transaksi dalam struktur data berbasis blok yang terhubung secara kriptografis menggunakan algoritma *hash* seperti SHA-256. Setiap blok tidak hanya mencatat data transaksi, tetapi juga mencakup waktu kejadian, dan tanda tangan digital, yang merangkum seluruh data dalam bentuk struktur pohon. Struktur ini memungkinkan verifikasi cepat dan efisien terhadap integritas data secara parsial maupun keseluruhan tanpa membuka seluruh isi blok (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023; Voundi Koe, Ai, Chen, Tang, Chen, Zhang, dan Li, 2023).

Audit trail digital memudahkan otoritas halal dan auditor eksternal untuk melakukan pemeriksaan berkala terhadap histori transaksi tanpa risiko manipulasi. Kemampuan audit ini diperkuat melalui integrasi *permissioned blockchain* , yang membatasi akses penambahan blok hanya pada *node* terpercaya, namun tetap memungkinkan otorisasi pembacaan histori data oleh auditor atau pihak berwenang. Hal ini menciptakan keseimbangan antara privasi dan transparansi dalam pelaksanaan audit halal berbasis *blockchain* (Tong, Dong, Shen, Jiang, dan Zhang, 2022). *Auditability* bukan hanya mendukung aspek teknis dari validasi transaksi halal, tetapi juga menjadi landasan penting dalam pembentukan sistem sertifikasi halal digital yang kredibel, efisien, dan berorientasi pada kepercayaan konsumen global.

2.3.1.2 Kategorisasi *Blockchain* pada Struktur Tata Kelola

Sistem *blockchain* dikelompokkan berdasarkan struktur tata kelolanya memengaruhi cara otorisasi buku besar digital dikelola dan layanan yang menyertainya. Klasifikasi data blok bergantung pada seberapa besar kontrol yang dimiliki peserta atas hak istimewa baca dan tulisnya. Kelompok ini mencakup tiga bentuk berbeda, yaitu *blockchain* publik, adalah sistem buku besar digital terdistribusi dan terdesentralisasi yang memungkinkan akses universal dan memfasilitasi pencatatan dan verifikasi transaksi secara transparan. Teknologi ini memungkinkan aksesibilitas jaringan secara luas. Setiap anggota individu, juga dikenal sebagai *node*, dalam jaringan *blockchain* berwenang untuk mengakses informasi yang terdapat dalam setiap blok. Buku besar digital tersebut terdesentralisasi dan mudah diakses oleh pengguna tanpa batasan apa pun. Setiap *node* dalam jaringan memiliki kemampuan untuk mengautentikasi kontrak atau transaksi, sehingga informasi dapat diakses secara terbuka oleh publik (Saxena et al., 2021; Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023).

Selain *blockchain* publik terdapat *node* yang diperoleh dengan menerima permintaan pribadi atau disebut *blockchain privat*, disini note atau pengguna harus menerima undangan asli. Data *blockchain private* data diterapkan melalui penerapan akses terbatas pada *node* tertentu dalam sistem. Sistem yang dipertimbangkan tidak menunjukkan desentralisasi yang menyeluruh. Pengontrol

memungkinkan *node* untuk mengakses data *private* (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023). Sistem *blockchain* berizin, yaitu kemampuan untuk mengakses data yang disimpan dalam blok terbatas pada *node* yang telah menjalani verifikasi dan dinilai dapat diandalkan berdasarkan kriteria yang telah ditentukan. Struktur tata kelola jaringan *blockchain* berizin dicirikan oleh kehadiran pemain yang berwenang, masing-masing menempati posisi berbeda dan memiliki otorisasi sesuai dengan kewenangannya (Patel, Brahmbhatt, Bariya, Nayak, dan Singh, 2023).

2.3.1.3 Teknologi Smart contract

Smart contract merupakan inovasi penting yang lahir dari pengembangan *blockchain* generasi kedua dan berperan sebagai fondasi bagi otomatisasi transaksi dalam sistem terdistribusi. Istilah *smart contract* didefinisikan sebagai protokol komputer yang dirancang untuk mengeksekusi syarat dan ketentuan suatu perjanjian secara otomatis berdasarkan logika pemrograman tertentu. Hal ini berbeda dengan kontrak tradisional yang membutuhkan perantara, *smart contract* berjalan secara independen di atas jaringan *blockchain*, sehingga memberikan jaminan transparansi, keamanan, serta efisiensi dalam proses eksekusi (Barj, 2024; Bohyer dan Hayajneh, 2023; Rahman et al., 2024). *Smart contract* dipahami sebagai sekumpulan instruksi berbasis kode yang tersimpan dalam blok *blockchain* dan dijalankan secara deterministik ketika kondisi yang telah ditetapkan terpenuhi. Karakteristik ini menjadikan *smart contract* bersifat *immutable* atau tidak dapat diubah setelah dipublikasikan, karena setiap instruksi divalidasi melalui *mekanisme* konsensus jaringan. *Smart contract* mampu mengurangi ketergantungan pada pihak ketiga sekaligus meminimalkan risiko sengketa maupun kecurangan dalam pelaksanaan transaksi (Bohyer dan Hayajneh, 2023)

Implementasi *smart contract* dalam *blockchain* menjadi tonggak penting dalam evolusi teknologi terdistribusi, karena memungkinkan integrasi antara protokol kriptografi dengan logika bisnis yang dijalankan secara otomatis. *Smart contract* diimplementasikan sebagai *self-executing code* yang ditempatkan di dalam *blockchain*, di mana setiap transaksi atau kondisi tertentu akan memicu eksekusi instruksi sesuai aturan yang tertanam di dalamnya (Bohyer dan Hayajneh, 2023;

Rahman, Titouna, dan Nait-Abdesselam, 2024). *Mekanisme* ini memperluas fungsi *blockchain* dari *distributed ledger* pencatat transaksi menjadi platform eksekusi aplikasi terdesentralisasi. *Smart contract* telah digunakan secara luas pada berbagai sektor, dibidang keuangan, *smart contract* mendukung *mekanisme decentralized finance* yang memungkinkan layanan pinjaman, investasi, dan perdagangan aset digital tanpa perantara. Sektor logistik dan rantai pasok, *smart contract* digunakan untuk mengotomatiskan pelacakan barang, validasi dokumen pengiriman, serta pengendalian standar kualitas (Bohyer dan Hayajneh, 2023). Teknologi ini berperan dalam memverifikasi sertifikat halal, mendokumentasikan proses penyembelihan sesuai syariat, serta menjamin keaslian produk yang diterima konsumen akhir. (Adhiwibowo, Widayat, dan Syafei, 2023)

Keunggulan *smart contract* terletak pada sifatnya yang *trustless* dan *self-executing*, yaitu memungkinkan transaksi dilakukan tanpa memerlukan otoritas pusat. Seluruh aturan, hak, dan kewajiban para pihak tertanam di dalam kode, sehingga kontrak dieksekusi sesuai instruksi sistem tanpa memerlukan interpretasi subjektif (Rahman, Titouna, dan Nait-Abdesselam, 2024). *Smart contract* tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga mendukung integritas data yang tercatat secara permanen pada *blockchain* . Melalui integrasi *smart contract*, proses verifikasi sertifikasi halal, pencatatan aktivitas distribusi, serta pengawasan kepatuhan standar dapat dilaksanakan secara otomatis, transparan, dan dapat diaudit.

2.3.2. *Framework Dual-blockchain*

2.3.2.1 Definisi dan Konsep *Dual-blockchain*

Dual-blockchain merupakan pendekatan arsitektural dalam pengembangan sistem berbasis *blockchain* yang mengintegrasikan dua jenis *blockchain* dengan fungsi berbeda namun saling melengkapi, yaitu *blockchain* transaksi dan *blockchain* IoT. *Blockchain* transaksi berperan sebagai *ledger* utama yang mencatat, memverifikasi, dan mengamankan transaksi digital, sedangkan *blockchain* IoT dirancang untuk mengelola data sensor yang dihasilkan secara kontinu oleh perangkat pintar dalam suatu ekosistem terdistribusi (Abbas dan Myeong, 2024; Gupta, Meena, dan Dhir, 2024). Integrasi kedua jenis *blockchain*

ini menghasilkan kerangka kerja yang tidak hanya andal dalam mencatat transaksi, tetapi juga mampu memproses data sensor dalam skala besar secara efisien.

Blockchain transaksi menekankan aspek integritas, transparansi, dan akuntabilitas data, sehingga sangat sesuai untuk mendokumentasikan aktivitas bisnis maupun transaksi komersial. *Blockchain* IoT difokuskan pada efisiensi dan kecepatan dalam menangani data yang bersifat *real-time*, seperti suhu, dan kelembaban. Kombinasi keduanya menjadikan *framework dual-blockchain* sebagai sistem hibrida yang memanfaatkan keunggulan masing-masing sekaligus memitigasi keterbatasan yang timbul apabila keduanya berdiri sendiri. Relevansi konsep ini semakin nyata ketika dikaitkan dengan konteks penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal. *Blockchain* transaksi berperan dalam memastikan setiap aktivitas komersial dan kepatuhan terhadap sertifikasi halal terdokumentasi secara permanen, sementara *blockchain* IoT menjamin kualitas produk melalui pemantauan kondisi lingkungan, seperti rantai distribusi. Integrasi tersebut mendukung tercapainya prinsip transparansi, akuntabilitas, dan keberlanjutan dalam industri halal (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021).

Pemilihan *dual-blockchain* dalam penelitian ini tidak diarahkan semata-mata sebagai strategi peningkatan *throughput* seperti pada pendekatan sidechain atau *Layer 2 scaling*, tetapi sebagai strategi pemisahan fungsi data yang memiliki karakteristik berbeda. *Sidechain* dan *Layer 2* pada umumnya dikembangkan untuk memperluas kapasitas transaksi, menurunkan biaya, atau mengurangi beban pada rantai utama. Penelitian ini memerlukan pemisahan yang lebih bersifat fungsional, karena data transaksi halal bersifat administratif, legal, dan berbasis validasi aktor, sedangkan data sensor IoT bersifat periodik, numerik, dan berorientasi pada pemantauan kondisi lingkungan. Atas dasar itu, dual-blockchain dipilih karena lebih sesuai untuk memisahkan logika pencatatan, memudahkan audit data, serta menjaga keterhubungan antara validasi halal dan indikator mutu distribusi tanpa membebani satu rantai tunggal.

Dual-blockchain telah mendapatkan validasi praktis melalui penerapannya di berbagai sektor industri. Bidang energi cerdas, *dual-blockchain* digunakan untuk mengelola perdagangan energi sekaligus memantau konsumsi energi *real-time*

melalui data sensor IoT. Yu et al. (2022) menunjukkan bahwa penerapan *dual-blockchain* dalam *peer-to-peer* pertukaran energi meningkatkan efisiensi distribusi energi terbarukan, memperkuat transparansi transaksi, serta mengurangi ketergantungan pada pihak ketiga.

Penelitian sistem transportasi cerdas, Juárez dan Bordel (2023), mengembangan arsitektur *dual-blockchain* juga terbukti bermanfaat pada jaringan *ad hoc* kendaraan (VANET). Arsitektur ini dirancang untuk mengatasi tantangan keamanan melalui kerangka kerja penilaian reputasi yang mengintegrasikan inferensi Bayesian dan analisis data historis. Pendekatan sistem tersebut, mampu mengurangi kesalahan observasi sekaligus meningkatkan akurasi evaluasi reputasi antar node kendaraan. *Dual-blockchain* tidak hanya memperkuat kepercayaan dalam pertukaran informasi, tetapi juga meningkatkan efisiensi komunikasi serta mitigasi serangan berbahaya dalam ekosistem transportasi cerdas.

Penelitian sektor kesehatan, Saikumari dan George, (2023) membangun *Internet of Medical Things* (IoMT), sebuah sistem berbasis *dual-blockchain* yang didukung kriptografi kurva eliptik (ECC) dikembangkan untuk meningkatkan keamanan dan privasi dalam transmisi data medis. Sistem ini memastikan integritas dan transparansi data, sekaligus memanfaatkan ECC untuk proses enkripsi dan dekripsi yang efisien. Kombinasi antara *dual-blockchain* dan ECC tidak hanya mengatasi masalah skalabilitas serta kinerja yang kerap ditemui pada metode kriptografi tradisional, tetapi juga memfasilitasi *mekanisme* berbagi data medis yang aman di antara para pemangku kepentingan di sektor kesehatan.

Penelitian berbagai studi tersebut menegaskan bahwa *dual-blockchain* memiliki potensi besar sebagai solusi lintas sektor, terutama pada ekosistem yang membutuhkan pencatatan transaksi yang aman serta pengelolaan data sensor yang *real-time*. Penerapan *dual-blockchain* pada sektor energi, logistik, dan kesehatan memberikan landasan teoritis sekaligus praktis untuk merancang *framework dual-blockchain* dalam penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal.

2.3.2.2 Teknologi *Blockchain* untuk Transaksi

Blockchain untuk kegiatan transaksi merupakan komponen *fundamental* dalam sistem rantai pasok modern karena menyediakan *mekanisme* pencatatan dan

validasi transaksi yang terdesentralisasi, transparan, dan aman. Pada prinsipnya, *blockchain* transaksi berfungsi sebagai *distributed ledge*r yang mencatat setiap aktivitas dalam rantai pasok, mulai dari proses produksi, distribusi, hingga transaksi akhir dengan konsumen. Setiap catatan yang masuk ke dalam *blockchain* diverifikasi oleh jaringan melalui *mekanisme* konsensus, sehingga menghasilkan data yang tidak dapat diubah dan diaudit secara terbuka (Chu dan Pham 2024, 2024; Saurabh dan Dey 2021; Shiraishi et al. 2025; Treiblmaier dan Garaus 2023). Peran utama *blockchain* dalam rantai pasok adalah memastikan integritas dan akuntabilitas data transaksi. Setiap entri, baik berupa dokumen sertifikasi, bukti pembayaran, maupun data distribusi, dicatat secara permanen dalam blok yang saling terhubung. *Mekanisme blockchain* ini mampu mengurangi risiko manipulasi data, pemalsuan dokumen, maupun praktik kecurangan yang sering terjadi pada sistem pencatatan konvensional (Duan, Onyeaka, Pang, dan Meng, 2024). *Blockchain* memungkinkan keterlacakan yang komprehensif, di mana setiap transaksi dapat ditelusuri kembali hingga ke sumber awal, sehingga meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap keaslian produk yang beredar.

Korelasi dalam rantai pasok halal, *blockchain* transaksi memiliki peran strategis dalam memastikan bahwa setiap tahap distribusi produk mengikuti standar kepatuhan syariah. Data terkait sertifikat halal, bukti penyembelihan sesuai syariat, hingga proses distribusi dicatat secara permanen dan divalidasi melalui konsensus jaringan. *Blockchain* tidak hanya memberikan jaminan integritas bagi lembaga sertifikasi dan regulator, tetapi juga meningkatkan transparansi bagi konsumen akhir (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021). *Blockchain* transaksi dapat diimplementasikan dengan protokol konsensus yang relatif kuat, seperti PoA atau *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT). Kedua *mekanisme* ini dirancang untuk memastikan validitas transaksi dengan latensi rendah dan tingkat keamanan tinggi (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Rahman, Chamikara, Khalil, dan Bouras, 2022; Saurabh dan Dey, 2021). Setiap makanisme transaksi dalam rantai pasok diverifikasi oleh *node* otoritatif yang dipercaya, sehingga sistem dapat berjalan dengan efisien tanpa mengorbankan aspek keamanan.

Penggunaan *blockchain* transaksi dalam rantai pasok terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya administrasi, dan memperkuat kepercayaan antar pihak yang terlibat. Karakteristiknya yang transparan, dapat diaudit, dan sulit dimanipulasi menjadikan *blockchain* transaksi sebagai instrumen penting dalam membangun sistem rantai pasok halal yang akuntabel, berkelanjutan, dan terpercaya di tingkat global. Implementasi *blockchain* transaksi dalam industri pangan halal telah menjadi inovasi penting dalam menjawab kebutuhan akan transparansi, keterlacakan, serta kepatuhan syariah di sepanjang rantai pasok. *Ledger* terdistribusi ini mendokumentasikan setiap aktivitas secara permanen, mulai dari proses penyembelihan, pengolahan, distribusi, hingga sampai ke tangan konsumen. Sifat *immutability* dan transparansi, *blockchain* memastikan bahwa data transaksi tidak dapat dimanipulasi setelah dicatat, sehingga keaslian informasi mengenai status halal dan keberlanjutan produk tetap terjamin (J, Andrew, Isravel, Sagayam, Bhushan, Sei, dan Eunice, 2023; Nikseresht, Shokouhyar, Tirkolaee, dan Pishva, 2024; Rustemi dan Dalipi, 2025). *Blockchain* transaksi telah digunakan untuk mendokumentasikan informasi penting seperti sertifikasi halal, dokumen inspeksi, dan riwayat distribusi produk. Setiap tahap dalam proses rantai pasok yang dimulai dari peternakan, rumah potong hewan, hingga transportasi dicatat dalam bentuk blok transaksi yang tervalidasi melalui konsensus. Data tersebut kemudian dapat diakses oleh seluruh pemangku kepentingan, termasuk produsen, distributor, lembaga sertifikasi, regulator, dan konsumen akhir (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021; Susanty, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan, 2024). Model ini mengurangi ketergantungan pada pihak perantara dalam proses verifikasi, sekaligus meningkatkan kepercayaan publik terhadap keaslian produk halal yang beredar di pasar.

Beberapa penelitian menegaskan bahwa penerapan *blockchain* transaksi dalam industri halal tidak hanya meningkatkan akuntabilitas, tetapi juga memperkuat daya saing produk di pasar global. Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan (2021), menyoroti bahwa keterlacakan produk halal melalui *blockchain* mampu menutup celah kecurangan, seperti pemalsuan label halal atau penggantian

bahan baku yang tidak sesuai syariat. Sistem ini mempermudah proses audit oleh lembaga sertifikasi halal, karena seluruh riwayat transaksi tersimpan secara permanen dan dapat diakses kapan saja. Integrasi *blockchain* transaksi berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan. Pencatatan yang transparan memungkinkan konsumen untuk memastikan bahwa produk yang dikonsumsi tidak hanya halal, tetapi juga diproduksi dengan memperhatikan aspek lingkungan dan kesejahteraan hewan. Hal ini sejalan dengan prinsip halalan tayyiban yang menekankan kehalalan dan kebaikan produk dalam ekosistem pangan halal. (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021). Implementasi *blockchain* transaksi dalam industri pangan halal tidak hanya berperan sebagai teknologi pencatat data, tetapi juga sebagai *mekanisme* penguatan integritas, transparansi, dan keberlanjutan. *Blockchain* transaksi merupakan tulang punggung *framework dual-blockchain* yang memastikan setiap aktivitas dalam rantai pasok daging segar halal terdokumentasi secara akurat, permanen, dan dapat diaudit.

2.3.2.3 Integrasi *Blockchain* dengan IoT

Pemanfaatan *blockchain* yang terintegrasi dengan IoT menghadirkan peluang besar dalam pengumpulan, pengelolaan, dan validasi data lingkungan pada rantai pasok pangan halal. IoT berfungsi sebagai sumber data *real-time* melalui sensor yang memantau parameter kritis, seperti suhu, kelembaban, intensitas cahaya, maupun kondisi transportasi. *Blockchain* bertindak sebagai *ledger* terdistribusi yang memastikan data tersebut tercatat secara permanen, tidak dapat dimanipulasi, dan dapat diverifikasi oleh seluruh pemangku kepentingan (Duan, Onyeaka, Pang, dan Meng, 2024; Kumar, Singh, Mishra, dan Daim, 2024; Morchid, El Alami, Raezah, dan Sabbar, 2024). Integrasi ini memberikan jaminan bahwa setiap data yang dikumpulkan sejak tahap produksi hingga distribusi memiliki keaslian dan akurasi yang tinggi. Manfaat utama dari *blockchain* IoT dalam pengumpulan data lingkungan adalah peningkatan transparansi dan keterlacakan. Data yang dikirimkan oleh perangkat IoT tidak hanya direkam secara otomatis, tetapi juga langsung disimpan di *blockchain* sehingga setiap perubahan kondisi dapat dimonitor secara *real-time*. Semua pelaku yang terlibat dalam rantai pasok yang dimulai dari produsen, regulator, hingga konsumen, dapat mengakses informasi

yang sama tanpa celah manipulasi, sehingga memperkuat kepercayaan terhadap keaslian produk halal dan kualitas penyimpanan (Duan, Onyeaka, Pang, dan Meng, 2024; Jum'a, Ikram, dan Jose Chiappetta Jabbour, 2024; Kumar, Singh, Mishra, dan Daim, 2024; Morchid, El Alami, Raezah, dan Sabbar, 2024).

Integrasi *blockchain* dan IoT menjadi pendekatan strategis dalam membangun sistem rantai pasok yang transparan, aman, dan dapat diaudit. IoT menghasilkan data dalam jumlah besar dan bersifat heterogen, sementara *blockchain* menyediakan infrastruktur terdistribusi yang menyimpan data tersebut secara *immutable*. Kombinasi ini menjadikan proses *monitoring* dan pengendalian rantai pasok lebih efisien, sekaligus menutup peluang terjadinya manipulasi maupun kesalahan pencatatan pada sistem tradisional (Duan, Onyeaka, Pang, dan Meng, 2024; Jum'a, Ikram, dan Jose Chiappetta Jabbour, 2024; Kumar, Singh, Mishra, dan Daim, 2024; Morchid, El Alami, Raezah, dan Sabbar, 2024).

Penelitian dalam industri pangan halal, integrasi *blockchain* dan IoT memiliki peran penting dalam menjamin kepatuhan syariah sekaligus menjaga mutu produk. Data sensor IoT yang merekam kondisi lingkungan penyimpanan dan transportasi daging segar halal dapat dicatat secara permanen di *blockchain*, sehingga menciptakan keterlacakan yang komprehensif dari peternakan, rumah potong hewan, distribusi, hingga konsumen akhir. Konsistensi terhadap standar halal dan prinsip halalan tayyiban dapat dipantau secara terus-menerus (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021)

Integrasi ini juga mendukung otomatisasi proses verifikasi melalui *smart contract,* sebagai contoh, ketika sensor IoT mendeteksi adanya penyimpangan suhu pada rantai dingin, *blockchain* dapat secara otomatis mengeksekusi aturan yang telah diprogram untuk memberikan peringatan atau bahkan menghentikan distribusi. *Mekanisme* ini meningkatkan efisiensi sistem pengendalian mutu sekaligus memperkuat akuntabilitas dalam rantai pasok halal. Seluruh data lingkungan yang terekam secara otomatis oleh sensor IoT dapat diakses secara transparan dan diverifikasi oleh auditor atau lembaga sertifikasi, sehingga mengurangi ketergantungan pada dokumen manual yang rentan kesalahan. Proses audit menjadi lebih cepat, berbasis bukti digital yang otentik, serta menurunkan

biaya administrasi dan waktu verifikasi (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021). Penerapan *Blockchain* untuk perangkat IoT mulai diadopsi untuk menjamin kepatuhan syariah dan mutu produk. Data sensor terkait suhu rantai dingin, titik distribusi, serta kondisi penyimpanan daging halal dapat disimpan di *blockchain* guna mendukung audit yang lebih transparan. Integrasi ini menjamin status halal sekaligus memastikan aspek keberlanjutan produk halal melalui pengawasan kualitas yang berkelanjutan (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021).

Penelitian *blockchain* IoT yang dijabarkan, dapat disimpulkan bahwa *blockchain* IoT memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keterlacakan, transparansi, keamanan data, dan efisiensi sistem rantai pasok pangan. Penelitian ini, *blockchain* IoT diposisikan sebagai komponen utama *framework dual-blockchain* yang memastikan setiap parameter lingkungan pada rantai pasok daging segar halal dapat dicatat, diverifikasi, dan diaudit secara berkesinambungan, sehingga mendukung keberlanjutan dan kepercayaan konsumen.

2.3.3. Konsensus *Blockchain*

2.3.3.1 Konsep Konsensus pada *Blockchain*

Konsensus dalam *blockchain* merupakan *mekanisme* fundamental yang memungkinkan tercapainya kesepakatan di antara node dalam jaringan terdistribusi mengenai validitas transaksi maupun keadaan buku besar digital. Sistem yang tidak memiliki otoritas pusat, konsensus berfungsi sebagai sarana koordinasi agar seluruh peserta jaringan dapat memelihara satu versi data yang sama, konsisten, dan terpercaya. Konsensus menjadi landasan yang menjamin integritas, keamanan, serta keandalan *blockchain* dalam merekam dan memvalidasi transaksi (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Ray, Dash, Salah, dan Kumar, 2021; Sahoo et al., 2024). Konsensus dapat dipahami sebagai seperangkat aturan atau protokol yang digunakan oleh node dalam jaringan *blockchain* untuk menentukan blok transaksi yang sah dan menambahkannya ke dalam rantai. *Mekanisme blockchain* ini mampu mengatasi tantangan *Byzantine Generals Problem*, yakni situasi ketika node-node dalam jaringan harus mencapai kesepakatan meskipun terdapat kemungkinan

adanya partisipan yang jahat atau berperilaku tidak jujur (Li, Hu, Zhu, Bodeveix, dan Ye, 2022; Rahman, Chamikara, Khalil, dan Bouras, 2022). Konsensus tidak hanya prosedur teknis, tetapi juga merupakan instrumen yang memastikan keadilan, transparansi, dan kepercayaan dalam ekosistem terdesentralisasi.

Kekuatan konsep konsensus terletak pada kemampuannya menjamin bahwa setiap transaksi yang dimasukkan ke dalam *blockchain* telah diverifikasi secara kolektif. Setiap node berpartisipasi dalam proses validasi sesuai dengan algoritma yang diterapkan, sehingga tidak ada satu pihak pun yang dapat memanipulasi atau memonopoli pencatatan. Hal ini menjadikan *blockchain* lebih tahan terhadap manipulasi data, serangan eksternal, maupun kesalahan sistem yang berpotensi merusak keutuhan rantai blok (Duan, Onyeaka, Pang, dan Meng, 2024; Kumar , Singh, Mishra, dan Daim, 2023; Sun, Wang, Zhang, dan Kar, 2024). Berbagai algoritma konsensus dikembangkan dengan karakteristik yang berbeda untuk menjawab kebutuhan jaringan. PoW merupakan *mekanisme* paling awal yang menekankan pada kompetisi komputasi untuk memecahkan persoalan kriptografi. PoW terbukti efektif dalam menjamin keamanan dan desentralisasi, seperti pada Bitcoin, tetapi kelemahannya terletak pada konsumsi energi yang sangat tinggi dan skalabilitas yang terbatas (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Saurabh dan Dey, 2021).

Konsumsi energi yang tingi dan skalabilitas yang terbatas dalam model PoW, kemudian dikembangkan model PoS, yang memilih validator berdasarkan jumlah aset digital (*stake*) yang dikunci dalam jaringan. Kepemilikan aset digital semakin besar dalam model PoS, semakin tinggi peluang menjadi validator. PoS terbukti lebih hemat energi dibandingkan PoW karena tidak memerlukan perhitungan kriptografi intensif. Sistem Ethereum misalnya, telah bermigrasi dari PoW ke PoS sebagai langkah untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan (Asif dan Hassan, 2023). Model konsensus selain PoW dan PoS, terdapat pula PoA, yang memanfaatkan identitas node otoritatif sebagai validator. PoA umumnya digunakan dalam *blockchain* privat atau konsorsium karena menawarkan efisiensi tinggi, latensi rendah, serta throughput transaksi yang besar. Kendati demikian, model ini

memiliki tingkat desentralisasi yang lebih rendah karena bergantung pada pihak otoritatif yang ditunjuk (Xie , Tang, Huang, Yu, Xie, Liu, dan Liu, 2019).

Jenis lain adalah *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT), yang dirancang untuk mencapai konsensus meskipun terdapat sejumlah node yang berperilaku tidak benar atau gagal. PBFT banyak digunakan pada jaringan privat dengan keunggulan efisiensi dan finalitas transaksi yang cepat, namun kompleksitas komunikasi antar node membatasi skalabilitas algoritma ini dalam jaringan yang sangat besar (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Rahman, Chamikara, Khalil, dan Bouras, 2022; Saurabh dan Dey 2021). Varian lain seperti *Delegated Proof of Stake* (DPoS), melibatkan pemilihan sejumlah delegasi oleh pemilik token untuk mewakili proses validasi blok. Pendekatan ini meningkatkan throughput transaksi dan efisiensi sistem, meskipun berpotensi menimbulkan sentralisasi pada delegasi tertentu. Lebih lanjut, algoritma konsensus hibrida juga dikembangkan dengan menggabungkan keunggulan beberapa *mekanisme* untuk mencapai keseimbangan antara keamanan, efisiensi, dan desentralisasi. (Gol dan Gondaliya, 2024; J, Andrew, Isravel, Sagayam, Bhushan, Sei, dan Eunice, 2023; Padma dan Ramaiah, 2025)

Setiap algoritma konsensus memiliki keunggulan dan keterbatasan yang harus disesuaikan dengan tujuan implementasi *blockchain*. Penelitian ini, memiliki pemahaman mendalam terhadap konsep konsensus, karena pemilihan *mekanisme* konsensus yang tepat akan berpengaruh langsung terhadap kinerja, efisiensi, dan tingkat kepercayaan *framework dual-blockchain* dalam penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal.

2.3.3.2 Mekanisme konsensus PoA

PoA merupakan salah satu *mekanisme* konsensus yang dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan algoritma konsensus tradisional seperti PoW dan PoS. Model PoW yang menuntut daya komputasi tinggi atau PoS yang sangat bergantung pada kepemilikan aset digital, PoA menekankan reputasi dan identitas validator sebagai dasar legitimasi dalam proses validasi blok (Gol dan Gondaliya, 2024; J, Andrew, Isravel, Sagayam, Bhushan, Sei, dan Eunice, 2023; Xie , Tang, Huang, Yu, Xie, Liu, dan Liu, 2019). Validitas transaksi dalam jaringan PoA ditentukan

oleh sekumpulan node otoritatif yang identitasnya telah diverifikasi, sehingga sistem yang terbentuk lebih cepat, efisien, dan hemat energi.

Model PoA bekerja dengan menunjuk validator yang memiliki otoritas untuk memverifikasi transaksi dan membuat blok baru. Validator biasanya berasal dari entitas dengan kredibilitas tinggi, seperti lembaga resmi, organisasi terpercaya, atau institusi yang memiliki reputasi jelas dalam ekosistem *blockchain*. *Mekanisme* ini memastikan bahwa setiap transaksi hanya dapat divalidasi oleh pihak berwenang, sehingga meminimalkan risiko manipulasi data maupun serangan dari *node anonim* (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Hu et al., 2023). Setiap kali transaksi diajukan, validator otoritatif memeriksa keabsahannya sebelum menambahkannya ke dalam *blockchain* dengan tanda tangan digital sebagai bukti legitimasi. Proses ini berlangsung dengan latensi rendah, karena tidak memerlukan persaingan kriptografi yang kompleks seperti pada PoW, sekaligus memungkinkan tercapainya finalitas transaksi dalam waktu yang relatif (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Nikseresht, Shokouhyar, Tirkolaee, dan Pishva, 2024). Keunggulan utama PoA dibandingkan algoritma konsensus lain terletak pada efisiensi energi, kecepatan validasi, serta kemampuannya menangani throughput transaksi tinggi. PoA mampu memproses transaksi dengan latensi rendah karena hanya validator terpilih yang memiliki hak menambahkan blok baru, berbeda dengan PoW yang memerlukan kompetisi intensif antar miner atau PoS yang membutuhkan pemilihan validator berbasis aset digital. Hal ini menjadikan PoA sangat relevan untuk aplikasi yang membutuhkan respons *real-time*. (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Nikseresht, Shokouhyar, Tirkolaee, dan Pishva, 2024)

PoA memiliki keterbatasan yang tidak dimiliki oleh algoritma konsensus lain. Keterbatasan jumlah validator menjadikan sistem cenderung lebih terpusat dibandingkan dengan PoW atau PoS yang melibatkan partisipasi luas. Kondisi ini menimbulkan risiko sentralisasi, karena otoritas hanya berada pada segelintir pihak yang ditunjuk. Model PoA sangat bergantung pada reputasi dan integritas validator, apabila salah satu validator kehilangan kredibilitas atau terlibat dalam praktik curang, kepercayaan terhadap keseluruhan sistem dapat terganggu (Al-Kafi, Ali, dan Reno, 2025; J, Andrew, Isravel, Sagayam, Bhushan, Sei, dan Eunice, 2023; Lu,

Lei, dan Tsai 2024). Dibandingkan dengan PBFT, PoA lebih sederhana dan efisien karena tidak memerlukan komunikasi berulang antar semua node untuk mencapai konsensus. PBFT menawarkan toleransi lebih tinggi terhadap node berperilaku jahat (*Byzantine nodes*), sehingga lebih tangguh dalam jaringan dengan tingkat risiko tinggi (Alrubei, Ball, dan Rigelsford, 2022; Rahman, Chamikara, Khalil, dan Bouras, 2022; Saurabh dan Dey, 2021).Model PoA merupakan algoritma konsensus yang efisien, adaptif, dan praktis, meskipun memiliki keterbatasan pada aspek desentralisasi. Studi kasus di berbagai sektor menunjukkan bahwa PoA sangat relevan diterapkan pada konteks rantai pasok halal, di mana kecepatan, keamanan, dan tata kelola yang terpercaya menjadi kebutuhan utama. Model PoA diposisikan sebagai pilar penting dalam *framework dual-blockchain* yang dikembangkan, guna mendukung transparansi, akuntabilitas, serta kepatuhan syariah dalam penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal.

Risiko *governance* pada PoA tetap perlu diperhatikan karena jumlah validator yang terbatas dapat menimbulkan sentralisasi otoritas dan ketergantungan tinggi pada integritas pihak yang ditunjuk. Risiko tersebut dalam penelitian ini dipahami bukan sebagai kelemahan yang diabaikan, tetapi sebagai konsekuensi desain pada *blockchain* berizin yang bekerja dalam lingkungan operasional halal yang terkendali. Mitigasi konseptualnya terletak pada penunjukan validator yang memiliki legitimasi kelembagaan, pemisahan peran antara penyelia RPH dan JULEHA, serta keberadaan jejak audit digital yang mencatat setiap proses validasi secara permanen. Melalui cara ini, PoA diposisikan bukan hanya sebagai mekanisme efisiensi teknis, tetapi juga sebagai instrumen tata kelola yang menghubungkan validasi transaksi digital dengan struktur otoritas halal yang telah dikenal dalam praktik lapangan.

2.3.3.3 Peran Penyelia RPH dan JULEHA dalam Konsensus PoA

Mekanisme konsensus PoA dalam rantai pasok daging segar halal menuntut keterlibatan aktor-aktor kunci yang memiliki otoritas dan kredibilitas tinggi untuk bertindak sebagai validator. Peran validator tidak hanya sebatas memverifikasi transaksi digital, tetapi juga memastikan kepatuhan terhadap standar syariah dan regulasi halal. (Xie , Tang, Huang, Yu, Xie, Liu, dan Liu, 2019). Penyelia RPH

memiliki tanggung jawab utama dalam mengawasi seluruh rangkaian proses pemotongan hewan, mulai dari penerimaan ternak, pemeriksaan kesehatan, hingga tahap penyembelihan (Indonesia, 2021). Penyelia RPH menjamin bahwa prosedur yang dilakukan telah sesuai dengan regulasi kesehatan, standar kesejahteraan hewan, serta ketentuan halal yang berlaku. Penempatan penyelia RPH sebagai validator, setiap aktivitas pemotongan dapat diverifikasi secara langsung dan dicatat permanen ke dalam *blockchain*, sehingga memperkuat legitimasi data sekaligus menutup peluang terjadinya manipulasi atau penyimpangan di lapangan. JULEHA yang memperoleh sertifikasi resmi dari lembaga otoritatif berperan sebagai pelaksana teknis yang memastikan penyembelihan dilakukan sesuai syariat Islam. Keberadaan JULEHA sebagai validator menjamin bahwa data penyembelihan, dimulai dari identitas penyembelih, metode yang digunakan, hingga waktu pelaksanaan, memiliki validitas syariah yang dapat dipertanggungjawabkan (Indonesia, 2021).

Urgensi penempatan penyelia RPH dan JULEHA sebagai validator terletak pada legitimasi dan akuntabilitas yang dihadirkan. Validator dalam *mekanisme* PoA harus memiliki identitas jelas dan reputasi yang dapat diverifikasi, sehingga keberadaan penyelia RPH dan JULEHA yang telah berlisensi dan tersertifikasi secara profesional memenuhi syarat sebagai node otoritatif (Xie , Tang, Huang, Yu, Xie, Liu, dan Liu, 2019). Penyelia RPH dan JULEHA bagian dari *mekanisme* konsensus, *blockchain* halal memperoleh perlindungan tambahan dari risiko pemalsuan sertifikasi, praktik curang, maupun kesalahan administratif yang dapat mengancam integritas rantai pasok halal (Ali , Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021).

Peran validator yang dijalankan oleh penyelia RPH dan JULEHA memiliki implikasi signifikan terhadap kepercayaan konsumen. Jaminan kehalalan bagi konsumen Muslim adalah faktor utama dalam memilih produk pangan. Keterlibatan aktor otoritatif dapat menjadikan kepercayaan publik terhadap keaslian produk halal dapat ditingkatkan secara substansial. Keberadaan penyelia RPH dan JULEHA dalam konsensus PoA bukan hanya fungsi teknis, tetapi juga instrumen

strategis dalam memperkuat transparansi, akuntabilitas, serta kepercayaan konsumen pada sistem halal berbasis *dual-blockchain* .

2.3.4. Algortima Optimasi CSA

2.3.4.1 Implementasi CSA

Penelitian yang dilakukan menggunakan *blockchain* dengan konsensus PoA dengan menerapkan optimasi CSA untuk menentukan nilai minimum dan maksimum suhu dan kelembaban. CSA merupakan algoritma optimasi metaheuristik berbasis populasi yang memodelkan setiap kandidat solusi sebagai vektor posisi dalam ruang pencarian berdimensi *d*. Proses optimasi dilakukan melalui pembaruan posisi kandidat solusi secara iteratif dengan memanfaatkan memori solusi terbaik yang pernah dicapai serta *mekanisme* kendali probabilistik untuk menjaga keseimbangan eksplorasi global dan eksploitasi lokal (Javidi, Salajegheh, dan Salajegheh, 2019; Ouadfel dan Abd Elaziz, 2020).

Prinsip kerja CSA dalam implementasi komputasi mencakup beberapa komponen utama. Algoritma menggunakan populasi berukuran *N* sebagai himpunan kandidat solusi. Setiap kandidat solusi menyimpan memori posisi terbaik yang pernah dicapai selama proses iterasi. Algoritma memilih solusi rujukan sebagai acuan pergerakan kandidat solusi pada setiap iterasi. Algoritma menerapkan parameter *awareness probability* (*AP*) untuk menentukan apakah kandidat solusi bergerak menuju solusi rujukan atau melakukan diversifikasi pencarian. Algoritma menerapkan parameter *flight length* (*FL*) untuk mengendalikan besar langkah pergerakan kandidat solusi dalam ruang pencarian.

Berdasarkan model tersebut, diasumsikan terdapat ruang pencarian berdimensi *d* yang memuat sejumlah kandidat solusi. Jumlah kandidat solusi dalam populasi dinyatakan dengan *N*. Posisi kandidat solusi ke-*i* pada iterasi *iter* dalam ruang pencarian dinyatakan oleh vektor $x^{i,iter}$ seperti yang terlihat dalam Persamaan (1) dengan *i* =1,2,3, … N; $iter$ = 1,2,3, ….. , $iter_{mak}$ dan $iter_{mak}$ adalah iterasi maksimum yang ditetapkan.

$$x^{i,iter} = \left[x_1^{i,iter}, x_2^{i,iter}, \ldots., x_d^{i,iter}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \{1\}$$

Setiap kandidat solusi memiliki memori yang menyimpan posisi terbaik yang pernah dicapai selama proses optimasi. Pada iterasi *iter*, posisi terbaik kandidat solusi ke-*i* dinyatakan dengan $m^{i,iter}$. Posisi ini diperoleh dari evaluasi fungsi objektif dan digunakan sebagai referensi dalam proses pembaruan posisi kandidat solusi pada iterasi berikutnya.

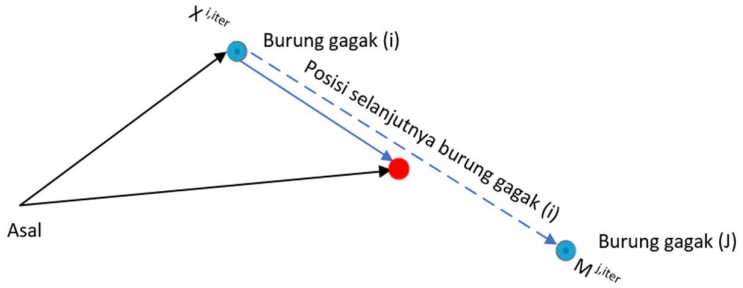
Iterasi *iter*, kandidat solusi ke-*i* memperbarui posisinya dengan menggunakan kandidat solusi ke-*j* sebagai solusi rujukan. Dalam proses pembaruan posisi ini, terdapat dua kondisi yang dapat terjadi. Kondisi pertama terjadi ketika kandidat solusi ke-*j* tidak berada pada mode diversifikasi, sehingga kandidat solusi ke-*i* bergerak menuju posisi solusi rujukan. Pada kondisi ini, posisi baru kandidat solusi ke-*i* ditentukan menggunakan Persamaan (2).

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \text{ x } fl^{i,iter} \text{ x } (m^{i,iter} - x^{i,iter}) \text{ .....} \{2\}$$

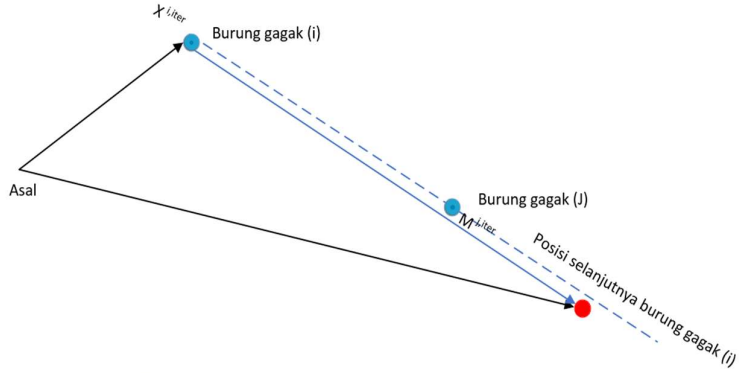
Pada persamaan tersebut, r_i merupakan bilangan acak dengan distribusi seragam antara 0 dan 1, sedangkan $fl^{i,iter}$ menunjukkan parameter *flight length* yang mengendalikan jarak perpindahan kandidat solusi pada iterasi *iter*. Nilai *flight length* yang kecil menghasilkan pencarian lokal di sekitar posisi saat ini, sedangkan nilai *flight length* yang besar menghasilkan pencarian global dalam ruang pencarian. Skema pengaruh parameter *flight length* terhadap kemampuan pencarian ditunjukkan pada Gambar 2.3, yang menggambarkan kondisi fl < 1 dan fl > 1.

Kondisi kedua terjadi ketika kandidat solusi ke-*j* berada pada mode diversifikasi, sehingga kandidat solusi ke-*i* tidak bergerak menuju solusi rujukan, melainkan berpindah ke posisi lain dalam ruang pencarian secara acak terkontrol. *Mekanisme* ini digunakan untuk meningkatkan diversifikasi pencarian dan menghindari konvergensi prematur. Kedua kondisi pembaruan posisi tersebut dirumuskan secara matematis pada Persamaan (3). Pada Persamaan (3), r_j merupakan bilangan acak dengan distribusi seragam antara 0 dan 1, sedangkan $AP^{j,iter}$ menunjukkan nilai *awareness probability* pada iterasi *iter*. *Mekanisme* ini memastikan bahwa CSA mampu menjaga keseimbangan antara eksploitasi solusi terbaik dan eksplorasi ruang pencarian secara efektif.

$$x^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter} + r_i \text{ x } fl^{i,iter} \text{ x } \left(m^{i,iter} - x^{i,iter}\right) & r_j \geq AP^{j,iter} \\ Posisi\ acak & Kondisi\ lain \end{cases} \quad \ldots\{3\}$$



(a) fl <1



(b) fl > 1

Gambar 2.3. Algoritma CSA dengan (a) fl < 1 dan (b) fl > 1

2.3.4.2 Implementasi CSA pada *Blockchain* dan IoT

CSA mengadopsi *mekanisme* memori individu dan penggunaan probabilitas kesadaran (*awareness probability*) untuk mengarahkan eksplorasi dan eksploitasinya. *Derivat hybrid* dari CSA, seperti yang dijelaskan oleh Braik et al. (2023), menggunakan elemen memori individu untuk memperkuat kemampuan eksploitasi solusi terbaik. Versi adaptif CSA yang dikembangkan oleh Sheta, Braik, Al-Hiary, dan Mirjalili (2023), menyesuaikan parameter *flight length* dan *awareness probability* secara dinamis agar proses pencarian tetap seimbang. Karakteristik ini menjadikan CSA unggul dalam menangani permasalahan optimasi di ruang kompleks seperti sistem terdistribusi *blockchain* dan IoT yang ditandai oleh *heterogenitas* data, keterbatasan sumber daya, serta kebutuhan efisiensi energi

dan kecepatan komputasi. Jayalatchumy, Ramalingam, Balakrishnan, Safran, dan Alfarhood (2024) menggunakan CSA untuk seleksi fitur dalam sistem deteksi intrusi IoT, yang bertujuan mengurangi data *redundan* dan meningkatkan efisiensi pemrosesan. CSA dapat diterapkan dalam sistem *blockchain*-IoT untuk menyaring data sensor sebelum disimpan, sehingga catatan *blockchain* menjadi lebih ringkas, efisien, dan valid untuk keperluan audit halal maupun kepatuhan regulasi.

CSA atau algoritma optimasi serupa juga digunakan dalam *mekanisme* deteksi anomali transaksi dalam *ledger blockchain*. Louati, Louati, Kariri, dan Almekhlafi (2025) mengembangkan kerangka deteksi anomali berbasis AI untuk *smart contract blockchain* dengan pendekatan optimasi, yang menunjukkan efektivitas dalam mengidentifikasi pola transaksi abnormal dengan akurasi tinggi. Pendekatan semacam ini memperkuat kemampuan sistem *blockchain* dalam mencegah manipulasi data dan serangan eksternal. Studi kasus penerapan CSA pada *blockchain* dan IoT membuktikan bahwa algoritma ini memiliki kapabilitas signifikan dalam meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keberlanjutan sistem terdistribusi. CSA diposisikan sebagai komponen optimasi penting yang memperkuat *framework dual-blockchain* dalam mendukung penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal secara transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan.

2.3.4.3 Komparasi CSA dengan algortima Optimasi Lainnya

Algoritma optimasi *metaheuristik* CSA menempati posisi penting karena kemampuannya yang adaptif dan sederhana dalam menyelesaikan permasalahan nonlinier serta dinamis. CSA dirancang dengan mengadopsi *mekanisme* memori individu dan probabilitas kesadaran yang memungkinkan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi dalam pencarian solusi global. Keunggulan ini menjadikan CSA efektif digunakan dalam sistem terdistribusi yang kompleks, termasuk *blockchain* dan IoT, yang ditandai oleh heterogenitas data, keterbatasan sumber daya, serta kebutuhan akan efisiensi energi dan kecepatan komputasi.

Komparasi CSA dengan algoritma optimasi lain yang telah banyak digunakan, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Genetic Algorithm* (GA), dan *Grey Wolf Optimization* (GWO). Beberapa studi terkini menunjukkan bahwa

CSA memiliki keunggulan dibanding PSO dalam hal kemampuan menjaga keragaman solusi sehingga lebih tahan terhadap risiko *premature convergence* yang sering terjadi pada PSO akibat dominasi faktor sosial dalam pencarian solusi. Sheta, Braik, Al-Hiary, dan Mirjalili (2023) mengembangkan varian CSA adaptif yang terbukti lebih efisien dalam menyeimbangkan eksplorasi dan eksploitasi dibanding algoritma *metaheuristik* lain.

Penelitian yang dilakukan Djurdjev, Cep, Lukic, Antic, Popovic, dan Milosevic (2021) memperlihatkan bahwa CSA dapat digabungkan dengan *mekanisme* genetika untuk menghasilkan Genetic *Crow Search Algorithm* (GCSA), yang meningkatkan performa dalam masalah optimasi diskrit dan menunjukkan relevansi komparatif dengan *Genetic Algorithm*. Sementara itu, Fan , Yang, Wang, Xu, dan Lu (2023) mengusulkan *Variable Step CSA* (VSCSA) yang mampu memperluas ruang pencarian dan meningkatkan akurasi solusi, memperlihatkan bahwa CSA memiliki fleksibilitas tinggi untuk dikembangkan dibanding algoritma lain seperti GWO yang cenderung stabil namun kurang adaptif.

CSA menawarkan keunggulan dalam hal keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi yang lebih adaptif dibandingkan dengan PSO. PSO, diketahui rentan terhadap *premature convergence*, di mana partikel cenderung berkumpul di solusi lokal terlalu cepat sehingga gagal menjelajahi ruang solusi yang lebih luas (Shami, El-Saleh, Alswaitti, Al-Tashi, Summakieh, dan Mirjalili, 2022). Untuk mengatasi hal itu, beberapa riset telah memperkenalkan *mekanisme* kontrol kecepatan dan faktor kontriksi guna menjaga keseimbangan eksplorasi dalam PSO (Tarekegn Nigatu, Gemechu Dinka, dan Luleseged Tilahun, 2024). Alternatif lainnya adalah pengembangan *mekanisme* memori dalam PSO untuk memelihara diversitas populasi dan mengurangi risiko konvergensi dini (Chaitanya, Somayajulu, dan Krishna, 2021). Strategi mutakhir seperti *Dynamical Sphere Regrouping* PSO bahkan dirancang untuk menghindari *premature convergence* melalui pengelompokan ulang bola pencarian (Montes Rivera, Guerrero-Mendez, Lopez-Betancur, dan Saucedo-Anaya, 2024). CSA dengan *mekanisme* memori individu memungkinkan setiap agen untuk mengingat posisi terbaik diri sendiri dan menyesuaikan langkah pencarian secara adaptif. CSA lebih mampu

mempertahankan keragaman solusi dan mencegah terperangkap di solusi lokal apabila parameter diatur dengan baik.

Jika dibandingkan dengan *Algoritma Genetik* (GA), CSA menawarkan keunggulan berupa struktur yang lebih sederhana karena tidak memerlukan operator genetik seperti *crossover* dan *mutation*, sehingga mengurangi kompleksitas komputasi serta jumlah parameter yang harus diatur. GA unggul dalam eksplorasi ruang solusi yang luas dan mampu menangani ruang solusi yang heterogen, namun memerlukan waktu komputasi lebih lama serta berpotensi menghasilkan solusi *redundan*. *Blockchain*-IoT yang menuntut efisiensi energi dan latensi rendah, penggunaan CSA lebih praktis karena beban perhitungan yang relatif ringan dan kebutuhan parameter yang minimal (Sheta, Braik, Al-Hiary, dan Mirjalili, 2023). GA tetap memiliki keunggulan dalam menghadapi data sensor yang berisik (*noisy data*) melalui *mekanisme* evolusi yang toleran terhadap variasi, sehingga dalam kondisi data yang tidak stabil GA masih relevan. Kombinasi GA dan CSA telah diusulkan, seperti dalam GCSA (Djurdjev, Cep, Lukic, Antic, Popovic, dan Milosevic,, 2021), yang memanfaatkan kekuatan keduanya untuk menghasilkan solusi yang lebih seimbang dan adaptif.

Dibandingkan dengan *Grey Wolf Optimization* (GWO), CSA menawarkan fleksibilitas adaptasi yang lebih tinggi melalui *mekanisme* memori individu dan parameter adaptif. GWO dikenal efektif dalam menjaga keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi melalui hierarki sosial serigala, dan dalam praktiknya menunjukkan kestabilan konvergensi menuju solusi global secara relatif cepat. Salah satu kelemahan GWO adalah potensi kehilangan keragaman solusi pada iterasi akhir, yang dapat mengurangi kapasitas eksplorasi. Beberapa peneliti mengusulkan model hibrida, salah satunya *Dynamic Fuzzy Learning based Hybrid GWO-CSA* yang diperkenalkan oleh Sujatha, Usha, dan Geetha (2024). Model ini mengintegrasikan elemen CSA untuk memperkuat diversitas populasi dan mengurangi kecenderungan GWO terkunci pada solusi lokal. Integrasi CSA ke dalam GWO dapat memperpanjang fase eksplorasi tanpa mengorbankan kecepatan konvergensi, sehingga pendekatan *hybrid* GWO-CSA relevan untuk aplikasi optimasi kompleks seperti sistem *blockchain*-IoT.

Nilai tambah CSA dalam penelitian ini, tidak diletakkan pada klaim optimasi umum yang sangat luas, tetapi pada fungsi yang lebih spesifik dan relevan terhadap artefak yang dikembangkan. CSA digunakan untuk mengolah data suhu dan kelembaban yang bersifat periodik dan fluktuatif agar sistem memperoleh nilai minimum dan maksimum sebagai indikator kondisi ekstrem distribusi. Indikator tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam blockchain sebagai bagian dari bukti digital mutu distribusi. Posisi ini menunjukkan bahwa penggunaan CSA pada penelitian ini tidak sekadar menggantikan perhitungan deskriptif sederhana, tetapi diarahkan untuk membangun indikator distribusi yang lebih reliabel, konsisten, dan sesuai dengan kebutuhan sistem blockchain-IoT yang menuntut efisiensi komputasi, keterukuran, dan auditabilitas data.

2.3.5. Teknologi IoT dalam Rantai Pasok daging Segar Halal

2.3.5.1 Internet of Things

IoT dipahami sebagai ekosistem perangkat fisik berjejaring yang secara otonom mengumpulkan, memproses, dan bertukar data lintas tahapan proses, lalu menghadirkan sistem yang cerdas, adaptif, dan responsif. Penelitian dalam industri pangan, IoT memegang peran strategis untuk peningkatan efisiensi operasional, jaminan keamanan produk, serta keterlacakan dari hulu ke hilir. Integrasi IoT dengan *blockchain* memperkuat fungsi tersebut karena catatan digital yang dihasilkan sensor dapat dibuktikan keutuhannya (*immutability*) dan diaudit secara terbuka, sehingga meningkatkan transparansi, mengurangi risiko kecurangan, dan menumbuhkan kepercayaan konsumen. Tinjauan komprehensif mutakhir menunjukkan bahwa adopsi gabungan *blockchain-IoT* pada rantai pasok pangan menambah lapisan kontrol terhadap kualitas dan keselamatan, sekaligus memitigasi *fraud* melalui pencatatan yang transparan dan *real-time* (Kaur, Singh, Kukreja, Sharma, Singh, dan Byungun, 2022).

Implementasi dalam operasional rantai pasok dingin, perangkat sensor suhu dan kelembaban yang ditempatkan di titik-titik kritis, memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*. Bukti empiris terkini menegaskan bahwa pemantauan berbasis IoT pada rantai dingin menurunkan peluang "*temperature abuse*", mencegah degradasi mutu, dan mempercepat respons korektif saat terjadi

deviasi. Data sensor tersebut ditautkan ke *blockchain*, seluruh pemangku kepentingan (produsen, auditor/otoritas halal, hingga konsumen) memperoleh akses terhadap jejak data yang tidak dapat diubah, sehingga audit kepatuhan halal dapat dilakukan secara cepat dan berbasis bukti (Shi, Zhang, dan Qin, 2024).

Sistematis telaah ekosistem halal, menampilkan lima manfaat utama IoT bagi *Halal Food Supply Chain* (HFSC) yaitu, peningkatan *traceability*, efisiensi operasi, fasilitasi manajemen ternak, autentikasi status halal, dan pemantauan sertifikasi. Penempatkan sensor sebagai penghasil data objektif dan *blockchain* sebagai infrastruktur pencatatan terdistribusi, model penelusuran halal menjadi lebih kredibel dan akuntabel lintas organisasi serta yurisdiksi. Kerangka konseptual untuk Indonesia juga telah ditawarkan, yang memadukan IoT dan *blockchain* guna memperkuat transparansi, efisiensi, dan kepercayaan konsumen, sekaligus menyokong agenda keberlanjutan (Ali, Helmi, Chung, Kumar, Zailani, dan Tan, 2021).

Penelitian implemetasi untuk solusi IoT yang hemat biaya seperti LoRaWAN, digunakan untuk memantau suhu dan kelembaban sepanjang rantai pasok agrifood. Data yang terukur ini kemudian diolah dan ditautkan ke *smart contract*, sehingga pemicu otomatis seperti alarm, dapat dijalankan saat terjadi pelanggaran ambang batas mutu. Pendekatan ini selaras dengan tren desain sistem *traceability* yang mengedepankan keterukuran, reaksi cepat, dan auditabilitas digital (Kaur, Singh, Kukreja, Sharma, Singh, dan Byungun, 2022). Integrasi IoT dan *blockchain* pada rantai pasok daging segar halal menyediakan arsitektur data yang valid, transparan, dan dapat diaudit. IoT memasok data lingkungan yang granular dan *real-time*, sementara *blockchain* menjamin integritas serta visibilitas lintas pemangku kepentingan. Kombinasi keduanya memperkokoh kualitas, keamanan, keterlacakan, dan pada akhirnya untuk meningkatkan kepercayaan pasar terhadap produk halal (Shi et al. 2024).

2.3.5.2 Standar Daging Segar Halal dan Parameter Mutu Distribusi

Standar nasional memberikan definisi operasional yang tegas untuk kategori daging segar dingin. Standar Nasional Indonesia SNI 3932:2008 mendefinisikan daging segar dingin sebagai daging yang mengalami proses pendinginan setelah

penyembelihan sehingga temperatur bagian dalam daging berada pada rentang 0 °C sampai 4 °C. Definisi tersebut memberikan dasar batas kepatuhan yang dapat diterjemahkan ke dalam indikator pemantauan pada sistem IoT dan menjadi referensi evaluasi mutu selama penyimpanan dan distribusi (Nasional, 2008).

Kerangka regulasi jaminan produk halal juga mewajibkan pengendalian proses dan keterlacakan pada rantai pasok. Undang-Undang Nomor 33 Tahun 2014 mengatur penyelenggaraan Jaminan Produk Halal dan menempatkan kewajiban pengelolaan proses halal dalam lingkup produk yang masuk, beredar, dan diperdagangkan (Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia, 2014). Peraturan Pemerintah Nomor 42 Tahun 2024 mengatur penyelenggaraan bidang Jaminan Produk Halal sebagai regulasi pelaksana yang memperkuat kebutuhan sistematisasi bukti proses dan pengawasan yang dapat diaudit (Pemerintah Republik Indonesia, 2024).

Penelitian oleh Li , Zhang, Li, Li, Liu, dan Zhang, (2017) menunjukkan bahwa kenaikan suhu penyimpanan dan distribusi mempercepat penurunan mutu warna serta meningkatkan peluang pertumbuhan mikroba pembusuk. Penelitian pada daging domba menunjukkan bahwa penyimpanan pada rentang mendekati titik beku dengan suhu - 0,8 °C menghasilkan stabilitas warna yang lebih baik dibandingkan penyimpanan pada 4 °C, yang menegaskan bahwa suhu lebih rendah menekan pembentukan metmyoglobin. Studi lain menunjukkan bahwa peningkatan suhu penyimpanan mempercepat perubahan warna daging giling dan mempercepat terjadinya diskolorasi pada fase display, sehingga suhu rendah memberikan keuntungan mutu visual yang penting untuk penerimaan konsumen.

Sistem menetapkan standar ideal diantara suhu 0 °C hingga 4 °C sebagai batas kepatuhan untuk kategori daging segar dingin sesuai SNI (Nasional, 2008). Sistem menetapkan target operasional deal dengan suhu berkisar 0 °C hingga 2 °C sebagai target kendali untuk meningkatkan stabilitas mutu selama distribusi. Sistem menetapkan ambang risiko operasional untuk skenario distribusi jarak pendek non-refrigerated sebagai indikator deviasi, sehingga sistem dapat menandai potensi penyimpangan mutu dan menyajikan bukti audit berbasis *blockchain*. Bukti ilmiah tentang percepatan diskolorasi dan pertumbuhan mikroba pada suhu yang

lebih tinggi mendukung perlunya klasifikasi risiko ini, karena suhu yang mendekati 8 °C hingga 10 °C menunjukkan tren penurunan mutu lebih cepat dibandingkan suhu rendah (Li , Zhang, Li, Li, Liu, dan Zhang, 2017) .

2.3.5.3 Implementasi Teknologi IoT dalam Industri Halal

Pemanfaatan IoT dalam industri halal telah berkembang menjadi strategi esensial untuk memperkuat jaminan kualitas dan kepatuhan syariah produk, terutama di rantai pasok daging segar halal. Konektivitas antar sensor, sistem komunikasi, dan platform analitik secara *real-time*, IoT memainkan peran sentral dalam memantau seluruh tahapan rantai pasok yang mulai dari pemotongan hewan, penyimpanan, transportasi, hingga distribusi akhir. Sensor-sensor IoT memungkinkan pengumpulan data lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan kondisi sanitasi dengan akurasi tinggi. Kestabilan suhu dan kelembaban merupakan variabel kritis dimana fluktuasi yang berlebihan dapat mempercepat degradasi mutu mikrobiologis dan membuka celah kontaminasi silang yang membahayakan integritas halal produk.

Sejumlah studi literatur terkini memperkuat fungsi IoT dalam sistem jaminan halal (*halal assurance system*). Rejeb, Rejeb, Zailani, Treiblmaier, dan Hand, (2021) menjabarkan bahwa IoT menyediakan lima manfaat utama bagi rantai pasok halal yaitu: *traceability* produk, peningkatan efisiensi rantai, manajemen ternak, autentikasi status halal, dan pemantauan sertifikasi halal. Penelitian untuk *traceability* dan integrasi sensor, Wong, Ting, dan Atanda (2024) menegaskan bahwa integrasi *blockchain* IoT memberikan visibilitas hulu ke hilir dan memungkinkan pemantauan *real-time* yang aman dan transparan. Data suhu dan kelembaban yang dihasilkan sensor dapat langsung dikirim ke sistem *blockchain* atau platform analitik untuk diverifikasi dan dicatat secara permanen. Hal ini memungkinkan respons cepat terhadap penyimpangan kondisi lingkungan, menjaga kualitas dan memperpanjang umur simpan daging halal. Kajian penggunaannya dalam logistik dan SCM juga menunjukkan bahwa transformasi IoT menuju aplikasi matang dalam SCM menggeser fokus penelitian dari eksplorasi dasar ke implementasi yang lebih matang dan efisien (Zrelli dan Rejeb, 2024).

Integrasi IoT dengan *blockchain* di industri halal menghadapi sejumlah tantangan teknis dan tata kelola. Tantangan pertama adalah keterbatasan sumber daya perangkat IoT misalnya energi, kapasitas penyimpanan, dan daya komputasi yang membatasi kemampuan interaksi intensif dengan *blockchain*. Untuk mengatasinya, pendekatan *off-chain storage* atau *blockchain* ringan (*lightweight protocols*) sering diusulkan agar perangkat hanya mencatat *hash* atau metadata penting, sementara data sensor besar disimpan di luar *blockchain*. Tantangan kedua terkait keamanan dan privasi adalah data sensor yang rentan manipulasi harus dilindungi dengan kriptografi ringan, enkripsi, dan kontrol akses berbasis *smart contract*. Tantangan *interoperabilitas* juga signifikan, mengingat ekosistem halal melibatkan banyak pemangku kepentingan dengan heterogenitas hardware, standar komunikasi, dan platform *blockchain*. Latensi dan throughput menjadi kendala ketika volume data sensor tinggi yang di mana solusi seperti *mekanisme* konsensus atau optimasi algoritma sering diperlukan untuk menyeimbangkan kecepatan dan keamanan .

2.3.6. Sistem Penelusuran dan Keberlanjutan Produk Halal

2.3.6.1 Sistem Penelusuran produk halal

Sistem penelusuran dalam konteks rantai pasok halal merujuk pada seperangkat *mekanisme* yang memungkinkan identifikasi, pelacakan, dan verifikasi informasi produk secara menyeluruh dari hulu hingga hilir. Halal didefinisikan tidak hanya pada aspek teknis, tetapi juga mencakup kepatuhan terhadap standar syariah yang menuntut jaminan bahwa setiap tahapan proses berjalan sesuai ketentuan halal.

Urgensi sistem penelusuran halal terlihat dari kemampuannya menjamin integritas produk sejak tahap asal ternak, penyembelihan, pengolahan, penyimpanan, transportasi, hingga distribusi akhir. Sistem penelusuran, setiap informasi penting seperti identitas hewan, metode penyembelihan, kondisi penyimpanan, dan status sertifikasi halal dapat dicatat dan diverifikasi secara sistematis. Kajian terkini menegaskan bahwa rantai pasok halal yang kompleks dan sangat tergantung pada transparansi menuntut infrastruktur *traceability* yang kuat untuk menjaga integritas halal (Kurniawati dan Cakravastia, 2023). Seiring

meningkatnya kompleksitas rantai pasok pangan global termasuk distribusi lintas negara, diversifikasi pelaku usaha, dan ekspektasi konsumen Muslim yang tinggi sistem penelusuran halal menjadi semakin penting. Efektivitas *traceability* halal terbukti mampu meningkatkan kepercayaan konsumen, mengurangi risiko pemalsuan sertifikasi, dan memperkuat posisi produk halal di pasar internasional (Harsanto, Farras, Firmansyah, Pradana, dan Apriliadi, 2024).

Sistem penelusuran halal juga berfungsi sebagai *mekanisme* untuk memastikan bahwa praktik produksi dan distribusi tidak hanya mematuhi standar halal, tetapi juga memperhatikan aspek etika, kesehatan, dan lingkungan. Konsep halal *sustainable traceability* dikaji sebagai jembatan antara kepatuhan syariah dan keberlanjutan ekologi dalam produk pangan halal. Sistem penelusuran yang transparan, konsumen diyakinkan bahwa daging segar halal yang dikonsumsi tidak hanya sah menurut syariah, tetapi juga memenuhi standar mutu dan *sustainability* global. Penerapan *traceability* berbasis *blockchain* sebagai dukungan bagi penguatan regulasi halal. Penelitian oleh Adhiwibowo, Widayat, dan Syafei (2025) mengusulkan rancangan *dual-blockchain* berbasis PoA untuk penelusuran daging segar halal, sementara (Susanty, Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan, 2024) menekankan peran *blockchain* dalam menjamin keamanan pangan melalui implementasi sistem *traceability* pada rantai pasok unggas halal.

Regulasi penelusuran halal di Indonesia telah diatur secara tegas melalui Undang-Undang No. 33 Tahun 2014 tentang Jaminan Produk Halal (Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia, 2014) yang diperkuat oleh Peraturan Pemerintah No. 39 Tahun 2021 (Indonesia, 2021). Regulasi ini mewajibkan setiap produk yang beredar di Indonesia memiliki sertifikasi halal dengan sistem penelusuran yang memastikan keterjaminan mulai dari bahan baku, proses produksi, hingga distribusi. Implementasinya berada di bawah koordinasi Badan Penyelenggara Jaminan Produk Halal (BPJPH) bekerja sama dengan Lembaga Pemeriksa Halal (LPH) dan Majelis Ulama Indonesia (MUI) sebagai otoritas fatwa. Sistem Jaminan Halal (SJH) yang secara eksplisit mensyaratkan adanya *mekanisme* penelusuran untuk memastikan bahwa setiap tahapan produksi

dan distribusi bebas dari kontaminasi bahan haram maupun najis (Laatikainen, Li, dan Abrahamsson, 2023; Indonesia, 2021)

2.3.6.2 Keberlanjutan Produk Halal

Keberlanjutan dalam konteks pangan halal tidak hanya menyentuh aspek lingkungan, tetapi juga merangkum dimensi sosial, ekonomi, dan religius yang terintegrasi dalam satu kerangka nilai. Prinsip keberlanjutan pangan global menuntut agar produksi, distribusi, dan konsumsi mampu memenuhi kebutuhan kini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang. Kerangka indutri halal ini diperkaya oleh nilai-nilai syariah (keadilan, keberkahan, kemaslahatan) yang menuntut keterlacakan, akuntabilitas, serta integritas proses di sepanjang rantai pasok. Penekanan tersebut sejalan dengan keberlanjutan halal bertumpu pada kombinasi kepastian kehalalan (*halal assurance*), sehingga kepercayaan konsumen dan reliabilitas pasar meningkat (Bux, Varese, Amicarelli, dan Lombardi, 2022).

Penelitian dalam perspektif lingkungan, keberlanjutan produk halal menuntut manajemen rantai pasok yang rendah emisi dan minim limbah, mulai dari praktik peternakan berkelanjutan, efisiensi energi, hingga logistik dingin yang andal. Studi terkini menegaskan peran *cold supply chain logistics* yang efektif dalam menekan kehilangan komoditas daging merah dan menjaga mutu sepanjang rantai distribusi (Davoudi, Stasinopoulos, dan Shiwakoti, 2024). Inovasi produksi ramah lingkungan juga dipandang sebagai peluang untuk mengoptimalkan penggunaan energi, air, dan sumber daya alam sekaligus menurunkan jejak lingkungan (Bux, Varese, Amicarelli, dan Lombardi, 2022). Sistem rantai pasok halal, integrasi dimensi sosial ke dalam kebijakan operasional (termasuk pelatihan kompetensi halal, standarisasi prosedur, dan pengawasan) dikaitkan dengan peningkatan kepercayaan konsumen dan peningkatan kinerja keberlanjutan (Harsanto, Farras, Firmansyah, Pradana, dan Apriliadi, 2024; Kurniawati dan Cakravastia, 2023).

Keberlanjutan dalam sistem halal meningkatkan daya saing global tanpa mengorbankan kepatuhan syariah. Tinjauan terhadap riset rantai pasok halal menunjukkan bahwa optimalisasi proses, penerapan teknologi digital, dan tata kelola logistik merupakan pendorong utama keunggulan bersaing sekaligus penjamin integritas halal (Kurniawati dan Cakravastia, 2023). Indikator

keberlanjutan produk halal pada komoditas daging segar dapat dirumuskan melalui kualitas, keamanan, dan ketahanan produk yang saling berkaitan yang meliputi :

1. Kualitas kesegaran, kandungan gizi, dan sifat organoleptik, yang sangat dipengaruhi oleh kontrol suhu, kelembaban, dan higienitas sepanjang rantai pasok dingin.
2. Keamanan pangan mencakup jaminan bebas dari bahaya biologis, kimia, dan fisik melalui penerapan *Good Hygiene Practices* (GHP) dan HACCP sesuai standar internasional (Codex).
3. Ketahanan merujuk pada kemampuan produk mempertahankan mutu dan status kehalalan selama penyimpanan dan distribusi melalui pengendalian cold chain yang konsisten untuk meminimalkan pembusukan maupun pemborosan.

Ketiga indikator ini membentuk integritas rantai pasok halal secara simultan. Kerangka kebijakan Indonesia memperkuat dimensi keberlanjutan tersebut. PP Nomor 39 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Jaminan Produk Halal mensyaratkan kewajiban sertifikasi halal terhadap produk yang beredar di Indonesia dan regulasi penandaan produk non-halal. Implementasi kewajiban ini secara bertahap ditegakkan oleh BPJPH, mendorong pelaku industri memperkuat sistem jaminan halal, termasuk aspek ketertelusuran dan pengendalian rantai dingin (Indonesia, 2021).

2.3.7. Metode Pengembangan Perangkat Lunak (SDLC)

2.3.7.1 Konsep Umum SDLC

System Development Life Cycle (SDLC) merupakan kerangka metodologis yang menstrukturkan seluruh proses pengembangan perangkat lunak, mulai dari perencanaan hingga pemeliharaan, untuk mencapai kesesuaian antara kebutuhan pengguna dan standar kualitas sistem. Metode SDLC mencakup enam tahap utama yaitu *planning, analysis, design, implementation, testing,* dan *maintenance*, yang berjalan secara iteratif dan saling terhubung untuk memastikan kualitas serta keberlanjutan implementasi sistem (Kozma, Varga, dan Larrinaga, 2021; Saeedi dan Visvizi, 2021; Saravanos dan Curinga, 2023). Pendekatan tersebut, menekankan pentingnya daur hidup pengembangan, ketika sistem melibatkan

teknologi dan ekosistem kompleks, terutama dipadukan dengan Arsitektur SPBE Nasional yang menjadi acuan integrasi proses bisnis, data, aplikasi, infrastruktur, dan keamanan (Peraturan Presiden, 2022; Sekretariat Negara, 2019).

Tahap planning berfungsi untuk mendefinisikan ruang lingkup proyek, tujuan sistem, kebutuhan sumber daya, serta estimasi waktu dan biaya. Tahap ini menentukan arah strategis agar sistem yang dikembangkan selaras dengan visi organisasi serta meminimalkan risiko kegagalan proyek. Studi menegaskan bahwa pemilihan model proses seperti waterfall atau agile akan mempengaruhi manajemen risiko dan efektivitas pengelolaan proyek (Saeedi dan Visvizi, 2021; Saravanos dan Curinga, 2023).

Tahap analysis difokuskan pada pengumpulan kebutuhan melalui wawancara, observasi, serta studi dokumen, disertai analisis kelayakan teknis, ekonomi, dan operasional. Hasil analisis ini diterjemahkan menjadi spesifikasi kebutuhan sistem. Dongmo (2024) menyoroti bahwa aspek *non-functional requirements* seperti keamanan, keandalan, dan kinerja perlu diidentifikasi sejak tahap analisis agar terintegrasi dalam seluruh fase SDLC. Tahap design mengubah hasil analisis menjadi rancangan arsitektur sistem, basis data, antarmuka pengguna, serta *mekanisme* keamanan. Desain modern menuntut modularitas, skalabilitas, dan keamanan melalui desain untuk mengantisipasi ancaman sejak dini. Praktik integrasi keamanan sejak tahap desain terbukti menurunkan biaya serta meningkatkan kualitas implementasi (Casola , Farras, Firmansyah, Pradana, dan Apriliadi, 2024).

Tahap implementation menerjemahkan desain ke dalam kode program serta mengintegrasikan perangkat keras dan lunak agar sistem berjalan sesuai spesifikasi. Penelitian otomatisasi *pipeline* dan integrasi DevSecOps diterapkan untuk meningkatkan mutu serta kepercayaan terhadap sistem, terutama pada proyek yang memadukan IoT dan *blockchain* (Serban, van der Blom, Hoos, dan Visser, 2024). Penelitian yang dilakukan, integrasi digunakan dalam *framework dual-blockchain* untuk menjamin keterlacakan dan keberlanjutan produk halal. Tahap testing berfungsi mengevaluasi kualitas sistem melalui pengujian fungsional, integrasi, performa, dan keamanan. Casola , Farras, Firmansyah, Pradana, dan Apriliadi,

(2024) serta Mothanna, ElMedany, Hammad, Ksantini, dan Sharif, (2024) menunjukkan bahwa pendekatan *model-based security testing* efektif dalam mendeteksi kerentanan sejak dini dan memastikan sistem memenuhi kebutuhan pengguna dengan konsisten.

Tahap maintenance, meliputi pemeliharaan sistem setelah implementasi, termasuk perbaikan bug, penyesuaian kebutuhan, serta peningkatan fungsi sesuai perkembangan teknologi. Penelitian Williamsson dan Askenas (2024) menekankan *mekanisme episodic organizational learning* sebagai bentuk *continuous improvement* di dalam proses pengembangan sistem agar organisasi mampu belajar dari pengalaman dan meningkatkan kualitas perangkat lunak antar iterasi. Konsep SDLC berperan sebagai panduan sistematis dan berorientasi kualitas. Integrasi prinsip keamanan, keberlanjutan, serta tata kelola lintas fase menjadikan SDLC relevan untuk perancangan *framework dual-blockchain* yang mendukung transparansi, keterlacakan, dan keberlanjutan daging segar halal.

2.3.7.2 Implementasi SDLC dalam Pengembangan *blockchain*

Implementasi SDLC dalam pengembangan sistem berbasis *blockchain* merupakan pendekatan metodologis yang penting untuk menjamin keteraturan, kualitas, serta keberhasilan proyek. Teknologi *blockchain* memiliki karakteristik unik seperti desentralisasi, konsensus terdistribusi, dan pencatatan data yang *immutable*, prinsip-prinsip SDLC tetap relevan untuk memastikan pengembangan sistem berjalan secara sistematis, terukur, dan sesuai dengan kebutuhan pengguna serta regulasi yang berlaku. Penerapan SDLC yang diintegrasikan dengan pendekatan *secure*-SDLC memungkinkan keamanan dan keandalan sistem dijaga sejak tahap awal, terutama dalam proyek yang bersifat lintas entitas seperti rantai pasok halal (Valdés-Rodríguez, Hochstetter-Diez, Díaz-Arancibia, dan Cadena-Martínez, 2023). Prinsip penerapan SDLC dalam Peraturan Pemerintah Indonesia, perlu mengacu pada koridor hukum PP No. 71 Tahun 2019 tentang Penyelenggaraan Sistem dan Transaksi Elektronik yang menekankan aspek keamanan, keandalan, dan auditabilitas sistem digital (Sekretariat Negara, 2019)

Penerapan SDLC dalam pengembangan *blockchain* memberikan sejumlah kelebihan. Pertama, SDLC menyediakan kerangka kerja yang sistematis untuk

mengelola kompleksitas sistem terdistribusi dengan dokumentasi yang transparan dan *traceable* pada setiap tahapan, sehingga risiko kesalahan dapat diminimalkan dan proses audit lebih mudah dilakukan (Humayun, Niazi, Assiri, dan Haoues,2023; Valdés-Rodríguez, Hochstetter-Diez, Díaz-Arancibia, dan Cadena-Martínez, 2023). Kedua, SDLC mendukung proses pengendalian kualitas dan pengujian berlapis, yang menjadi sangat krusial karena *blockchain* memiliki sifat immutable sehingga setiap kesalahan pasca-implementasi sulit diperbaiki tanpa menyebabkan dampak sistemik (Wu, Wang, Lai, Wang, He, dan Chan, 2024). Keterlibatan pemangku kepentingan sejak tahap analisis kebutuhan juga menjadi keunggulan penting, terutama dalam proyek *blockchain* yang melibatkan berbagai aktor seperti regulator, industri, dan konsumen untuk menjamin kesesuaian desain dan tata kelola (Laatikainen, Li, dan Abrahamsson, 2023)

Pengembangan sistem *blockchain* menghadapi sejumlah tantangan yang bersifat teknis maupun konseptual. Pertama, kompleksitas teknologi *blockchain* yang mencakup kriptografi, *mekanisme* konsensus, serta integrasi lintas platform menuntut kompetensi multidisiplin yang matang. Pengelolaan *non-functional requirements* (NFR) seperti performa, keamanan, dan keandalan menjadi aspek fundamental sejak tahap awal (Andrade, Torres, Ortiz-Garcés, Miño, dan Almeida, 2023). Kedua, isu *interoperabilitas* menjadi tantangan besar dalam konteks rantai pasok halal yang berskala global, di mana sistem *blockchain* harus mampu berkomunikasi lintas protokol dan platform sambil mempertahankan integritas data dan kepatuhan terhadap standar industri. Kerangka evaluasi terbaru bahkan menyoroti perlunya analisis throughput dan *latency* sebagai tolok ukur kinerja utama dalam perancangan sistem *blockchain* yang efisien (Song, Zhu, Lu, Zhu, Zhao, Sun, Li, dan Zhu,2024; Wang, Zhang, Ying, Zhang, Peng, Li, dan Yu, 2024). Ketiga, aspek *governance* dan regulasi memerlukan perhatian khusus karena perbedaan kebijakan antar negara dapat memengaruhi *mekanisme on-chain* maupun *off-chain governance*, desain tata kelola yang adaptif dan akuntabel menjadi kunci agar sistem tetap berkelanjutan (Laatikainen, Li, dan Abrahamsson, 2023).

Penerapan SDLC dalam pengembangan *blockchain* tidak hanya memberikan kerangka sistematis dan pengendalian kualitas berlapis, tetapi juga memfasilitasi

kolaborasi pemangku kepentingan secara terstruktur. Motode DSLC dalam menjawab tantangan kompleksitas teknis, *interoperabilitas*, dan regulasi, perlu dikombinasikan dengan pendekatan iteratif serta prinsip *continuous improvement*. Pemahaman atas kelebihan, kelemahan, dan tantangan ini menjadi dasar konseptual penting bagi penelitian dalam merancang *framework dual-blockchain* yang adaptif, efisien, dan sesuai dengan prinsip syariah serta keberlanjutan rantai pasok halal (Laatikainen, Li, dan Abrahamsson, 2023; Valdés-Rodríguez, Hochstetter-Diez, Díaz-Arancibia, dan Cadena-Martínez,et al., 2023; Wang, Zhang, Ying, Zhang, Peng, Li, dan Yu, 2024).

2.3.7.3 Studi Kasus Penggunaan SDLC pada Rantai Pasok

Penerapan SDLC dalam pengembangan sistem rantai pasok halal memiliki kontribusi strategis terhadap keberhasilan implementasi sistem informasi, khususnya dalam menjamin integritas halal dan keterlacakan produk di sepanjang rantai pasok. Pendekatan ini memberikan dasar metodologis yang sistematis dan terukur, yang mampu mengintegrasikan kebutuhan industri halal, regulasi, serta ekspektasi konsumen terhadap transparansi dan keandalan data. Keberhasilan pengembangan sistem halal tidak hanya ditentukan oleh kesiapan teknologi, tetapi oleh adanya metodologi pengembangan yang konsisten dan terdokumentasi secara menyeluruh (Harsanto, Farras, Firmansyah, Pradana, dan Apriliadi, 2024; Kurniawati dan Cakravastia, 2023).

Penelitian oleh Alamsyah, Hakim, dan Hendayani (2022) menyoroti pentingnya pendekatan sistematis dalam membangun ekosistem halal nasional melalui penerapan sistem keterlacakan berbasis *blockchain* yang dapat meningkatkan transparansi dan kepercayaan konsumen. Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi antara metodologi pengembangan sistem yang disiplin dan teknologi *blockchain* dapat mengatasi kendala utama dalam rantai pasok halal, seperti kurangnya visibilitas data dan lemahnya pengawasan sertifikasi halal. Temuan serupa juga dikemukakan oleh Ellahi, Wood, dan Bekhit (2023) yang mengulas berbagai kerangka kerja *blockchain-based traceability* dalam industri pangan. Penemuanan yang didapat bahwa sistem yang dirancang secara sistematis

dan berlapis memberikan jaminan lebih tinggi terhadap keamanan, keaslian, serta keterlacakan produk dari hulu hingga hilir.

Penelitian oleh Laatikainen, Li, dan Abrahamsson (2023) menekankan bahwa keberhasilan penerapan sistem digital seperti *blockchain* dalam rantai pasok sangat bergantung pada kejelasan struktur tata kelola dan keterlibatan pemangku kepentingan. Ini memperkuat pandangan bahwa rancangan sistem halal yang berbasis SDLC perlu diiringi dengan model kolaborasi dan dokumentasi yang menjamin akuntabilitas seluruh pihak yang terlibat, mulai dari regulator, produsen, hingga konsumen. Lebih jauh lagi, tinjauan bibliometrik oleh Masudin, Rahmatullah, Agung, Dewanti, dan Restuputri, (2022) menegaskan pentingnya dokumentasi dan standardisasi dalam setiap pengembangan sistem halal, karena keberadaan catatan proses yang konsisten merupakan elemen kunci untuk auditabilitas dan pemeliharaan kepercayaan publik.

Penerapan SDLC dalam konteks halal *supply chain* tidak semata menghasilkan sistem yang berfungsi secara teknis, tetapi juga berperan sebagai *mekanisme compliance by design* untuk memastikan kesesuaian dengan prinsip syariah dan keberlanjutan. Pendekatan ini memungkinkan integrasi dimensi religius, sosial, dan ekonomi secara simultan dalam desain sistem digital halal. Dalam kerangka penelitian ini, hasil tersebut menjadi dasar empiris bahwa SDLC dapat diadaptasi untuk mengembangkan *framework dual-blockchain* yang menjamin penelusuran dan keberlanjutan daging segar halal secara lebih transparan, terintegrasi, dan dapat diaudit (Susanty , Puspitasari, Rosyada, Pratama, dan Kurniawan, 2024; Ellahi, Wood, dan Bekhit, 2024)