
Transformasi Digital Keberlanjutan Lingkungan pada *Cold Chain* Vaksin Indonesia: Tinjauan Literatur dan Identifikasi Gap Penelitian

Niken Trisnawati

Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Duta Bangsa
Jalan Ki Mangun Sarkoro No 20, Banjarsari, Surakarta, Jawa Tengah 57135
(0271) 7470550

E-mail: niken_trisnawati@udb.ac.id

Abstrak

Rantai dingin vaksin (vaccine cold chain) berperan penting dalam menjaga kualitas vaksin di Indonesia. Keberhasilan rantai dingin dalam menjaga kualitas vaksin bergantung pada sistem penyimpanan dan distribusi yang optimal. Namun, dalam praktiknya banyak tantangan pada keberlanjutan lingkungan. Pemborosan energi, dan emisi karbon menjadi kendala optimasi logistik rantai dingin vaksin di Indonesia. Penelitian dengan menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) diharapkan dapat mengidentifikasi keuntungan utama penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan akibat sistem pendingin yang dihasilkan oleh cold chain. Hasil pencarian literatur menunjukkan bahwa IoT berpotensi besar dalam memantau anomali suhu, lokasi, serta status vaksin secara akurat dan real-time, sehingga dapat mengurangi pemborosan penggunaan energi dan emisi karbon. Penerapan IoT di Indonesia masih sangat terbatas karena kendala finansial, teknis, maupun operasional. Sehingga penelitian ini akan lebih menonjolkan rantai dingin untuk distribusi vaksin imunisasi anak, kaitannya dengan penggunaan IoT dalam mereduksi energi yang digunakan pada fasilitas rantai dingin yang disediakan oleh industri maupun pemerintah. Penelitian ini diharapkan memberikan gambaran secara komprehensif terkait penggunaan IoT sebagai bahan pengambilan keputusan pemerintah, dan para pemangku kepentingan agar proses distribusi vaksin bisa dilakukan secara menyeluruh dan mendukung keberlanjutan lingkungan.

Kata Kunci: rantai dingin vaksin, distribusi vaksin, Internet of Things, karbon emisi, efisiensi energi rantai dingin

Abstract

The vaccine cold chain is important in maintaining vaccine quality in Indonesia. The success of the cold chain in maintaining vaccine quality depends on optimal storage and distribution systems. However, in practice, there are many challenges to environmental sustainability. Energy waste and carbon emissions are obstacles to optimizing vaccine cold chain logistics in Indonesia. Research using the Systematic Literature Review (SLR) method is expected to identify the main advantages of implementing Internet of Things (IoT) technology in increasing energy efficiency and reducing environmental impacts due to the cooling system produced by the cold chain. The results of the literature search show that IoT has great potential in accurately combining temperature anomalies, location, and vaccine status in real-time, to reduce wasted energy use and carbon emissions. The application of IoT in Indonesia is still very limited due to financial, technical, and operational constraints. So, this research will focus more on the cold chain for distribution of child immunization vaccines, concerning the use of IoT in reducing the energy used in cold chain facilities provided by industry and government. This research is expected to provide a comprehensive picture regarding the use of IoT as a decision-making material for the government and stakeholders so that the vaccine distribution process can be carried out comprehensively and support environmental sustainability.

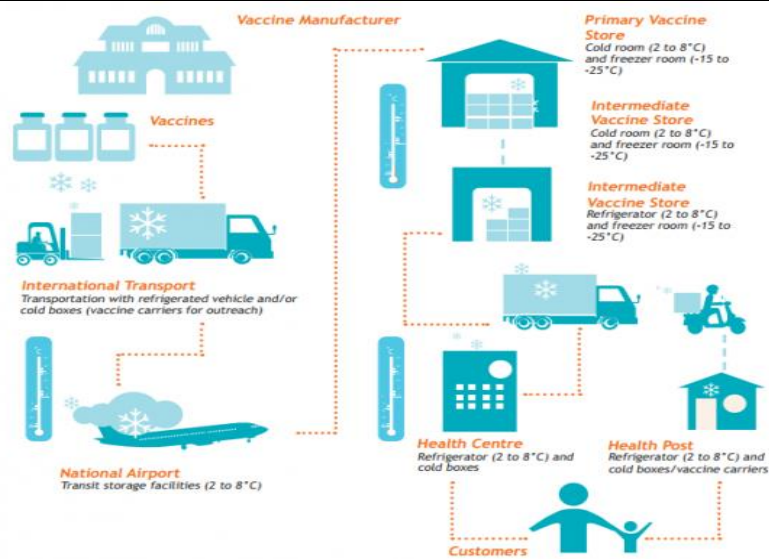
Keywords: vaccine cold chain, vaccine distribution, Internet of Things, emission carbon, energy efficiency

1. Pendahuluan

Imunisasi adalah salah satu upaya untuk meningkatkan kekebalan tubuh dan pemberantasan penyakit menular (Ranuh, 2001). Tujuan dari imunisasi adalah membentuk *herd immunity* atau yang disebut dengan kekebalan kelompok, dimana imunisasi merupakan upaya yang dilakukan oleh pemerintah untuk membentuk kekebalan tubuh anak sehingga mencegah penularan terhadap penyakit berbahaya, dan membantu anak agar tidak mudah sakit akibat PD3I (Penyakit yang Dapat Dicegah Dengan Imunisasi). Imunisasi tersebut pun harus diberikan sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan oleh Kementerian Kesehatan dan Ikatan Dokter Anak Indonesia (IDAI). Imunisasi adalah proses pembentukan kekebalan tubuh terhadap suatu penyakit. Proses ini dilakukan melalui pemberian vaksin, baik berupa suntikan ataupun minum. Organisasi Kesehatan Dunia atau *World Health Organization* (WHO) menyebutkan hampir 1,7 juta anak di bawah lima tahun meninggal karena penyakit yang dapat dicegah oleh imunisasi. Pada tahun 2024, dilaporkan sebanyak 2,8 juta anak yang tidak atau belum mendapatkan imunisasi lengkap di tahun 2021-2023. Anak-anak tersebut tersebar di 309 kabupaten/kota yang terdapat di 38 provinsi. Kondisi ini mendorong Indonesia mengejar ketertinggalan untuk menutup gap imunitas dengan memperbaiki manajemen pengelolaan vaksin baik dari segi kualitas dan kuantitas vaksin. Untuk mencapai ketertinggalan tersebut, Indonesia melaksanakan program imunisasi nasional yang terintegrasi dengan fokus pada layanan imunisasi dasar lengkap pada anak dibawah dua tahun (Kemenkes, 2022).

Keberhasilan program imunisasi tersebut ditentukan dengan peningkatan ketersediaan dan kualitas vaksin. Dalam menjaga kualitas vaksin tersebut, maka membutuhkan penanganan khusus dalam proses penyimpanan dan pendistribusian. Sistem penyimpanan dan pendistribusian dalam rantai pasokan vaksin disebut dengan sistem rantai dingin atau *cold chain system*. Rantai pasokan berpendingin atau disebut dengan *cold chain*, sangat penting dalam menjaga kualitas produk yang mudah rusak (misalnya, makanan segar, obat-obatan, vaksin) dengan mencegah pembusukan produk dan menjaga nilainya (Heard dan Miller, 2016). Sistem rantai dingin merupakan suatu prosedur yang dilakukan untuk tetap menjaga suhu vaksin dalam keadaan yang stabil, agar keamanan dan kualitas vaksin tetap terjaga.

Rantai dingin vaksin tersebut dimulai dari pre-cooling di pabrik/industri farmasi, penyimpanan gudang berpendingin (*refrigerated warehouse storage*), transportasi dan distribusi dengan penyimpanan berpendingin (*refrigerated transportation and distribution*), penyimpanan sebelum digunakan (*refrigerated retail*) hingga diberikan kepada pelanggan (Kuo dan Chen 2010, Li 2016, Zhao et al 2018). Berdasarkan peraturan WHO, seluruh pengiriman tidak boleh melebihi 48 jam. Proses penyimpanan sampai pada saat proses pendistribusian vaksin melalui transportasi harus sudah melengkapi syarat rantai dingin yang baik dan benar. Menurut Permenkes Nomor 12 Tahun 2017 tentang Penyelenggaraan Imunisasi disebutkan bahwa vaksin merupakan produk biologis yang mudah rusak sehingga harus disimpan pada suhu tertentu, yakni pada suhu 2 sampai 8°C untuk vaksin sensitif beku (tidak boleh beku), dan pada suhu -15 s.d -25 °C untuk vaksin yang sensitif panas. Secara umum, vaksin akan rusak jika terpapar oleh sinar matahari secara langsung. Adanya sistem manajemen rantai dingin yang efektif dan efisien bertujuan untuk mempertahankan kualitas vaksin, sehingga pada saat vaksin digunakan, potensi vaksin masih tetap terjaga (Ranuh, 2017). Sebagian besar vaksin di Indonesia termasuk vaksin imunisasi anak terbesar diproduksi oleh perusahaan farmasi Biofarma. Gambaran mengenai sistem rantai dingin Biofarma ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Rantai Dingin Vaksin Biofarma

Operasi rantai dingin dan rantai pasokan imunisasi saat ini telah menjadi salah satu elemen kunci dalam memperluas penyediaan layanan imunisasi harian. Meskipun rantai dingin telah diakui efektif dalam proses logistik pasokan vaksinasi, akan tetapi tantangan utama dalam pengelolaannya adalah infrastruktur yang terbatas dan kurang memadai, dimana suhu dan kondisi penyimpanan yang optimal sulit dipertahankan. Hal tersebut memicu adanya pemborosan energi dari fasilitas rantai dingin. Selain pemborosan energi, penggunaan bahan dan alat pendingin yang tidak ramah lingkungan, dan permasalahan akses logistik di daerah terpencil juga menambah jejak karbon yang berdampak buruk pada keberlanjutan lingkungan. Penyimpanan berpendingin (baik sebelum distribusi maupun sesudah distribusi) dan transportasi berpendingin bergantung pada teknologi pendingin yang didasarkan pada siklus pendinginan termodinamika termasuk penguapan, zat pendingin, kompresi, kondensasi, dan ekspansi. Kompresor penyimpanan berpendingin biasanya digerakkan oleh listrik dan kompresor kendaraan berpendingin digerakkan oleh mesin kendaraan, motor listrik, atau alat bantu mesin (Tassou et al, 2009, Wu et al, 2013). Sistem pendingin dirancang untuk secara tertutup, namun emisi GHG masih terjadi karena adanya kebocoran zat pendingin dan pembuangan yang sudah habis masa pakainya. Secara luas hydrochlorofluorocarbon yang terkandung pada pendingin memiliki efek penipisan ozon dan didrofluorokarbon tradisional memiliki potensi pemanasan global yang tinggi. Kebocoran zat pendingin secara langsung menyebabkan perubahan iklim yang serius. Oleh karena itu, penetrasi refrigeran bersih yang lebih besar diharapkan terjadi di masa depan (Tassou et al, 2011, Beshr et al 2015, Acha et al, 2016). Selain itu, emisi GHG dari fasilitas pendingin juga ikut berpengaruh dari konsumsi energi yang menyumbang sekitar 70%–80% dari total emisi GHG fasilitas rantai dingin (International Institute of Refrigeration, 2015; International Energy Agency, 2020).

Namun, seiring dengan kemajuan teknologi, salah satu solusi yang dapat mengatasi tantangan ini adalah penerapan teknologi Internet of Things (IoT). IoT berpotensi dalam meningkatkan pengelolaan rantai dingin vaksin, dengan menyediakan sistem pemantauan suhu, lokasi, status vaksin, maupun penggunaan energi dari fasilitas pendingin secara *real-time*. Teknologi IoT telah merevolusi pemantauan suhu dan kelembapan dalam rantai pasokan farmasi, dan memberikan manfaat yang signifikan dalam menjaga keamanan obat (Mwang'onda, Kanthonga, dan Hwata, 2023). Sistem ini tidak hanya mengumpulkan data tetapi juga mengirimkan peringatan segera jika terjadi anomali suhu (Panigrahi, Vanitha, Palav, Bogiri et al, 2024). Dengan adanya pemantauan suhu yang terus menerus akan membantu mengurangi konsumsi dan pemborosan energi. Dengan adanya integrasi sensor suhu dari perangkat IoT, fasilitas pendingin akan menyesuaikan tingkat

pendinginan berdasarkan kondisi suhu lingkungan aktual sehingga sistem fasilitas pendingin akan meningkatkan atau menurunkan kapasitas pendinginan pada saat dibutuhkan. Pada sistem pendingin tradisional, pendingin akan bekerja pada pengaturan tetap sehingga alat pendingin akan bekerja terus-menerus tanpa memperhatikan suhu secara tepat. Hal tersebut menyebabkan adanya pemborosan energi yang dihasilkan. Dalam *smart transportation*, teknologi IoT juga memainkan peran penting dalam pengurangan jumlah emisi karbon dengan memungkinkan sistem transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Lv, Zhihan, Shang, Wenlong, 2002). Sistem sensor IoT yang dihubungkan dengan GPS transportasi pendingin juga dapat memberikan data secara analitik dan *real time* terkait informasi lalu lintas, titik kemacetan, kondisi jalan, kondisi cuaca dan penerapan strategi lalu lintas yang dinamis (39). Informasi ini akan sangat bermanfaat pada proses distribusi vaksin ke berbagai daerah di Indonesia baik daerah terpencil maupun daerah perkotaan, karena dengan melakukan optimalisasi arus lalu lintas dapat mengurangi waktu henti, dan akan menurunkan tingkat emisi karbon secara signifikan (69-71).

Akan tetapi dalam negara berkembang, peran IoT dalam meningkatkan efisiensi rantai dingin vaksin masih sangat terbatas baik secara finansial maupun operasional. Penelitian tentang peran IoT dalam mengurangi emisi karbon dan keberlanjutan distribusi vaksin juga masih sangat terbatas. Dalam artikel ini, penulis menyajikan contoh nyata proses rantai dingin di Indonesia dan menghubungkan langsung dengan dampak terhadap lingkungan. Sehingga artikel ini akan menyoroti dua poin utama yaitu menunjukkan dampak total emisi fasilitas pendingin terhadap lingkungan hidup, serta penerapan teknologi dalam memantau penggunaan energi dan emisi karbon yang dihasilkan. Untuk melakukan *studi review*, penulis memilih publikasi jurnal akademik, laporan industri farmasi, laporan Kementerian Kesehatan dan IDAI dalam bahasa Inggris dan Indonesia. Jurnal dikumpulkan dari koleksi database *Scencedirect*, *Google Scholar*, *Emerald Insight*, *Semantic Scholar*, dan *IEEE* dengan berbagai kata kunci yang relevan. Secara umum, struktur penulisan artikel ini terdiri dari, bagian 1 yaitu latar belakang, tinjauan pustaka yang mengenalkan secara singkat mekanisme logistik rantai dingin vaksin serta peran IoT dalam efisiensi energi pada rantai dingin. Bagian 2 metode penelitian yang menjelaskan sistematika penyusunan *literature review* dan penentuan celah penelitian. Bagian 3 membahas hasil tinjauan studi yang telah dikelompokkan dan membahas penerapan IoT dalam rantai dingin vaksin serta dampaknya terhadap keberlanjutan lingkungan. Bagian 4 membahas mengevaluasi kekurangan penelitian saat ini dan membahas masalah pengembangan rantai dingin di masa depan.

2. Metodologi

Penelitian mengenai peran IoT pada distribusi rantai dingin bukanlah suatu studi yang baru. Dalam penelitian ini, tinjauan studi menggunakan analisis komprehensif dari informasi kualitatif. Beberapa penelitian sebelumnya banyak membahas tentang peran IoT pada sektor makanan dan farmasi, tetapi hanya terfokus pada industri secara global. Meskipun telah banyak artikel yang telah dipublikasikan tentang penerapan IoT dalam industri farmasi, namun belum ada penelitian menyeluruh yang mengkaji temuan terkait peran digitalisasi pada efisiensi distribusi rantai dingin vaksin dan peran teknologi pada pengurangan emisi karbon di Indonesia.

Metode yang digunakan dalam tinjauan literatur ini adalah *Systematic Literature Review* (SLR). Hal pertama yang perlu dilakukan dalam metode SLR adalah dengan mengumpulkan berbagai literatur dan penelitian terdahulu sebagai sumber dalam mendapatkan hasil penelitian. Penelitian ini akan menjawab pertanyaan sebagai berikut:

- a. Bagaimana IoT dapat meningkatkan efisiensi rantai dingin vaksin di Indonesia?
- b. Bagaimana penerapan teknologi IoT dalam rantai dingin vaksin dapat mendukung keberlanjutan lingkungan?
- c. Apa kekurangan yang ada dalam penelitian sebelumnya pada distribusi rantai dingin vaksin?

2.1 Prosedur *Systematic Literature Review*

Dalam metode *systematic literature review*, terdapat dua kriteria yaitu kriteria inklusi dan kriteria eksklusi. Kriteria inklusi merupakan kriteria yang membuat suatu penelitian dimasukkan dalam SLR. Sedangkan kriteria eksklusi merupakan kriteria yang membuat sebuah penelitian akhirnya dikeluarkan dari SLR (Nikou dan Economides, 2018).

a. Kriteria Inklusi

- 1) Penelitian harus berfokus pada aspek yang berhubungan dengan penggunaan IoT dalam rantai dingin vaksin, imunisasi anak, dan industri farmasi.
- 2) Penelitian harus secara langsung membahas tentang dampak teknologi pada sistem distribusi rantai dingin terhadap strategi pengurangan karbon atau mitigasi emisi.
- 3) Penelitian harus relevan dengan peran teknologi IoT dalam mengatasi tantangan emisi karbon dalam konteks rantai dingin vaksin
- 4) Studi/penelitian yang diterbitkan dalam 5 tahun terakhir (2020-2025) akan disertakan untuk memastikan relevansi dan temuan kekinian terkait penggunaan teknologi.
- 5) Hanya studi/artikel/penelitian yang dipublikasikan di jurnal *peer-review*, prosiding konferensi, atau sumber ilmiah bereputasi yang akan dipertimbangkan.

b. Kriteria Eksklusi

Penelitian yang tidak secara spesifik membahas rantai dingin vaksin atau pengurangan emisi karbon dalam konteks teknologi IoT pada rantai dingin akan dikecualikan.

- 1) Penelitian yang tidak berfokus pada penerapan teknologi IoT pada rantai dingin vaksin/industri farmasi
- 2) Studi/penelitian yang tidak memiliki kaitan dengan topik keberlanjutan lingkungan atau pengurangan emisi karbon (misalnya aplikasi IoT pada sistem manufaktur)
- 3) Penelitian yang tidak memiliki fleksibilitas untuk akses penuh

Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan beberapa sumber database antara lain *Google Scholar*, *Science Direct*, *Emerald Insight*, *IEEE Xplore*, *Semantic Scholar*, dan *SpringerLink*. Dari lima database tersebut, kata kunci yang sama digunakan untuk mencari artikel dan jurnal ilmiah. Hasil ekstraksi dari beberapa database menghasilkan hasil pencarian yang berbeda-beda. *Google scholar*, *science direct*, dan *IEEE* lebih fleksibel dalam metode pencarian dimana peneliti dengan bebas mengetikkan kaidah kata kunci sesuai dengan tema penelitian. Namun, *science direct*, *emerald insight*, dan *IEEE* memiliki kelemahan karena beberapa artikel atau jurnal ilmiah yang belum dapat diakses dengan bebas. Penulis terutama berfokus pada artikel ilmiah dari kumpulan data *Google Scholar* dan *Science direct* karena dapat mempermudah penulis dalam hal pengutipan dan memiliki berbagai macam penulis untuk semua jenis penelitian. Tahapan proses seleksi *literature review* yang dilakukan adalah sebagai berikut (Wardati and Er, 2019):

- a. Mencari literatur pada database yang relevan berdasarkan kesesuaian kata kunci sesuai dengan judul
- b. Melakukan eliminasi terhadap literatur yang tidak memenuhi kriteria inklusi dan memenuhi kriteria eksklusi
- c. Membaca abstrak dari masing-masing literatur yang judulnya memenuhi syarat. Melakukan eliminasi berdasarkan relevansi abstrak
- d. Membaca keseluruhan penelitian dan mengevaluasi kualitas dari artikel/studi/penelitian
- e. Memilih literatur yang lolos tahap evaluasi

Tahap mencari literatur dilakukan dengan cara menggunakan kata kunci tertentu ditinjau dari relevansi berbagai aspek sesuai dengan abstrak dan judul. Kata kunci yang mengaitkan IoT dengan sistem rantai dingin di bidang distribusi vaksin dan industri farmasi, antara lain “**vaccine cold chain distribution**”; “**IoT**” AND “**cold chain vaccine distribution**”; “**IoT**” AND “**immunization cold chain system**”; “**cold chain**” AND “**carbon emission**”; “**refrigerated technology**” AND “**carbon emission**”; “**IoT**” AND “**carbon emission**”; “**IoT**” AND “**energy efficiency**”.

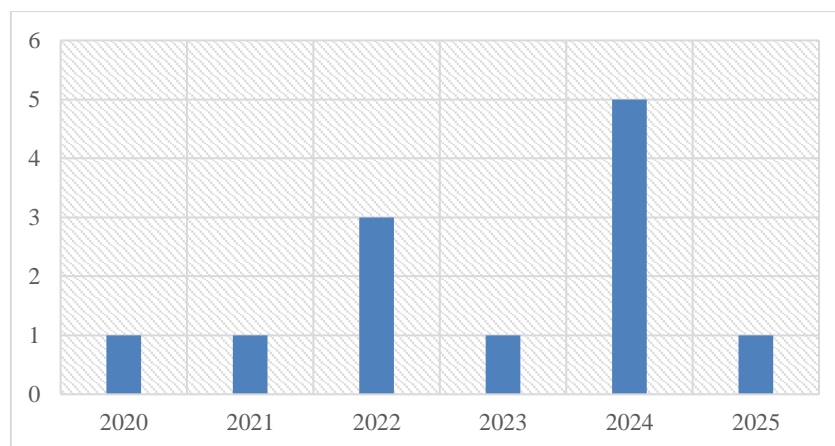
Tabel 1. Studi/Penelitian *Systematic Literature* dari hasil pencarian

Kriteria	Google Scholar	Science Direct
Sesuai dengan kata kunci yang dimasukkan	3830	1235
Jurnal/artikel yang diterima	440	228
Dipublikasikan pada 2014-2024	143	96
Kata kunci yang sesuai dengan judul, abstrak, dan kata kunci	22	17
Abstrak menjawab rumusan masalah penelitian	8	4

Setelah literatur dipilih berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, langkah selanjutnya adalah menilai masing-masing kualitas jurnal. Dari 39 jurnal tersebut dilakukan seleksi ulang, hingga diperoleh 12 jurnal. Jurnal tersebut akan dianalisis untuk mencapai pemahaman yang lebih mendalam apakah jurnal tersebut sesuai dengan topik dan rumusan masalah dalam penelitian ini. Langkah terakhir dalam metodologi ini adalah sintesis. Tahapan ini dilakukan untuk menjawab rumusan masalah yang diidentifikasi dalam pendahuluan. Sintesis *Systematic Literature Review* (SLR) dilakukan dengan mengelompokkan temuan penelitian berdasarkan topik dan judul utama yaitu antara lain **penggunaan IoT dalam memantau suhu vaksin, lokasi, dan kualitas vaksin; dampak penggunaan fasilitas pendingin pada sistem rantai dingin terhadap keberlanjutan lingkungan; serta dampak teknologi IoT terhadap peningkatan efisiensi sumber daya, pemborosan energi, dan pengurangan emisi karbon.** Selain itu sintesis data bertujuan untuk mengidentifikasi kelemahan penelitian saat ini dan menentukan celah penelitian di masa depan.

3. Hasil dan Pembahasan

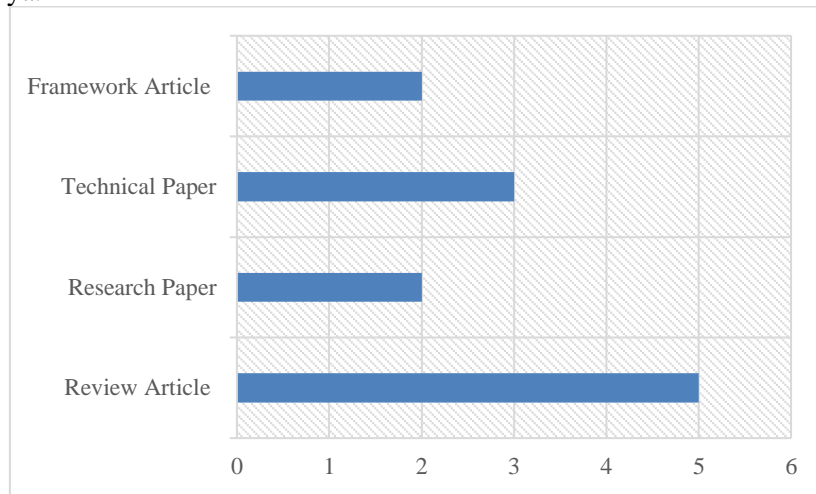
Berdasarkan hasil sintesis, terdapat 12 jurnal yang akan dijadikan literatur utama dalam penelitian ini. 12 jurnal tersebut menggunakan studi kasus yang berbeda dari berbagai negara dan sudut pandang. Sebaran tahun penelitian dimulai di tahun 2020, dimana pada saat itu rantai dingin banyak digunakan untuk distribusi vaksin Covid-19. Gambar 2 menunjukkan data sebaran tahun penelitian dari 12 artikel dan jurnal, dimana penerapan IoT dalam rantai dingin paling banyak dibahas pada penelitian di tahun 2024 dan tahun 2022.



Gambar 2. Sebaran Tahun Penelitian

Berdasarkan hasil sebaran tahun penelitian, juga dapat dikelompokkan berdasarkan jenis penelitian yang dilakukan oleh masing-masing penulis. Gambar 3 menunjukkan jenis penelitian dari hasil pencarian literatur. Sebagian besar jenis penelitian yang dilakukan adalah *review article* (46,7%), dimana sebagian besar penulis membahas tentang gambaran penelitian tentang peran

dan penerapan IoT untuk rantai dingin vaksin maupun IoT untuk efisiensi energi. Jenis penelitian terbesar kedua yaitu *technical paper* (25%), dimana dalam penelitian ini penulis membuat alat sensor yang kemudian diterapkan secara langsung dalam logistik rantai dingin vaksin maupun farmasi lainnya.



Gambar 3. Tipe Penelitian

Secara geografis penelitian-penelitian tersebut juga dilakukan di berbagai negara seperti Cina, India, Bangladesh, Indonesia, USA, Malaysia, Saudi Arabia, dan Morocco. Tabel 2 menunjukkan ringkasan dari penemuan literatur, yang mendemonstrasikan gagasan utama terkait dengan keuntungan penggunaan IoT pada rantai dingin dan transportasi vaksin sekaligus terhadap efisiensi energi.

Berdasarkan Tabel 2 yang digunakan dalam penelitian, sebagian besar jurnal hanya menyebutkan vaksin secara umum, tetapi tidak menyebutkan jenis vaksin secara spesifik. Selain itu, sebagian besar penggunaan IoT digunakan untuk memantau dan menstabilkan suhu dan kelembapan pada fasilitas pendingin, lokasi distribusi vaksin, dan lalu lintas distribusi vaksin secara *real-time*. Dalam konteks keberlangsungan lingkungan, secara umum penelitian tersebut membahas tentang penggunaan IoT untuk memantau emisi karbon GHG, penghematan energi dan konsumsi daya, serta pengelolaan beban listrik. Secara keseluruhan, IoT digunakan sebagai bentuk transparansi rantai pasok, mempermudah pengawasan oleh semua pihak yang terkait, sehingga keamanan dalam proses distribusi dapat ditingkatkan. Dalam jangka panjang, penggunaan IoT dalam rantai dingin vaksin akan memberikan efisiensi logistik dimana dapat memantau agar kualitas vaksin tetap terjaga baik sehingga pemborosan akibat vaksin yang rusak dapat dikurangi. Begitu pula dengan lingkungan, semakin adanya teknologi maka akan semakin mempermudah proses distribusi, hal tersebut juga perlu diikuti dengan perhatian pemangku kepentingan terhadap efek lingkungan yang ditinggalkan. Sehingga IoT bukan hanya digunakan untuk transparansi kualitas dan lokasi vaksin, tetapi juga perlu untuk transparansi emisi karbon yang dihasilkan baik dari gudang penyimpanan maupun alat transportasi yang digunakan pada saat distribusi vaksin keseluruhan pelosok.

Di Indonesia, distribusi rantai dingin telah banyak diterapkan oleh Kementerian Kesehatan sejak tahun 2017. Pasca Pandemi Covid-19 dan perubahan iklim, vaksin sangat dibutuhkan oleh masyarakat di Indonesia terutama anak-anak karena semakin beragam jenis penyakit yang menyerang. Pemerintah juga saat ini telah gencar dalam memperbaiki sistem rantai dingin pasokan vaksin ke seluruh pelosok Indonesia agar semakin banyak masyarakat terutama anak-anak yang mendapatkan hak vaksinasinya. Berbagai penelitian juga telah banyak dilakukan dalam pembuatan sensor IoT untuk distribusi makanan, dan industri farmasi lainnya. Tidak dapat dipungkiri pengadaan teknologi membutuhkan pendanaan yang mencukupi, selain itu bergantung

pada sumber daya yang akan memanfaatkan teknologi tersebut. Literatur yang telah dirangkum, menyarankan bahwa keuntungan utama penggunaan teknologi *Internet of Thing* (IoT) pada rantai pasok *cold chain* dapat meningkatkan pemantauan dan pengambilan data secara akurat dan *real-time*. IoT menonjolkan manfaat dalam peningkatan visibilitas dan transparansi rantai pasok secara keseluruhan. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi secara mendalam teknologi IoT untuk distribusi vaksin yang lebih cepat dan menyeluruh sehingga diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dan inspirasi bagi para pemangku kepentingan. Namun beberapa pertanyaan perlu dijawab lebih lanjut :

- a. Strategi penerapan sistem rantai pasokan berkelanjutan untuk rantai dingin vaksin
Beberapa penelitian di Indonesia belum banyak mengkaji sistem rantai pasok vaksin berkelanjutan dimana memiliki tantangan geografis dan infrastruktur yang berbeda. Beberapa aspek tersebut masih kurang dieksplorasi. Topik tersebut bisa dikembangkan dengan penerapan teknologi dalam memantau lalu lintas, kondisi jalan sehingga tidak banyak energi dan daya yang digunakan oleh transportasi pada saat pengiriman ke daerah terpencil.
- b. Kesiapan infrastruktur, *peran stakeholder*, dan kebijakan pemerintah di Indonesia
Penelitian ini sangat menekankan dan menyarankan penggunaan IoT untuk proses distribusi dan logistik vaksin di Indonesia. Hal ini perlu diperkuat oleh adanya infrastruktur penyimpanan dan transportasi baik di perkotaan maupun di daerah terpencil agar distribusi vaksin lebih menyeluruh. Selain itu juga, peran kolaborasi baik dari industri farmasi, Pedagang Besar Farmasi, penyedia teknologi, dan fasilitas kesehatan sangat penting dalam mendukung keberlanjutan lingkungan dalam rantai dingin vaksin di Indonesia.
- c. Strategi rute distribusi rantai dingin
Dengan adanya teknologi IoT dalam memantau lalu lintas, titik kemacetan, waktu tempuh seharusnya juga perlu diikuti strategi dalam mengoptimalkan jarak tempuh agar pengurangan emisi karbon juga bisa ditingkatkan. Optimasi rute pengiriman perlu diperhitungkan sehingga dapat diketahui seberapa besar pengurangan emisi karbon dan penghematan daya dengan adanya jarak tempuh baru yang lebih optimal.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Penelitian

No	Title	Topik Utama	Keuntungan IoT
1	<i>Vaccine Cold Chain Management and Cold Storage Technology to Address the Challenges of Vaccination Programs</i> (Pambudi et al., 2022)	Membahas pentingnya manajemen rantai dingin yang efisien dan teknologi penyimpanan dingin inovatif untuk memastikan efektivitas dan keamanan vaksin selama distribusi.	IoT membantu stabilisasi suhu, pemantauan, dan manajemen fasilitas penyimpanan dingin untuk mencegah pemborosan vaksin.
2	<i>An IoT-based Real-time Data-centric Monitoring System for Vaccine Cold Chain</i> (Hasanat et al., 2020)	Memperkenalkan sistem pemantauan berbasis data real-time untuk transportasi vaksin, berfokus pada pemantauan terus-menerus suhu dan kelembapan, serta pelacakan lokasi untuk memastikan keamanan vaksin.	Pemantauan dan pemberitahuan real-time meningkatkan transparansi, akuntabilitas, serta mengurangi pemborosan vaksin akibat pelanggaran suhu.
No	Title	Topik Utama	Keuntungan IoT
3	<i>Designing an Integrated Responsive-green-cold Vaccine</i>	Mengembangkan model multi-obyektif, multi-periode, dan multi-echelon untuk	IoT memungkinkan pengumpulan dan manajemen data real-time,

	<i>Supply Chain Network using IoT AI-Based Solutions</i> (Goodarzian et al., 2023)	mengoptimalkan distribusi vaksin, mengintegrasikan IoT dan AI untuk meningkatkan efisiensi rantai pasokan selama pandemi COVID-19.	meningkatkan responsivitas rantai pasokan, mengurangi limbah, serta memastikan distribusi vaksin yang adil.
4	<i>Smart Transportation and Carbon Emission from the Perspective of AI, IoT, and Blockchain</i> (Kashem, Shamsuddoha and Nasir, 2024)	Artikel ini meninjau bagaimana AI, IoT, dan blockchain dapat diintegrasikan untuk meningkatkan sistem transportasi cerdas, bertujuan mengurangi kemacetan lalu lintas, mengoptimalkan logistik, dan menurunkan emisi karbon.	<ul style="list-style-type: none"> - Manajemen data lalu lintas real-time untuk mengoptimalkan transportasi - Keamanan lalu lintas yang ditingkatkan dan pengurangan emisi - Blockchain untuk catatan transportasi yang aman dan terdesentralisasi
5	<i>Enhancing Cold Chain Logistics: A Framework for Advanced Temperature Monitoring in Transportation and Storage</i> (Pajić, Andrejić and Chatterjee, 2024)	Studi ini menyajikan kerangka kerja komprehensif untuk pemantauan suhu canggih dalam logistik rantai dingin, berfokus pada transportasi dan penyimpanan untuk mencegah pemborosan serta memastikan integritas produk.	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor berbasis IoT untuk pemantauan suhu real-time - Sistem manajemen data untuk pengendalian proaktif - Meningkatkan keandalan dan efisiensi logistik rantai dingin
6	<i>Design and Development of IoT-based system for Monitoring Energy Consumption</i> (Shafiq Bin Anuar and Yew Heng, 2022)	Mengembangkan sistem berbasis IoT untuk memonitor dan mengelola konsumsi energi rumah tangga secara efisien.	Penghematan energi, pengelolaan beban listrik terjadwal dan tidak terjadwal, serta peningkatan efisiensi konsumsi daya.
7	<i>Overview of Cold Chain Development in China and Methods of Studying its Environmental Impacts</i> (Dong, Xu and Miller, 2020)	Makalah ini menganalisis logistik rantai dingin di Cina, menekankan dampak lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan memeriksa metode penilaian siklus hidup untuk mengevaluasi keberlanjutan.	<ul style="list-style-type: none"> - Aplikasi IoT dalam sistem refrigerasi untuk efisiensi energi yang lebih baik - Pemantauan data siklus hidup untuk melacak emisi GHG - Keamanan pengurangan pemborosan melalui proses optimalisasi rantai dingin
8	<i>A Hybrid Framework of Blockchain and IoT Technology in the Pharmaceutical Industry</i> (Emmanuel et al., 2023)	Menganalisis dan mengembangkan framework hybrid Blockchain dan IoT untuk mengurangi pemalsuan obat.	Transparansi rantai pasok, pelacakan obat, mitigasi pemalsuan obat, serta peningkatan keamanan dan keandalan data.
No	Title	Topik Utama	Keuntungan IoT
9	<i>IoT-Based Real-Time Cold Chain Monitoring System for Diabetes</i>	Mengembangkan sistem pemantauan rantai dingin real-time berbasis IoT untuk obat	Pelacakan suhu, kelembapan, dan lokasi secara real-time,

	<i>Medication</i> (Bouazzi and Zaidi, no date)	diabetes, menggunakan RFID, sensor, dan GPS untuk meningkatkan keselamatan farmasi.	pengurangan pemborosan, efisiensi logistik, dan peningkatan transparansi serta kepercayaan di antara para pemangku kepentingan.
10	<i>The Use of IoT in the Cold Chain Logistics for a Better Vaccine Transportation</i> (Izikki, Alami and Hlyal, 2021)	Meninjau penggunaan IoT dalam logistik rantai dingin untuk distribusi vaksin, fokus pada efisiensi dan kualitas.	Pemantauan suhu dan kelembaban secara real-time, visibilitas rantai pasok, pengurangan pemborosan, dan pengambilan keputusan yang lebih baik.
11	<i>Internet of Things (IoT)-Enabled Framework for a Sustainable Vaccine Cold Chain Management System</i> (Jiang, Jia and Guo, 2024)	Mengusulkan framework berbasis IoT untuk manajemen rantai dingin vaksin yang berkelanjutan, meningkatkan keamanan dan efektivitas distribusi vaksin.	Pemantauan suhu real-time, pengelolaan data yang terintegrasi, notifikasi anomali suhu, dan pengurangan pemborosan vaksin melalui manajemen yang transparan.
12	<i>An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage & Transportation Management</i> (Alshdadi et al., 2024)	Merancang sistem berbasis IoT untuk memantau kondisi penyimpanan dan transportasi produk rantai dingin (makanan dan farmasi), dengan uji coba di Jeddah.	Efisiensi logistik, pengelolaan data berbasis cloud, pengawasan transparan oleh semua pihak (dari produsen hingga konsumen), dan deteksi dini terhadap kondisi anomali.

4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi dan memahami manfaat pentingnya teknologi Internet of Things (IoT) pada rantai dingin vaksin di Indonesia melalui tinjauan literatur dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR). Berdasarkan 12 jurnal yang dirangkum, IoT memberikan potensi pengurangan emisi karbon, efisiensi daya dan energi, dan secara langsung juga akan menjaga kualitas vaksin selama proses distribusi baik di tempat penyimpanan maupun dalam transportasi. Teknologi ini memungkinkan pemantauan secara *real-time*, dan juga memberikan data analitis yang akurat terhadap suhu, lokasi, lalu lintas, penggunaan energi listrik, sehingga dapat meningkatkan visibilitas dan transparansi selama proses distribusi. Pemangku kepentingan juga dapat mengevaluasi *carbon footprint* yang dihasilkan dari masing-masing infrastruktur yang ada. Penelitian ini hanya berfokus pada peran IoT dalam memantau jalannya proses distribusi rantai dingin vaksin di Indonesia. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan wawasan terkait eksekusi secara teknis dari pemakaian teknologi IoT untuk menghadapi kendala infrastruktur, biaya dan keterbatasan teknologi di daerah terpencil. Aspek lain yang perlu diteliti adalah optimasi rute distribusi rantai dingin, agar lebih optimal dalam pengurangan emisi karbon yang diakibatkan oleh transportasi *cold chain* yang digunakan.

Daftar Pustaka

Acha S, Du Y and Shah N 2016 Enhancing energy efficiency in supermarket refrigeration systems through a robust energy performance indicator. *Int. J. Refrig Elsevier* 64 40–50.

Alshdadi, A. *et al.* (2024) 'An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management', *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(2), pp. 13167–13172.

Beshr M et al 2015 A comparative study on the environmental impact of supermarket refrigeration systems using low GWP refrigerants *Int. J. Refrig Elsevier Ltd and IIR* 56 154–64.

Bouazzi, I. and Zaidi, M. (no date) *IoT-Based Real-Time Cold Chain Monitoring System for Diabetes Medication: Integrating RFID and Sensor Technology for Enhanced Pharmaceutical Safety in Saudi Arabia*.

Dong, Y., Xu, M. and Miller, S.A. (2020) 'Overview of cold chain development in china and methods of studying its environmental impacts', *Environmental Research Communications*, 2(12).

Emmanuel, A.A. *et al.* (2023) 'A Hybrid Framework of Blockchain and IoT Technology in the Pharmaceutical Industry: A Comprehensive Study', *Mobile Information Systems*. Hindawi Limited.

Goodarzian, F. *et al.* (2023) 'Designing an integrated responsive-green-cold vaccine supply chain network using Internet-of-Things: artificial intelligence-based solutions', *Annals of Operations Research*, 328(1), pp. 531–575.

Hasanat, R.T. *et al.* (2020) *An IoT based Real-time Data-centric Monitoring System for Vaccine Cold Chain; An IoT based Real-time Data-centric Monitoring System for Vaccine Cold Chain*.

Heard, B. ., & Miller, S. . (2016). Critical research needed to examine the environmental impacts of expanded refrigeration on the food system. *Environ. Sci. Technol. American Chemical Society*, 50(12), 60–71.

International Energy Agency. 2020. Data and statistics Available at: <https://iea.org/data-and-statistics>.

International Institute of Refrigeration. 2015. The Role of Refrigeration in the Economy, 29th Informatory Note on Refrigeration Technologies.

Izikki, K., Alami, J. El and Hlyal, M. (2021) *The Use of the Internet of Things in the Cold Chain Logistics for a Better Vaccine Transportation: A State of the Art*.

Jiang, S., Jia, S. and Guo, H. (2024) 'Internet of Things (IoT)-enabled framework for a sustainable Vaccine cold chain management system', *Heliyon*. Elsevier Ltd.

Kashem, M.A., Shamsuddoha, M. and Nasir, T. (2024) 'Smart Transportation and Carbon Emission from the Perspective of Artificial Intelligence, Internet of Things, and Blockchain: A Review for Sustainable Future'.

Kemenkes RI. (2022). Petunjuk Teknis Penyelenggaraan Bulan Imunisasi Anak Nasional. Kementerian Kesehatan RI, 4(11), 1-57.

Kuo J C and Chen M C 2010 Developing an advanced multi-temperature joint distribution system for the food cold chain *Food Control*. Elsevier Ltd 21 559–66

Li X 2016 *Development of Cold Chain Logistics in China* Singapore: Springer

N. Mwang'onda, T. Kanthonga and C. Hwata, "Enhancing Medicine Supply Chain Efficiency in Rural African Healthcare through IoT-Enabled Smart Mobile Medicine Storage," *2023 First International Conference on the Advancements of Artificial Intelligence in African Context (AAIAC)*, Arusha, Tanzania, United Republic of, 2023, pp. 1-5.

Pajić, V., Andrejić, M. and Chatterjee, P. (2024) 'Enhancing Cold Chain Logistics: A Framework for Advanced Temperature Monitoring in Transportation and Storage', *Mechatronics and Intelligent Transportation Systems*, 3(1).

Pambudi, N.A. *et al.* (2022) 'Vaccine cold chain management and cold storage technology to address the challenges of vaccination programs', *Energy Reports*. Elsevier Ltd, pp. 955–972.

Panigrahi, B. S., Vanitha, A., Palav, M. R., Tilak Babu, S. B. G., Nair, A. M., & Bogiri, N. (2024). IoT applications in cold chain management for pharmaceuticals: Ensuring product integrity and safety. 2024 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCST), Jamshedpur, India, pp 66- 70.

Ranuh, IGNG. (2001). *Pedoman Imunisasi di Indonesia*, Badan Penerbit Ikatan Dokter Anak Indonesia (4th edition). Jakarta: IDAI.

Ranuh dkk. (2017). *Pedoman Imunisasi di Indonesia*. Badan Penerbit Ikatan Dokter Anak Indonesia (6th edition). Jakarta: IDAI.

Shafiq Bin Anuar, M. and Yew Heng, T. (2022). *Disertasi: Design and Development Of Internet Of Things (Iot) Based System For Monitoring Energy Consumption*, School of Engineering, Universiti Sains Malaysia

Tassou S A, De-Lille G and Ge Y T 2009 Food transport refrigeration—Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport *Appl. Therm. Eng.* Vol 29 pp 1467–77.

Tassou S A *et al* 2011 Energy consumption and conservation in food retailing *Appl. Therm. Eng.* Vol 31 pp 147–56.

Wardati, N.K. and Er, M. (2019) 'The impact of social media usage on the sales process in small and medium enterprises (SMEs): A systematic literature review', in *Procedia Computer Science*. Elsevier B.V., pp. 976–983.

Wu X, Hu S and Mo S 2013 Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems *J. Clean. Prod.* Elsevier Ltd. 54 115–24

Zhao H *et al* 2018 An overview of current status of cold chain in China *Int. J. Refrig* Elsevier Ltd 88 483–95.