ALBACORE
Volume 10, No 2, May 2026
Hal 391-401
DOI: https://doi.org/10.29244/core.10.2.391-401

P-ISSN 2549-132X, E-ISSN 2655-559X
Received: July 1, 2026
Revised: October 7, 2026
Accepted: October 8, 2026

GREEN WAREHOUSE ANALYSIS ON COLD STORAGE OF FROZEN TUNA PRODUCTS

Analisis *Green Warehouse* Pada Gudang Penyimpanan Beku Olahan Ikan Tuna Beku

Oleh:
Mohammad Abdulrokhman Fahruddin[1], Raden Naufal Taufiqulhakim[1], Ali Mtulu Funda[2], Fis Purwangka[3]*,

[1]Program Studi Teknologi Perikanan Laut, Departemen Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

[2]Mesinde Muliro University of Science and Technology, Kenya

[3]Departemen Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

*Korespondensi penulis: fis@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Storage of frozen tuna requires consistent cold-chain management to maintain product quality and food safety while addressing the high energy demand of cold-storage facilities. This condition highlights the importance of implementing the green warehouse concept to improve energy efficiency and reduce environmental impacts without compromising temperature control performance. This study aimed to identify processing stages of frozen tuna in cold storage and to identify implementation of green warehouse aspects in frozen tuna storage. Structured literature review was conducted by analyzing scientific publications related to frozen tuna processing, cold-chain management, green warehousing, and energy efficiency published primarily during 2017–2026. Results indicate that frozen tuna processing generally involves raw-material receiving and handling, mechanical processing, freezing, and frozen storage, with temperature control serving as a critical factor in maintaining product quality and food safety. Implementation of green warehouse principles in cold storage encompasses building and insulation efficiency, energy-utility management, efficient lighting, material handling and automation, material and packaging management, and operational optimization. Key strategies for frozen storage include optimizing warehouse filling levels, minimizing door-opening frequency and duration, scheduling defrost cycles, maintaining refrigeration systems, utilizing renewable energy, and implementing digital temperature monitoring technologies. Therefore, green warehouse implementation in frozen tuna storage should integrate quality preservation, energy efficiency, operational efficiency, and environmental impact reduction to improve the sustainability of the cold-chain system without compromising product quality.

Key words:*cold chain, cold storage, energy efficiency, frozen storage, frozen tuna, green warehouse*

ABSTRAK

Sistem penyimpanan ikan tuna beku membutuhkan pengelolaan rantai dingin yang konsisten untuk mempertahankan mutu dan keamanan pangan sekaligus menghadapi tingginya kebutuhan energi pada fasilitas *cold storage*. Kondisi tersebut menjadikan penerapan konsep *green warehouse* penting untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi dampak lingkungan tanpa mengurangi efektivitas pengendalian suhu. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi proses pengolahan ikan tuna beku di *cold storage* serta mengidentifikasi penerapan aspek *green warehouse* pada penyimpanan ikan tuna beku. Penelitian dilakukan menggunakan metode *structured literature*

© The Author(s) 2026. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License., which permits use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, and indicate if changes were made.

review dengan menganalisis publikasi ilmiah, khususnya yang membahas pengolahan tuna beku, rantai dingin, *green warehousing*, dan efisiensi energi pada periode 2017–2026. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengolahan tuna beku meliputi penerimaan dan penanganan bahan baku, pengolahan mekanis, pembekuan, dan penyimpanan beku dengan pengendalian suhu sebagai faktor utama dalam mempertahankan mutu dan keamanan produk. Penerapan *green warehouse* pada *cold storage* mencakup efisiensi bangunan dan insulasi, pengelolaan utilitas energi, pencahayaan efisien, *material handling* dan otomasi, pengelolaan material dan kemasan, serta optimalisasi praktik operasional. Strategi utama pada tahap penyimpanan meliputi pengaturan tingkat pengisian gudang, minimalisasi pembukaan pintu, pengaturan siklus *defrost*, pemeliharaan sistem refrigerasi, pemanfaatan energi terbarukan, dan pemantauan suhu berbasis teknologi digital. Penerapan *green warehouse* pada penyimpanan tuna beku perlu mengintegrasikan pengendalian mutu, efisiensi energi, efisiensi operasional, dan pengurangan dampak lingkungan sehingga keberlanjutan sistem rantai dingin dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan mutu produk.

Kata kunci: efisiensi energi, *green warehouse*, ikan tuna beku, penyimpanan beku, rantai dingin

PENDAHULUAN

Karakteristik ikan yang mudah mengalami kerusakan biologis menjadikan penanganan pasca-penangkapan sebagai faktor kritis. Pada produk beku, pengendalian suhu wajib dilakukan secara konsisten mulai dari penerimaan bahan baku hingga tahap penyimpanan dan transportasi. Kajian sistematis Wibowo *et al*. (2024), terhadap 86 artikel turut menegaskan bahwa penelitian mengenai rantai dingin tuna masih relatif terbatas dibandingkan tingkat kompleksitas permasalahannya di lapangan, yang mana pengolahan tuna menunjukkan bahwa pemutusan rantai dingin dapat memicu penurunan mutu produk, sehingga pengelolaannya harus mencakup aspek risiko, kinerja, rantai nilai, dan keberlanjutan secara terpadu.

Permasalahan tersebut menjadi semakin kompleks ketika fungsi utama rantai dingin yaitu mempertahankan mutu, memperpanjang umur simpan, dan berpotensi mengurangi kehilangan pangan berbenturan dengan tingginya kebutuhan energi pada sistem refrigerasi yang berdampak pada keberlanjutan lingkungan. Accorsi *et al*. (2017) menunjukkan bahwa rantai dingin merupakan sistem yang intensif energi, di mana kondisi lingkungan dan fluktuasi temperatur memengaruhi konsumsi daya serta biaya distribusi secara signifikan. Kajian yang lebih mutakhir mempertegas adanya konflik multidimensi dalam rantai dingin antara kualitas pangan, efisiensi ekonomi, konsumsi sumber daya, dan dampak lingkungan (Chen, 2026).

Petruzziello *et al*. (2025) menegaskan bahwa teknologi refrigerasi menimbulkan dampak lingkungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, melalui konsumsi energi dan pemanfaatan refrigeran berpotensi pemanasan global tinggi. Oleh karena itu, teknologi pendingin perlu dipilih dan diterapkan secara cermat agar mampu memberikan manfaat optimal sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam rantai pasok hasil perikanan, fasilitas gudang beku (*cold storage*) menjadi simpul kritis dengan konsumsi energi terbesar, terutama untuk mengoperasikan kompresor, *Air Blast Freezer* (ABF), serta mempertahankan suhu konstan pada kisaran -18 °C hingga -25 °C (Karacan *et al*. 2023).

Tingginya beban listrik dan efisiensi refrigerasi yang belum optimal tidak hanya memicu pembengkakan biaya operasional, tetapi juga berpotensi meningkatkan emisi karbon secara signifikan. Oleh sebab itu, penerapan konsep *green warehouse* menjadi pendekatan strategis untuk mentransformasi pergudangan konvensional menjadi fasilitas yang ramah lingkungan melalui insulasi termal, penggunaan refrigeran ramah lingkungan, integrasi energi terbarukan, hingga digitalisasi pemantauan suhu berbasis *Internet of Things* (IoT) (Bartolini *et al*. 2019).

Perikanan tuna di Indonesia, merupakan komoditas unggulan berorientasi ekspor yang sangat strategis dengan nilai ekonomi tinggi, mencapai USD 927,13 juta (sekitar Rp15,2 triliun) pada tahun 2023. Wilayah seperti Sulawesi, khususnya Sulawesi Utara, berkembang pesat sebagai pusat produksi, pengolahan, dan ekspor dengan nilai ekspor komoditas tuna, cakalang, dan tongkol mencapai USD165 juta pada tahun 2024. Keberadaan fasilitas dan unit pengolahan ikan (UPI) di pusat-pusat logistik utama seperti Jakarta, Makassar, dan Sulawesi menjadi simpul vital dalam pengolahan tuna beku (seperti tuna loin dan *frozen slice*) yang memenuhi standar mutu dan keamanan pangan internasional.

Keberlanjutan pasokan produk beku pada industri perikanan tuna, sangat bergantung pada kontinuitas mutu dan efisiensi energi di *cold storage* (Siregar *et al.* 2025). Berbagai hambatan operasional, seperti fluktuasi suhu, paparan sinar matahari saat bongkar muat, inefisiensi daya, dan berisiko menurunkan mutu serta meningkatkan kehilangan produk (*product loss*) (Panjaitan *et al.* 2026). Meskipun demikian, analisis komprehensif mengenai alur pengolahan dan penerapan aspek *green warehouse* secara terstruktur pada fasilitas *cold storage* tuna beku masih relatif terbatas. Penelitian ini diarahkan untuk mencapai beberapa tujuan, yaitu mengidentifikasi proses pengolahan ikan tuna beku di *cold storage* dan mengidentifikasi penerapan aspek *green warehouse* pada penyimpanan ikan tuna beku di *cold storage*.

METODE PENELITIAN

Pengambilan data dalam penelitian ini menggunakan kajian literatur terstruktur (*structured literature review*) dengan orientasi analisis konseptual. Pendekatan tersebut dipilih karena penelitian difokuskan pada sintesis pengetahuan mengenai rantai dingin ikan tuna serta penerapan konsep *green warehousing*. Kerangka awal penelitian berasal dari permasalahan dan tujuan yang telah dirumuskan pada kerangka pikir, kemudian diperluas dengan literatur nasional dan internasional yang relevan.

Literatur diprioritaskan pada publikasi jurnal ilmiah periode 2017–2026 sehingga sebagian besar sumber berada dalam rentang sepuluh tahun terakhir. Literatur berfokus pada beberapa tema, yaitu: (1) olahan ikan tuna beku; (2) *green warehousing* dan efisiensi energi. Analisis dilakukan secara tematik dengan membandingkan tujuan, objek, metode, indikator, dan temuan utama penelitian terdahulu. Sintesis kemudian diarahkan dengan pendekatan pada aspek *green warehouse*. Pendekatan tersebut sejalan dengan perkembangan kajian rantai dingin tuna yang menempatkan risiko, kinerja, rantai nilai, dan keberlanjutan sebagai elemen yang saling berhubungan (Wibowo *et al.* 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mengidentifikasi Pengolahan dan Penyimpanan Ikan Tuna Beku di *Cold Storage*

Sumber jurnal yang diperoleh terdapat 5 jurnal yang membahas tentang olahan ikan tuna. Beberapa ragam olahan ikan tuna yang umum diproduksi oleh unit pengolahan ikan (UPI) di Indonesia antara lain tuna loin masak beku (Amru & Sipahutar, 2022), *frozen slice* tuna (Siregar *et al.* 2025), tuna loin beku segar untuk ekspor dengan penerapan GMP, SSOP, dan HACCP (Prinata *et al.* 2025). Tuna olahan memiliki karakteristik mutu yang pada umumnya dievaluasi melalui beberapa parameter antara lain: organoleptik, mikrobiologi, kimia, dan rendemen.

Secara organoleptik, bahan baku dan produk akhir tuna yang bermutu baik menunjukkan nilai sensori minimal 7 hingga 9 sesuai skala SNI, dengan penampakan cemerlang, tekstur padat-kompak-elastis, serta aroma segar khas tuna (Amru & Sipahutar, 2022; Siregar *et al.* 2025; Nento *et al.* 2026). Mengenai sisi keamanan pangan, produk tuna yang memenuhi standar harus memiliki nilai Angka Lempeng Total (ALT) di bawah 5×10^5 kol/g, kandungan *E. coli* dan *Coliform* <3 APM/g, *Salmonella* negatif, serta kadar histamin jauh di bawah ambang batas SNI (100 ppm) maupun ICMSF (25–30 ppm), sebagaimana ditunjukkan pada berbagai penelitian di PT. KMC Jakarta, UD. Damena Bali, PT. XYZ

Makassar, dan perairan Teluk Tomini (Amru & Sipahutar 2022; Prinata *et al*. 2025; Siregar *et al*. 2025; Nento *et al.* 2026).

Sebagaimana penelitian Siregar *et al*. (2025), mutu bahan baku terbukti berpengaruh signifikan terhadap nilai rendemen pada tahap akhir pengolahan seperti *grading-retouching* dan *cutting block*. Dari sisi keamanan pangan, produk tuna yang memenuhi standar harus memiliki nilai Angka Lempeng Total (ALT) dibawah 5×10^5 kol/g, kandungan *E. coli* dan *Coliform* <3 APM/g, *Salmonella* negatif, serta kadar histamin jauh di bawah ambang batas SNI (100 ppm), sebagaimana ditunjukkan pada berbagai penelitian di PT. KMC Jakarta, UD. Damena Bali, PT. XYZ Makassar, dan perairan Teluk Tomini.

Kebutuhan penerapan rantai dingin (*cold chain*) secara konsisten menjadi benang merah utama yang menghubungkan ke-lima kajian tersebut, karena tuna merupakan ikan berkadar histidin tinggi yang sangat rentan pembentukan histamin apabila suhu tidak terkendali (Tsai *et al*. 2022). Amru & Sipahutar, (2022) menunjukkan bahwa penerapan suhu pusat ikan yang konsisten di bawah 5°C sejak penerimaan bahan baku hingga –18°C pada penyimpanan beku mampu menekan pertumbuhan bakteri pembentuk histamin serta menjaga nilai Angka Lempeng Total (ALT) tetap jauh di bawah ambang batas SNI.

Temuan serupa diperkuat oleh Siregar *et al*. (2026) yang mencatat bahwa deviasi suhu di atas 4°C selama proses pembekuan berisiko meningkatkan pertumbuhan bakteri psikrofilik dan pembentukan histamin pada tuna. Sebaliknya, ketidaktersediaan sistem rantai dingin yang memadai di tingkat nelayan tradisional justru menjadi titik lemah utama yang menyebabkan penurunan mutu tuna secara drastis pasca tangkap, bahkan sebelum ikan sampai ke unit pengolahan (Saputra *et al.* 2022; Nento *et al.* 2026). Hal ini mengindikasikan bahwa kebutuhan rantai dingin melibatkan infrastruktur mulai penangkapan, transportasi, proses pengolahan, penyimpanan, hingga distribusi ke konsumen. Berdasarkan sintesis dari beberapa penelitian tersebut, alur umum proses pengolahan tuna dari penangkapan hingga penyimpanan beku dapat digambarkan sebagaimana diagram alir pada **Figure 1**.

Secara keseluruhan, sintesis kelima kajian ini menegaskan adanya keterkaitan erat antara ragam olahan tuna, penerapan rantai dingin, dan pemenuhan standar mutu sebagai satu kesatuan sistem yang tidak dapat dipisahkan. Keberhasilan industri pengolahan tuna Indonesia dalam menembus pasar ekspor yang secara konsisten memenuhi standar SNI dan persyaratan negara tujuan sangat bergantung pada kemampuan pelaku usaha menjaga suhu rendah secara berkelanjutan di setiap titik kritis proses, mulai dari penerimaan bahan baku, penanganan mekanis, pembekuan, hingga penyimpanan (Prinata *et al*. 2025; Siregar *et al*. 2026). Sebaliknya, kelemahan rantai dingin di tingkat hulu, khususnya pada nelayan tradisional dengan keterbatasan sarana pendinginan, tetap menjadi tantangan yang perlu diatasi melalui intervensi kebijakan dan penguatan infrastruktur, agar mutu tuna Indonesia dapat terjaga secara konsisten dari laut hingga ke tangan konsumen akhir (Saputra *et al.* 2022; (Nento *et al.* 2026).

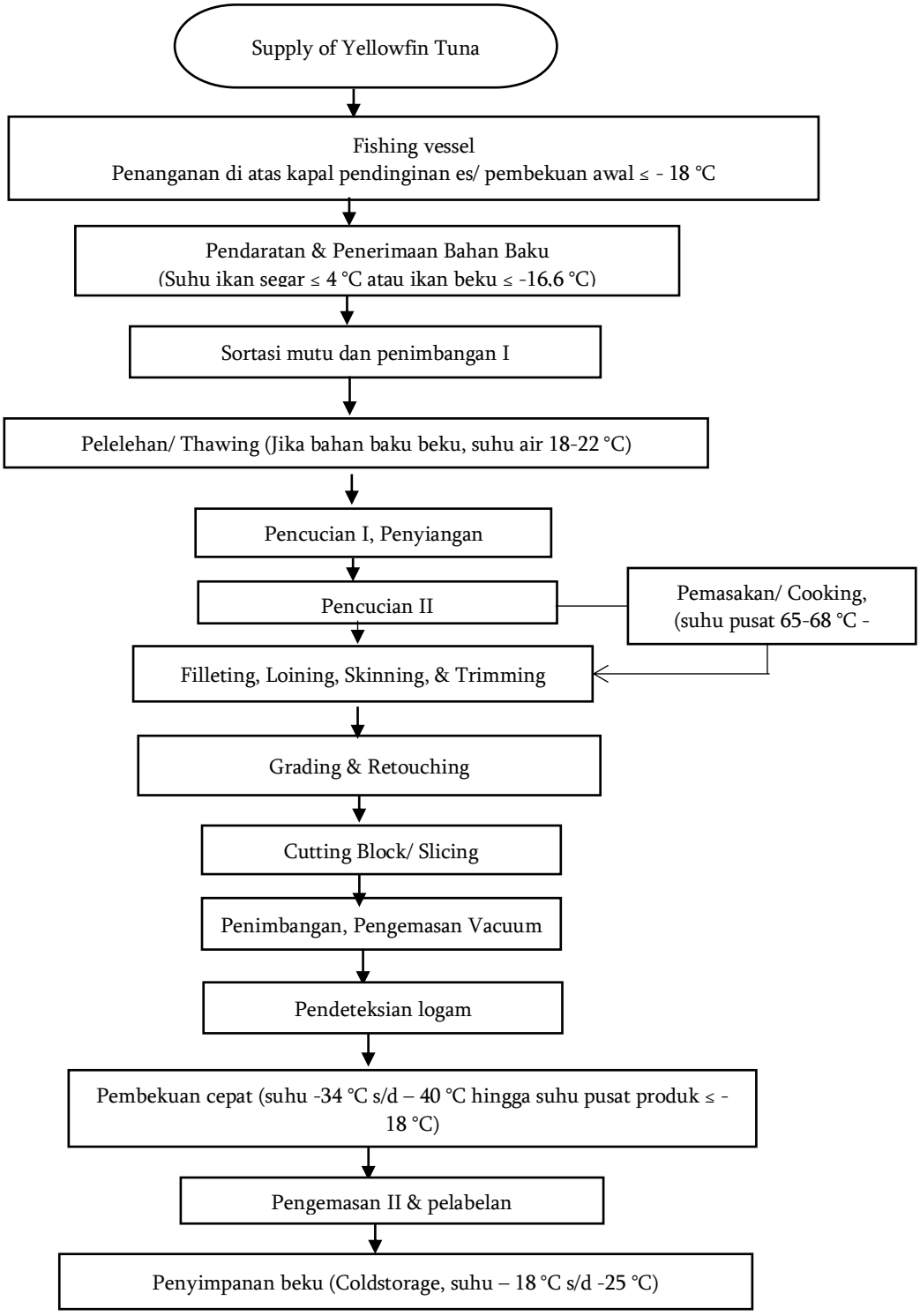


Figure 1 *Tuna freezing production flow chart* (Source: Amru & Sipahutar, (2022); Prinata *et al.* (2025); Siregar *et al.*(2025))

Gambar 1 Diagram alir produksi pembekuan tuna (Sumber: Amru & Sipahutar, (2022); Prinata *et al.* (2025); Siregar *et al.*(2025))

Mengidentifikasi Penerapan Aspek *Green Warehouse* pada Penyimpanan Ikan Tuna Beku di *Cold Storage*

Gudang merupakan salah satu simpul penting dalam olahan tuna beku. Bartolini *et al*. (2019), menunjukkan bahwa gudang memberikan kontribusi terhadap emisi gas rumah kaca rantai pasok dan bahwa efisiensi energi menjadi salah satu tema utama dalam penelitian *green warehousing*. Konsep *green warehousing* telah berkembang menjadi kerangka konseptual yang komprehensif dalam literatur logistik dan rantai pasok. Oleh Perotti & Colicchia, (2023) kerangka ini diperluas secara lebih sistematis melalui tinjauan literatur sistematis atas 60 artikel, yang mengelompokkan strategi *green warehousing* ke dalam enam area intervensi utama: *building* (insulasi termal, atap sejuk/hijau, kaca selektif), utilities (panel surya, sistem HVAC cerdas), *lighting* (LED, pencahayaan alami, sensor), material *handling and automation* (forklift baterai litium/hidrogen, AS/RS hemat energi), materials (pengurangan dan daur ulang kemasan), serta *operational practices* (optimasi rute dan penjadwalan). Keenam area ini relevan diterapkan pada gudang beku (*cold storage*) yang menjadi jantung rantai dingin produk perikanan, karena literatur menunjukkan bahwa fasilitas pendinginan merupakan bangunan komersial paling intensif energi akibat kebutuhan refrigerasi berkelanjutan (Burek & Nutter 2020; Karacan *et al.* 2023). Kerangka tersebut dapat diadaptasi pada gudang produk perikanan sebagaimana **Table 1**.

Table 1. *Green warehousing dimensions in cold storage*

Tabel 1. Dimensi *green warehousing* pada penyimpanan gudang beku

Dimensi	Indikator/Praktik Utama	Sumber
Building (bangunan)	Insulasi termal dinding-atap, pintu dok berinsulasi, atap sejuk/hijau, kaca selektif, desain pasif (ventilasi silang, *skylight*)	Perotti & Colicchia (2023); Rahmatiyah *et al*. (2026)
Utilities (Utilitas energi)	Panel fotovoltaik (PV) untuk swadaya listrik, sistem HVAC cerdas dan prediktif, penyimpanan energi dingin (CTES)	Perotti & Colicchia (2023); Karacan *et al.* (2023)
Lighting (Pencahayaan)	Lampu LED, pencahayaan alami (*skylight*), dinding putih pemantul cahaya, sensor otomatis	Perotti & Colicchia (2023); Agyabeng-Mensah *et al*. (2020)
Material Handling & Automation	Forklift baterai litium-ion/hidrogen, sistem *Automated Storage and Retrieval* (AS/RS) hemat energi	Perotti & Colicchia (2023)
Materials (material & kemasan)	Palet, refrigeran, kemasan *biodegradable*/ berbahan nabati, pengurangan dan daur ulang kemasan, material lokal ramah lingkungan	Agyabeng-Mensah *et al.* (2020); Rahmatiyah *et al.* (2026)
Operational Practices (praktik operasional)	Optimasi suhu, manajemen inventaris, optimasi *rute*/*lay out*, penjadwalan pemeliharaan *defrost*, pengelolaan tingkat pengisian gudang (*filling level*) dan kapasitas	Agyabeng-Mensah *et al.* (2020); Marchi & Zanoni (2022); Karacan *et al.* (2023)

Pada tahap penanganan (*handling*) bahan baku tuna saat diterima oleh unit pengolahan ikan, penerapan prinsip *green warehousing* dapat melalui pengaturan area penerimaan ikan dengan pencahayaan dan ventilasi alami untuk mengurangi konsumsi listrik pada siang hari, sebagaimana ditunjukkan pada rancangan sentra produksi ikan tuna di Bone Bolango yang mengintegrasikan *skylight* dan ventilasi silang berdasarkan orientasi matahari dan arah angin dominan (Rahmatiyah *et al*. 2026).

Pada tahap pengolahan, efisiensi energi difokuskan pada penggunaan *forklift* bertenaga baterai ramah lingkungan untuk mengangkut bahan baku dan produk antar bagian kerja, penerapan material

handling otomatis pada lini produksi loin atau *frozen slice*, serta pengurangan penggunaan kemasan plastik sekali pakai dengan kemasan yang dapat didaur ulang atau berbahan nabati (Perotti & Colicchia, 2023; Agyabeng-Mensah *et al*. 2020). Adapun limbah cair hasil pencucian dan pembersihan tuna ditangani melalui sistem biofilter dan fitoremediasi menggunakan tanaman air lokal sebelum dialirkan kembali untuk keperluan sekunder seperti pendinginan peralatan, sehingga mengurangi konsumsi air bersih secara signifikan (Rahmatiyah *et al*. 2026).

Pada tahap penyimpanan beku (*cold storage*), penerapan *green warehousing* menjadi paling krusial karena di sinilah konsumsi energi tertinggi terjadi. Marchi & Zanoni, (2022) menunjukkan bahwa konsumsi energi spesifik (*specific energy consumption*, SEC) suatu gudang dingin sangat dipengaruhi oleh tingkat pengisian (*filling level*) ruang penyimpanan—gudang yang tidak terisi penuh justru memerlukan energi lebih besar per unit produk—serta oleh frekuensi dan durasi pembukaan pintu yang menyebabkan udara dingin mengalir keluar *coldstorage*. Sejalan dengan itu, Karacan *et al*. (2023) melalui pengujian pada 67 gudang dingin di berbagai negara menemukan bahwa kondisi operasional yang tidak tepat, seperti penumpukan produk yang menghalangi aliran udara *evaporator*, siklus *defrost* yang tidak terjadwal dengan baik, dan pembentukan es pada permukaan *evaporator*, dapat meningkatkan konsumsi energi hingga 30–50% dibandingkan kondisi ideal. Studi tersebut juga menegaskan bahwa iklim tropis seperti Indonesia dengan suhu ambien yang lebih tinggi menyebabkan sistem refrigerasi beroperasi 18–20 jam per hari (dibandingkan 12–14 jam pada iklim sedang), sehingga strategi seperti pendingin bertenaga surya dan modifikasi sisi kondensor menjadi relevan untuk diadopsi pada gudang beku tuna di wilayah pesisir tropis.

Efisiensi energi menjadi salah satu komponen utama dalam penerapan *green warehouse* karena fasilitas penyimpanan beku membutuhkan operasi sistem refrigerasi secara kontinu. Konsumsi energi tidak hanya berasal dari kompresor, *evaporator*, dan kondensor, tetapi juga dipengaruhi oleh infiltrasi udara melalui pintu, kualitas insulasi, pencahayaan, aktivitas pemindahan produk, serta lama penyimpanan. Menurut Burek & Nutter, (2020) penggunaan refrigeran yang tepat serta pengelolaan kebocoran refrigeran turut menentukan besarnya jejak karbon, menunjukkan bahwa fasilitas penyimpanan dan distribusi pangan mudah rusak merupakan bangunan yang intensif energi karena kebutuhan pendinginan, dan penyimpanan produk beku memiliki dampak lingkungan yang relatif tinggi.

Penerapan *green warehouse* pada penyimpanan tuna beku merupakan pendekatan yang mengintegrasikan pengendalian mutu produk dengan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan disajikan dalam **Table 2**.

Secara keseluruhan, sintesis dari keenam kajian ini menunjukkan bahwa pada sistem rantai dingin tuna, keberhasilan penyimpanan tidak hanya ditentukan oleh kemampuan fasilitas mempertahankan suhu rendah, tetapi juga oleh efisiensi penggunaan energi, pengelolaan refrigeran, penggunaan fasilitas, serta pengendalian waktu penyimpanan. Sebagaimana penelitian Wibowo *et al*. (2024) rantai dingin agroindustri tuna menegaskan bahwa aspek keberlanjutan (*sustainability*) termasuk emisi karbon, konsumsi energi, dan pengelolaan limbah masih menjadi area yang didominasi kajian kuantitatif namun jarang diintegrasikan dengan aspek risiko dan kinerja rantai pasok secara bersamaan. Penerapan kerangka *green warehouse* pada pengolahan, dan penyimpanan tuna beku dapat dilihat pada **Figure 2**.

Table 2. *Implementation of green warehouse principles in the frozen processed tuna cold chain*

Tabel 2. Penerapan prinsip *green warehouse* pada rantai dingin olahan tuna beku

Tahap Rantai Dingin	Praktik *Green Warehousing* yang Diterapkan	Manfaat/Dampak
Penerimaan bahan baku (*receiving*)	Ventilasi silang dan skylight pada ruang penerimaan; zonasi publik-privat untuk efisiensi alur	Mengurangi kebutuhan pencahayaan buatan pada siang hari
Penanganan & pengolahan (*filleting, loining, slicing*)	Forklift baterai litium-ion/hidrogen; AS/RS hemat energi; pengurangan kemasan plastik	Menurunkan emisi dan biaya energi penanganan material
Pembekuan cepat (*freezing*)	Insulasi panel poliuretan tebal (≥10 cm); kontrol suhu presisi; PV untuk swadaya listrik	Mengurangi kebocoran termal dan beban kompresor
Penyimpanan beku *(cold storage)*	Pengaturan *filling level* gudang; siklus *defrost* terjadwal; minimalisasi pembukaan pintu; CTES (*cold thermal energy storage*)	Menghemat energi hingga 32% dibanding kondisi tidak terkontrol
Pengelolaan limbah proses	Biofilter dan fitoremediasi limbah cair; daur ulang air untuk kebutuhan non-produksi	Mengurangi konsumsi air bersih dan pencemaran perairan pesisir
Monitor distribusi & rantai pasok hulu-hilir	Pemantauan suhu berbasis sensor (IoT); prediksi kebutuhan energi berdasarkan data suhu	Menjaga mutu tuna sekaligus efisiensi energi transportasi

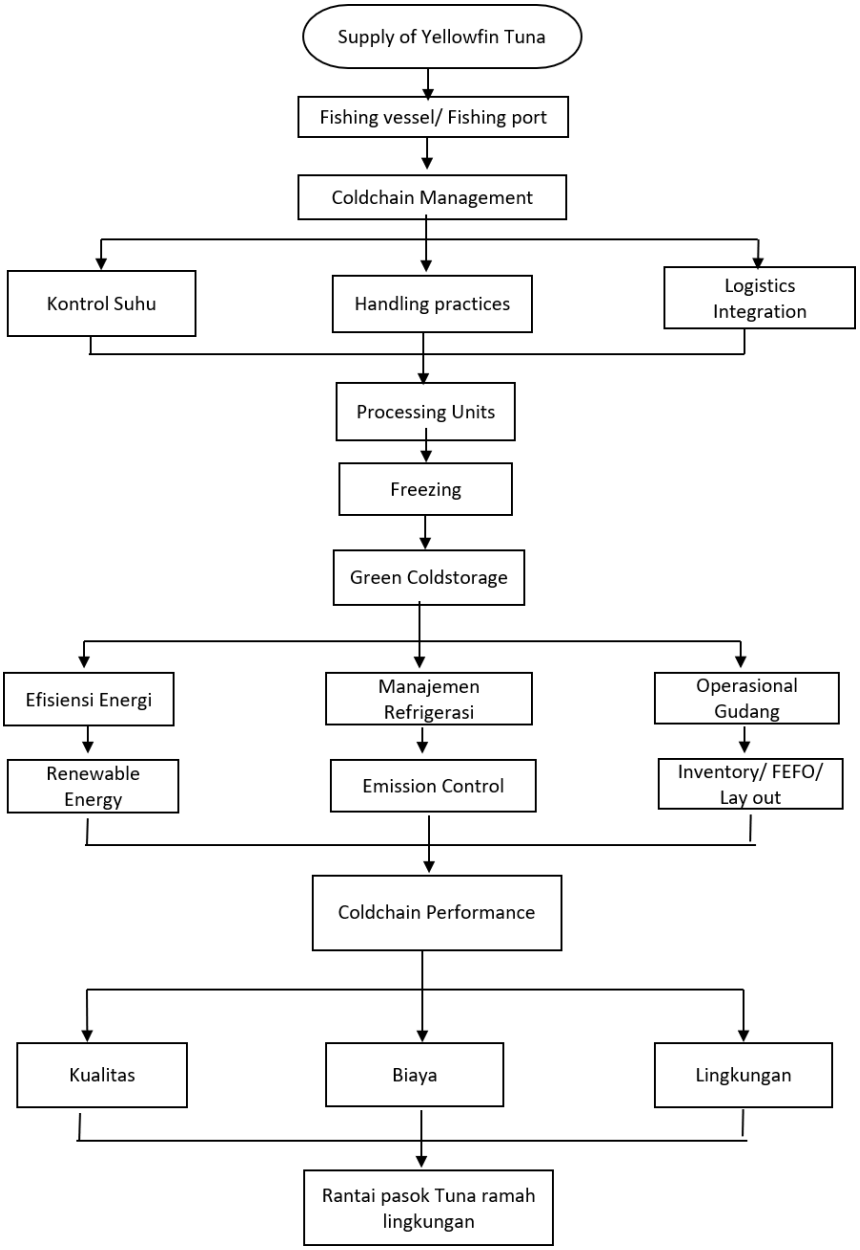


Figure 2 *Framework for implementing a green warehouse for the processing and storage of frozen tuna*

Gambar 2 Kerangka penerapan greenwarehouse pada pengolahan dan penyimpanan tuna beku

Penerapan *green warehouse* pada gudang beku (*cold storage*) tuna perlu diarahkan pada keseimbangan antara stabilitas suhu, pemeliharaan mutu, efisiensi energi, dan keberlanjutan lingkungan, karena upaya pengurangan konsumsi energi tidak boleh mengurangi efektivitas pengendalian suhu penyimpanan. Pengurangan konsumsi energi tidak dapat dilakukan hanya dengan meningkatkan suhu penyimpanan, karena fluktuasi suhu atau kondisi *temperature abuse* dapat memicu pencairan sebagian dan pembentukan kembali kristal es yang berpotensi menurunkan karakteristik produk.

Studi Panjaitan *et al.* (2026), menyatakan pengolahan *frozen cooked* tuna loin di Indonesia menunjukkan adanya penyimpangan suhu pada tahap penyimpanan dingin; suhu produk tercatat

sekitar –11,70°C, sedangkan standar yang digunakan dalam penelitian tersebut mensyaratkan suhu minimal –18°C. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pengendalian suhu sekaligus pengaturan kapasitas penyimpanan, frekuensi pembukaan pintu, dan kalibrasi alat ukur. Dengan demikian, efisiensi energi dalam *green warehouse* tanpa mengurangi tingkat perlindungan suhu standar untuk mempertahankan mutu ikan tuna.

KESIMPULAN DAN SARAN

Proses pengolahan dan penyimpanan ikan tuna beku merupakan suatu rangkaian yang membutuhkan pengendalian mutu dan suhu secara berkesinambungan, mulai dari penerimaan bahan baku, penanganan, pengolahan seperti *filleting*, *loining* dan *slicing*, pembekuan cepat, hingga penyimpanan di *cold storage*. Mutu bahan baku berpengaruh terhadap karakteristik produk dan rendemen, sedangkan kontinuitas rantai dingin berperan penting dalam mempertahankan mutu serta keamanan pangan tuna. Pengendalian suhu yang konsisten diperlukan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan pembentukan histamin, sehingga pengelolaan rantai dingin tidak hanya menjadi bagian dari proses penyimpanan, tetapi merupakan sistem pengendalian mutu yang terintegrasi dari hulu hingga hilir.

Penerapan prinsip *green warehouse* pada penyimpanan tuna beku dapat dilakukan melalui integrasi aspek bangunan, utilitas energi, pencahayaan, *material handling* dan otomasi, material dan kemasan, serta praktik operasional. Pada *cold storage*, penerapan tersebut terutama diarahkan pada peningkatan efisiensi sistem refrigerasi melalui pengaturan tingkat pengisian gudang, optimalisasi pembukaan pintu, pengaturan siklus *defrost*, pemeliharaan insulasi, pengelolaan refrigeran, serta pemanfaatan teknologi pemantauan suhu berbasis IoT dan energi terbarukan. Namun, efisiensi energi harus tetap mempertahankan kestabilan suhu penyimpanan karena peningkatan suhu atau fluktuasi suhu yang berlebihan dapat menyebabkan *temperature abuse* dan *ice recrystallization* yang berpotensi menurunkan mutu tuna. Dengan demikian, *green warehouse* pada penyimpanan tuna beku perlu dipandang sebagai pendekatan terintegrasi yang menggabungkan pemeliharaan mutu dan keamanan pangan, efisiensi energi, pengurangan dampak lingkungan, serta efisiensi operasional tanpa mengurangi kinerja rantai dingin.

DAFTAR PUSTAKA

Accorsi R, Gallo A, Manzini R. 2017. A climate driven decision-support model for the distribution of perishable products. J Clean Prod. 165:917–929. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.170.

Agyabeng-Mensah Y, Ahenkorah E, Afum E, Dacosta E, Tian Z. 2020. Green warehousing, logistics optimization, social values and ethics and economic performance: the role of supply chain sustainability. Int J Logist Manag. 31(3):549–574. doi:10.1108/IJLM-10-2019-0275.

Amru YH dan Sipahutar AHA. 2022. Karakteristik Mutu Pengolahan Yellow Fin Tuna (*Thunnus albacares*) Loin Masak Beku Quality Characteristics Of Processing Yellow Fin Tuna (*Thunnus albacares*) merup. 4(2):123–136.

Bartolini M, Bottani E, Grosse EH. 2019. Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis. J Clean Prod. 226:242–258. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.055.

Burek J, Nutter DW. 2020. Environmental implications of perishables storage and retailing. Renew Sustain Energy Rev. 133 September:110070. doi:10.1016/j.rser.2020.110070.

Chen Q. 2026. Ubiquitous intelligent optimization promotes sustainable food cold chain logistics: Research progress, challenges, and future trends [Author list abbreviated in the source list supplied for RIS generation.]. Trends Food Sci Technol. 170:105593. doi:10.1016/j.tifs.2026.105593.

Karacan MA, Yilmaz IC, Yilmaz D. 2023. Key implications on food storage in cold chain by energy management perspectives. Front Sustain Food Syst. 7:1250646. doi:10.3389/fsufs.2023.1250646.

Marchi B, & Zanoni S. 2022. Cold Chain Energy Analysis for Sustainable Food and Beverage Supply.

Nento WR, Mile L, Manteu SH. 2026. Tingkat Kesegaran Yellowfin (Thunnus albacares) Teluk Tomini , Taludaa Bone Bolango Freshness Level of Tomini Bay Yellowfin (Thunnus albacares). *J Sains dan Teknol Perikan*. 6(1):39–48. doi:https://doi.org/10.55678/jikan.v5i2.2424.

Panjaitan FCA, Rama ND, Perceka ML, Dewi RN. 2026. Assessment of cold chain implementation and quality product in frozen cooked tuna loin processing: A case study from Indonesia. Food Sci J Food Sci Technol. 6(1). doi:10.33830/fsj.v6i1.11430.2026.

Perotti S, & Colicchia C. 2023. Greening warehouses through energy efficiency and environmental impact reduction: A conceptual framework based on a systematic literature review. Int J Logist Manag. 34(7):199–234. doi:10.1108/IJLM-02-2022-0086.

Petruzziello F, Grilletto A, Cilenti C, Martínez-Angeles M, Giménez-Prades P, Del Sorbo A, Mota-Babiloni A, Llopis R, Maiorino A, Aprea C. 2025. Refrigeration technologies to increase cold chain sustainability. Nat Rev Clean Technol. 1:604–620. doi:10.1038/s44359-025-00094-6.

Prinata IMR, Darmadi NM, Kawan IM. 2025. Gema Agro Implementasi GMP, SSOP, HACCP Pada Pengolahan Ikan Tuna Sirip Kuning (*Thunnus albacares*) Beku di UD Damena. 30 April:19–25.

Rahmatiyah A, Tryumansyahjaya K, Dunggio MF. 2026. Penerapan arsitektur ekologi pada sentra produksi ikan tuna di kabupaten Bone Bolango. 4(156):12–18.

Saputra D, Ula FR, Fadhila ABN, Sijabat YY, Romadoni AA, Windarto S. 2022. Nano-chitosan Spray as a Preservative and Food Security of Fishery Products in The Middle of the Covid-19 Pandemic. *J Ilm Perikan dan Kelaut*. 14(1):71–82. doi:10.20473/jipk.v14i1.30121.

Siregar RR, Maulani A, Paradiqa SP. 2025. Karakteristik Mutu Frozen Slice Tuna (*Thunnus albacares*) di PT. XYZ, Makassar – Sulawesi Selatan. November:481–501.

Tsai Y, Kung H, Lin C, Hsieh C, Ou Y, Chang T, Lee Y, Ou T, Chang T, Lee C. 2022. Impacts of high-pressure processing on quality and shelf-life of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) stored at 4 ° C and 15 ° C. Int J Food Prop. 25(1):237–251. doi:10.1080/10942912.2022.2029483.

Wibowo RBTJ, Marimin, Machfud, Anggraeni E, Taryono. 2024. Sustainable cold supply chain management of tuna agroindustry: A systematic literature review and future research. J Pengolah Has Perikan Indones. 27(9):847–871. doi:10.17844/jphpi.v27i9.54575.