

Sistem Rantai Pasok Vaksin dalam Meningkatkan Cakupan Imunisasi yang *Inklusif*: Studi Pendahuluan

Syifa Maulvi ZA¹, Agus Darmawan²

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

[1syifamaulviza@mail.ugm.ac.id](mailto:syifamaulviza@mail.ugm.ac.id)

Abstrak— Manajemen rantai pasok vaksin yang efektif sangat penting untuk memastikan cakupan imunisasi yang tinggi dan merata, terutama di negara berpenghasilan rendah menengah dimana memiliki sumber daya yang terbatas dan infrastruktur yang tidak memadai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak dari desain rantai pasokan vaksin yang dioptimalkan untuk meningkatkan cakupan imunisasi *inklusif* di negara-negara berpenghasilan rendah menengah dan menggunakan kota Bandung sebagai studi kasus. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi pendahuluan melalui tinjauan literatur yang mengikuti pedoman PRISMA dan analisis bibliometrik. Tinjauan literatur dilakukan dengan mencari artikel antara tahun 2014-2024 di *database scopus* dan Pubmed. Setelah menyaring 234 artikel, 18 artikel dipilih yang sesuai dengan tema rantai pasokan vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah. Penelitian ini mengeksplorasi bagaimana desain ulang jaringan pasokan vaksin dapat meningkatkan aksesibilitas dan efisiensi operasional, sehingga dapat meningkatkan cakupan imunisasi. Temuan ini menunjukkan bahwa mengintegrasikan desain rantai pasokan yang dioptimalkan dapat secara signifikan meningkatkan jangkauan imunisasi, terutama di daerah terpencil. Secara karakteristik, bentuk jaringan rantai pasokan vaksin di Kota Bandung menyerupai jaringan yang ada di beberapa negara, sehingga mendesain ulang jaringan diharapkan dapat meningkatkan cakupan imunisasi di Kota Bandung.

Kata Kunci— Rantai Pasok Vaksin, Imunisasi, Analisis Bibliometrik, Optimasi

I. PENDAHULUAN

Kesehatan sebagai salah satu unsur kesejahteraan umum perlu diwujudkan sesuai dengan cita-cita Bangsa Indonesia sebagaimana dimaksud dalam Pancasila dan Undang-Undang Dasar (UUD) 1945 melalui pembangunan nasional yang berkesinambungan. Pembangunan bidang kesehatan di Indonesia menghadapi banyak tantangan salah satunya adalah masalah penyakit menular dan penyakit degeneratif yang mana pencegahan penyebaran penyakit menular ini yang sudah diterapkan melalui imunisasi. Namun, muncul masalah lain yaitu sulitnya mengalokasikan sumber daya yang terbatas untuk mencapai cakupan imunisasi yang optimal sehingga dapat memastikan semua orang mendapatkan imunisasi dengan baik.

Berdasarkan penelitian terdahulu cakupan imunisasi di Indonesia memiliki dampak signifikan dalam menurunkan angka kejadian penyakit, ditemukan bahwa imunisasi campak berhasil mengurangi angka kematian akibat campak hingga 75% selama periode 2000-2013 di Indonesia [1]. Maka dari itu penting bagi Indonesia untuk memastikan bahwa program imunisasi ini dapat dinikmati oleh seluruh masyarakat sehingga dapat meningkatkan kesejahteraan kesehatan. Manajemen rantai pasok vaksin yang efektif merupakan aspek penting untuk memastikan cakupan imunisasi yang tinggi dan adil, khususnya di negara-negara berpenghasilan rendah menengah [2], [3]. Selain itu juga, jika kekurangan stok vaksin tidak ditangani dengan baik dan rantai pasokan tidak dijaga dengan efisien, hal ini bisa berdampak pada anak-anak yang sulit mendapatkan layanan kesehatan karena vaksin tidak tersedia [4].

Pengelolaan vaksin yang efektif, seperti penyimpanan, transportasi, dan distribusi yang tepat, seringkali kurang memadai di tingkat distrik dan komunitas [2]. Adanya pandemi COVID-19 lalu menunjukkan pentingnya memperkuat sistem rantai pasokan vaksin tersebut, juga pentingnya dalam hal pengelolaan kapasitas sumber daya manusia. Desain rantai pasokan vaksin yang efektif memberikan peran yang cukup penting dalam meningkatkan cakupan imunisasi di negara berpenghasilan rendah menengah dengan memastikan aksesibilitas, efisiensi sumber daya, dan pengurangan biaya operasional [5]. Penempatan pusat vaksinasi sangat penting dalam menentukan akses masyarakat untuk melakukan imunisasi ini terutama di daerah terpencil sehingga diperlukan desain jaringan rantai pasok yang dapat menjangkau seluruh masyarakat untuk melakukan vaksinasi.

Di Gambia, melakukan desain ulang jaringan vaksin *supply chain* dapat meningkatkan cakupan dari 91% menjadi 97% melalui optimasi alokasi sumber daya dengan anggaran yang sama [5]. Selain itu juga pada penelitian lain menunjukkan bahwa dengan membuka lokasi baru dan mengoptimalkan alokasi sumber daya di negara berpenghasilan rendah dan menengah, cakupan imunisasi dapat meningkat secara signifikan [6]. Secara Umum Indonesia memiliki karakteristik yang sama dengan Gambia dan beberapa negara berpenghasilan rendah menengah lainnya. Hal ini ditunjukkan dengan adanya permasalahan dibidang kesehatan seperti masalah gizi ganda dan kurangnya tenaga kerja medis [7], [8]. Maka, rumusan masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah bagaimana desain jaringan rantai pasok vaksin dapat meningkatkan cakupan imunisasi yang *inklusif* di negara berpenghasilan rendah menengah dengan melakukan studi kasus di kota Bandung. Saat ini dinas kesehatan kota Bandung sedang menganalisis upaya peningkatan cakupan imunisasi khususnya pada cakupan imunisasi dasar lengkap, dimana kota Bandung termasuk pada wilayah dengan cakupan imunisasi dasar lengkap terendah di Provinsi Jawa Barat. Sehingga dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat membantu pemerintah kota Bandung untuk membuat strategi dan keputusan yang dapat meningkatkan target cakupan imunisasi berdasarkan data aktual yang ada dilapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan bagaimana desain jaringan rantai pasokan vaksin meningkatkan cakupan imunisasi yang *inklusif* di negara berpendapatan rendah menengah. Sehingga dapat dijadikan referensi bagaimana desain jaringan rantai pasok vaksin yang baik untuk memastikan ketersediaan, distribusi, dan pemeliharaan kualitas vaksin hingga ke titik layanan

dan membantu para pembuat kebijakan dalam membuat keputusan yang tepat untuk dapat meningkatkan target cakupan Imunisasi di Indonesia, khususnya di Kota Bandung.

II. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sebuah studi pendahuluan yang diperkuat dengan tinjauan literatur (*literatur review*) dengan menggunakan pedoman PRISMA dan analisis bibliometrik. Kerangka kerja PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses*) merupakan metodologi yang dikenal untuk melakukan tinjauan literatur sistematis (SLR) di berbagai bidang penelitian [9]. Kerangka ini digunakan juga untuk meninjau secara sistematis literatur dari *database* seperti *Web of Science*, Scopus, dan Sage, dengan fokus pada aspek-aspek seperti masalah penelitian, kesenjangan, tujuan, dan metodologi yang digunakan dalam penelitian.

A. Strategi Pencarian Publikasi

Pencarian literatur dilakukan dengan menelusuri *database* Scopus dan Pubmed melalui aplikasi *Publish or Perish* untuk mendapatkan artikel yang relevan tentang vaksin *supply chain* di negara berpenghasilan rendah menengah. Beberapa penelitian mendefinisikan vaksin *supply chain* sebagai suatu sistem yang terstruktur untuk mendistribusikan vaksin dari produsen ke penerima, dengan tujuan untuk memaksimalkan akses dan efisiensi dalam penyampaian vaksin kepada masyarakat [6], [10]. Beberapa kombinasi kata kunci digunakan dalam pencarian artikel seperti rantai pasokan vaksin, cakupan imunisasi, negara berpenghasilan rendah menengah dan beberapa tambahan seperti desain jaringan vaksin dan negara berkembang yang dicari dengan kata kunci berbahasa inggris.

B. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria *inklusi* yang diterapkan berguna untuk memastikan relevansi dan kualitas penelitian yang akan ditinjau. Penelitian ini menggunakan beberapa kriteria *inklusi* seperti pencarian topik yang harus relevan dengan pertanyaan penelitian yaitu yang mencakup tema desain jaringan rantai pasok vaksin, cakupan vaksin, dan pengelolaan rantai pasok vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah. Artikel harus dipublikasikan dalam rentang waktu 10 tahun terakhir, yaitu antara tahun 2014 hingga 2024, dan ditulis dalam bahasa Inggris. Selain itu, aksesibilitas artikel juga menjadi pertimbangan, di mana hanya artikel yang tersedia secara lengkap yang akan disertakan. Adapun kriteria *eksklusi* adalah keadaan sebaliknya dari kriteria *inklusi* juga artikel yang bersifat laporan, tinjauan literatur dan bertipe non artikel juga akan dikecualikan.

C. Data Analisis

Setelah melakukan pencarian artikel, didapatkan 221 referensi dari *database* Scopus dan 13 referensi dari *database* Pubmed yang dilakukan dengan beberapa kali iterasi pencarian. Berdasarkan pada tema penelitian maka artikel yang dipilih harus setidaknya memiliki beberapa kategori seperti artikel terkait optimasi pada vaksin *supply chain*, artikel yang memuat mengenai cakupan imunisasi dan artikel penerapan vaksin *supply chain* di negara berpenghasilan rendah menengah. Kategori ini tentu akan memudahkan dalam melakukan analisis yang mendalam mengenai sistem rantai pasok vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah dalam meningkatkan cakupan imunisasi. Setelah dilakukan pencarian dilakukan juga analisis bibliometrik untuk mempertajam relevansi dan kebaharuan dari penelitian ini, dimana penggambaran peta bibliometrik dibuat dengan aplikasi VOSViewer.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahapan ini akan membahas mengenai hasil peta bibliometrik dan diagram prisma berdasarkan hasil pencarian untuk literatur review juga penggambaran kondisi vaksin *supply chain* saat ini di Indonesia khususnya di kota Bandung sebagai salah satu studi kasus yang digunakan pada penelitian ini.

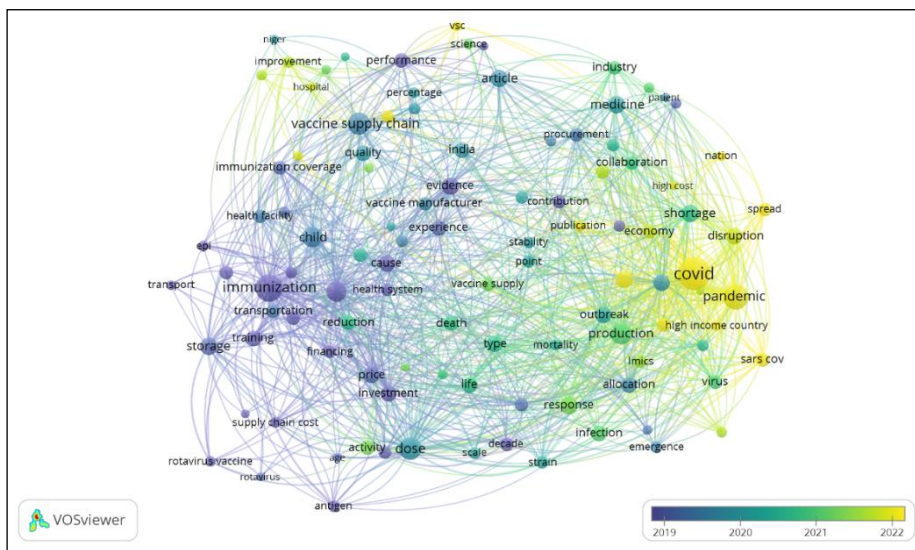
A. Bibliometrik Analisis

Analisis bibliometrik dibuat dengan menggunakan aplikasi VOSViewer dan hasilnya menggambarkan bagaimana tren penelitian mengenai "*vaccine supply chain*" dan "*immunization coverage*" dalam literatur ilmiah yang sudah dicari sebelumnya dengan menggunakan *publish or perish* dalam *database* scopus. Pada peta bibliometrik yang ditunjukkan pada Gambar 1 dibawah ini istilah "*vaccine supply chain*" berkaitan erat dengan beberapa aspek logistik seperti pengadaan, transportasi, dan penyimpanan vaksin. Adapun masalah yang cukup banyak muncul adalah kekurangan pasokan vaksin dan biaya yang tinggi. Penelitian vaksin *supply chain* ini banyak bermunculan pada tahun 2021 – 2022, adapun tema penelitian vaksin yang sangat banyak dilakukan pada 3 tahun terakhir adalah dengan tema yang berkaitan dengan vaksin Covid-19. Hal ini dapat dikaitkan dengan adanya pandemi pada 3 tahun kebelakang.

Adapun kata "*immunization coverage*" banyak yang berkaitan dengan dengan kata "*mortality*" dan "*infection*" hal ini dapat menegaskan bahwa cakupan imunisasi yang efektif dapat mengurangi penyakit menular dan kematian khususnya pada anak-anak. Oleh karena itu, penelitian tentang strategi untuk meningkatkan cakupan imunisasi, terutama di daerah terpencil dan negara berpenghasilan rendah menengah, menjadi sangat penting. Selain itu jika dilihat pada Gambar 1 penelitian mengenai cakupan imunisasi ini masih terbilang sedikit dibandingkan dengan penelitian mengenai "Covid" maupun "Imunisasi" secara umum. Akan tetapi penelitian vaksin *supply chain* mulai kembali disoroti pada 2 tahun terakhir terutama yang berkaitan dengan immunisasi.

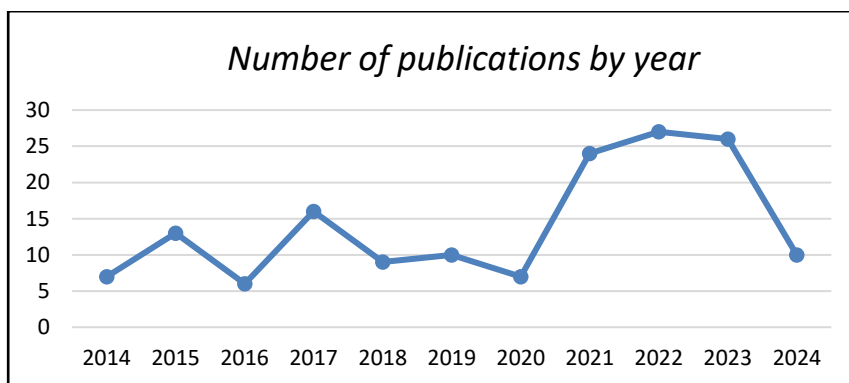
Sehingga penelitian yang dapat menintegrasikan antara optimisasi rantai pasok vaksin dan strategi peningkatan cakupan imunisasi memungkinkan untuk dapat berkontribusi dalam merespon kesehatan terutama untuk mengurangi angka kematian anak dan penularan penyakit. Imunisasi yang efektif membantu melindungi populasi dari wabah penyakit, terutama di negara-negara

berpenghasilan rendah menengah (LMIC) yang sering kali mengalami stagnasi dalam cakupan imunisasi [5]. Penelitian mendatang dapat menggali lebih dalam tentang bagaimana rantai pasok vaksin dapat berkontribusi pada peningkatan cakupan imunisasi agar dapat mengurangi beban penyakit global secara signifikan.



Gambar 1. Peta Bibliometrik

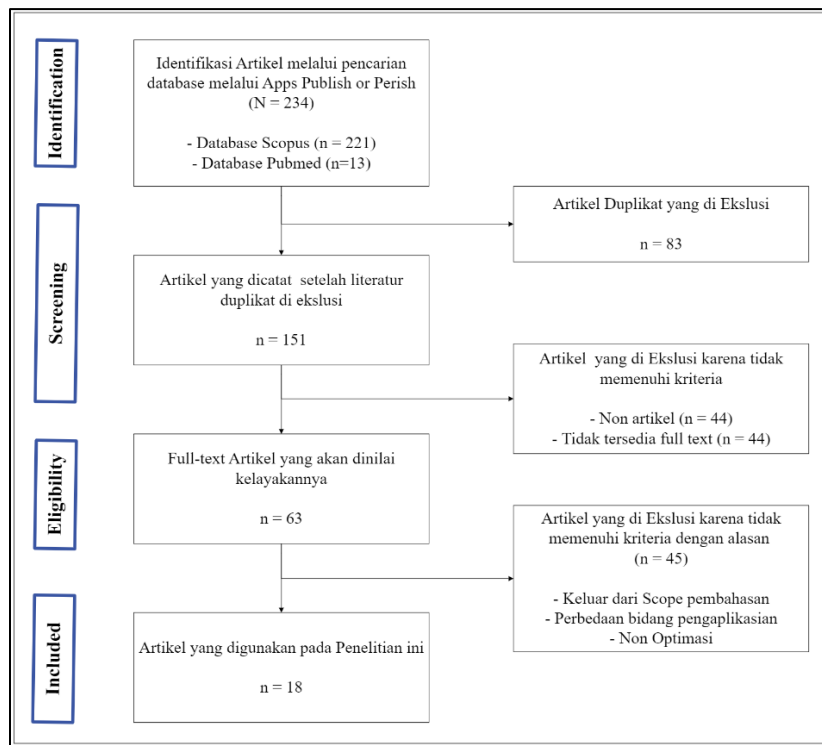
Penelusuran artikel yang telah dilakukan sebelumnya mendapatkan sekitar 234 artikel yang kemudian digunakan untuk menggambarkan peta bibliometrik diatas. Artikel-artikel yang dimasukkan merupakan artikel yang sesuai dengan tema yang sesuai dengan penelitian dengan jangka waktu 10 tahun yaitu dimulai dari tahun 2014 hingga Juli 2024. Gambar 2 menunjukkan sebaran artikel berdasarkan tahun penerbitan. Tahun 2017 tema ini cukup banyak diminati dan menurun di tahun setelahnya sedangkan penerbitan artikel yang berkaitan "vaccine supply chain" dan "immunization coverage" banyak bermunculan pada tahun 2021 -2023, hal ini diindikasikan karena terjadinya wabah pandemi yang terjadi sehingga banyak penelitian membahas mengenai Vaccine Supply Chain. Pada tahun 2024 saat ini pembahasan "vaccine supply chain" dan "immunization coverage" mulai diminati kembali hal ini dimungkinkan karena adanya istilah *catch up immunization* dalam rangka mengejar ketertinggalan imunisasi yang terjadi pada saat terjadinya pandemi.



Gambar 2. Jumlah Publikasi berdasarkan tahun

B. Diagram Prisma

Diagram prisma yang disajikan pada Gambar 2 mengilustrasikan proses pemilihan artikel secara sistematis untuk sebuah penelitian. Tahap identifikasi didapatkan sejumlah 234 artikel yang diidentifikasi melalui pencarian di *database* menggunakan aplikasi *Publish or Perish*, dengan 221 artikel berasal dari *database* Scopus dan 13 dari PubMed. Pada proses screening dimana proses ini akan mengekskusi artikel duplikasi ($n=83$) sehingga jumlah artikel berkurang menjadi 151. Proses eksklusi juga berhasil mengeluarkan sebanyak ($n = 88$) publikasi non artikel juga publikasi yang tidak dapat diakses oleh umum sehingga menyisakan 63 artikel yang masuk kedalam uji kelayakan. Pada uji kelayakan ada 45 artikel yang diekskusi dengan alasan keluar dari *Scope* pembahasan yaitu mengenai vaksin *supply chain* dan cakupan imunisasi, perbedaan bidang pengaplikasian dan artikel non optimasi *supply chain*.



Gambar 2. Diagram Alur PRISMA

Artikel yang digunakan di penelitian ini mencakup pada beberapa pembahasan yang berkaitan dengan tema yang sudah ditentukan, yaitu rantai pasok vaksin, cakupan imunisasi dan juga pembahasan yang mencakup pada negara berpenghasilan rendah menengah. Topik yang diangkat pun merupakan artikel rantai pasok yang menggunakan optimasi sebagai alat pemberian solusi. Sehingga artikel-artikel yang terpilih akan di jelaskan secara detail pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Literatur Tinjauan

No	Article	Studi Case	Objective Function		Constrain	Demand Type	Product Type	Method
			Single	Multi				
1	[11]	Vanuatu	Min Cost		Time Travel	FE	MP	MILP layered network
2	[12]	Iran		Min Cost, Max resiliency score	Facility, vehicle, and travel distance	S	MP	NSGA-II, ϵ -constraint and MOPSO
3	[13]	Nigeria	Max Coverage		Vehicle constraint, Capacity Constrain	S	MP	Chance Constraint Programming (CCP)
4	[14]	Jordan		Min Undelivered Dose	Vehicles	FE	SP	Multi-objective MILP
5	[15]	Iran		Min Cost, Max social impacts	Facility, Transportation, and Inventory	FE	SP	Multi-period MILP
6	[16]	sub-Saharan Africa	Min Cost		Facility, vehicle, and travel distance	FE	MP	MIP algorithm
7	[17]	Iran	Max Delivery		Capacity	FE	SP	Inventory-location MILP
8	[18]	Nigeria	Min Cost		Capacity	S	MP	Stochastic optimization
9	[19]	Gambia	Max Coverage		Cost, Capacity	Eg	MP	MIP algorithm
10	[20]	LMIC	Max Delivery Cost		Cost, Capacity	S	SP	Bayesian meta-regression

No	Article	Studi Case	Objective Function		Constrain	Demand Type	Product Type	Method
			Single	Multi				
11	[21]	Patna, Bhopal, and Hyderabad	Max Delivery		Capacity	FE	MP	MILP
12	[22]	Nigeria	Max Cost efficiency		Capacity	FE	SP	Cost analysis of Passive Cold Devices (PCDs)
13	[23]	Australia	Min Unvaccinated		Facility, vehicle, and travel	FE	MP	MIP algorithm
14	[24]	Iran		Min Cost and Env. Aspect	Facility	FE	MP	MOMIP and MOGWO algorithm
15	[25]	India	Max Outreach		Facility and Cost	C	SP	The Binary MCLP and the GMCLP
16	[26]	sub-Saharan Africa	Min Cost		Facility, vehicle, and travel	FE	MP	MIP and a hybrid heuristic-MIP
17	[27]	Nigeria, Thailand, and Vietnam	Max availability		Facility	FE	SP	Linear Programming (LP)
18	[28]	Nigeria	Max Outreach		Facility, Transportation, and Capacity	FE	SP	MILP

Ket: FE = Fixed Exogenous; C = Causal (Distance); S = Stochastic; Eg = Endogenous; MP = Multiproduct; SP = Single Product; MIP = Mixed Integer Programming; MILP = Mixed Integer Linear Programming; MOMIP = Multi-Objective Mixed Integer Programming.

C. Pembahasan

Tantangan yang dihadapi oleh negara berpenghasilan rendah menengah menghadapi banyak permasalahan khususnya dalam hal pengiriman, penyimpanan dan distribusi vaksin yang efektif. Tentu saja hal ini dapat menghambat akses pengiriman vaksin yang tepat waktu dan merata [23]. Selain itu juga kesulitan dalam hal peralatan dan infrastruktur rantai pasokan dingin (*cold chain*) yang tidak memadai, menyebabkan adanya potensi vaksin kadaluarsa [19], [28]. Selain itu pada pandemi COVID-19 menyebabkan kerentanan dalam rantai pasokan vaksin, dengan adanya gangguan pada transportasi udara komersial dan karantina wilayah yang secara signifikan berdampak pada pengiriman vaksin dan program imunisasi rutin [15]. Keterbatasan sumber daya juga menjadi hal yang perlu diperhatikan, karena banyak negara berpenghasilan rendah menengah kekurangan sumber daya fisik dan manusia yang diperlukan untuk memperluas rantai pasokan vaksin ke setiap penerima vaksin [15]. Tantangan-tantangan ini menekankan perlunya strategi yang komprehensif untuk mengatasi hambatan logistik dan sosio-ekonomi dalam distribusi vaksin di wilayah-wilayah ini [22].

a) Penggunaan Model Optimasi dalam Rantai Pasokan Vaksin

Desain rantai pasokan vaksin dengan menggunakan metode optimasi sudah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu untuk membantu dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas cakupan vaksin pada penerima pasien. Beberapa jenis fungsi tujuan yang biasa digunakan adalah minimasi biaya dalam hal pengiriman vaksin ke daerah jangkauan seperti pada penelitian [11], [16], [18], [26] dengan batasan jenis kendaraan, fasilitas maupun jarak. Penggunaan metode *Mixed Integer Linear Programming* maupun *Mixed Integer Programming* banyak digunakan untuk membangun model seperti untuk memaksimalkan *outreach* atau jangkauan vaksin pada [28] dengan menggunakan transportasi *drone*, dan meminimasi biaya dan dampak pada lingkungan juga memaksimalkan dampak sosial pada penelitian [15] dengan batasan fasilitas maupun *inventory*.

Pembangunan model untuk memaksimalkan cakupan imunisasi tentu berkaitan dengan model permintaan dalam studi kasus atau konteks dalam penelitian. Jenis permintaan *Fixed Exogenous* (FE) mengacu pada skenario di mana faktor eksternal yang mempengaruhi sistem dianggap konstan dan tidak berubah yang banyak diadopsi pada artikel diatas. Jenis permintaan *Causal* merupakan model permintaan yang mempertimbangkan dampak jarak geografis atau logistik terhadap efisiensi jaringan seperti yang diterapkan pada [25]. Jenis permintaan Stokastik (S) memperhitungkan ketidakpastian pada skenario dunia nyata, seperti permintaan yang berfluktuasi, gangguan rantai pasokan yang bervariasi, atau kondisi lingkungan yang tidak dapat diprediksi. Pendekatan ini memungkinkan desain yang dapat beradaptasi dengan perubahan yang tidak terduga. Jenis permintaan Endogen berfokus pada faktor-faktor yang ditentukan di dalam sistem itu sendiri, seperti permintaan yang dipengaruhi oleh kinerja jaringan atau respons populasi terhadap kampanye vaksinasi seperti yang diterapkan pada penelitian [19]. Adapun untuk jenis produk yang dilibatkan dalam penelitian terbagi menjadi 2 macam, yaitu untuk *multi-product* yang melibatkan banyak jenis vaksin dan *single product* yang hanya menggunakan satu vaksin dalam mendesain jaringan *supply chain* baru.

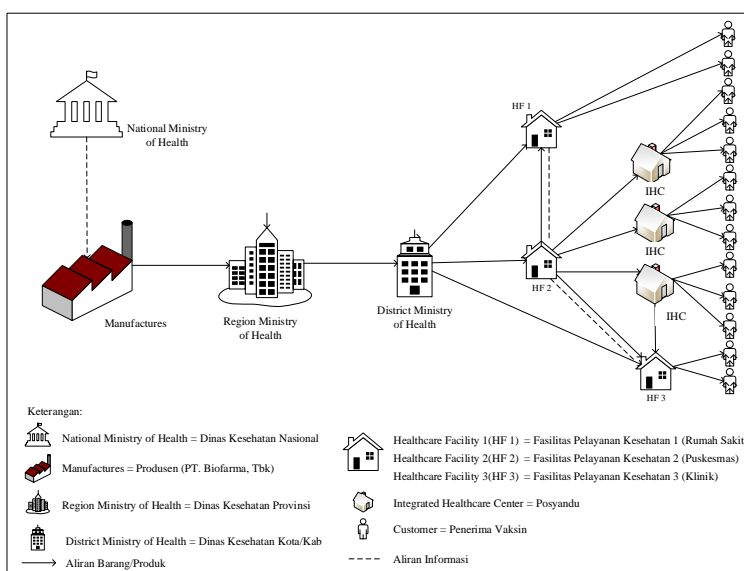
b) Implikasi Penerapan Rantai Pasokan Vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah

Implementasi rantai pasokan vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah menunjukkan hasil yang bervariasi dalam meningkatkan cakupan imunisasi. Di banyak negara berpenghasilan rendah dan menengah, rantai pasok vaksin sering kali tidak memadai, yang menyebabkan rendahnya tingkat ketersediaan dan cakupan vaksin [25]. Sebagai contoh, di Nigeria, desain ulang rantai pasokan vaksin dibagi menjadi sistem dua wilayah tanpa pusat (NC2) menghasilkan pengurangan biaya sebesar 23% dan mencapai tingkat pengisian 100%, dibandingkan dengan sistem enam wilayah yang ada saat ini dengan pusat (EC6) [18]. Hal ini menunjukkan bahwa melakukan desain ulang terhadap vaksin *supply chain* dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi dan cakupan imunisasi. Demikian pula, di Nigeria, desain rantai pasokan vaksin yang optimal telah direkomendasikan untuk memaksimalkan persentase anak-anak yang diimunisasi dan meningkatkan ketersediaan vaksin di klinik [13]. Pada studi kasus di Gambia, membuka lokasi penjangkauan baru dan mengoptimalkan alokasi sumber daya dan penjadwalan dapat meningkatkan cakupan imunisasi dari 91,0% menjadi 97,1% dengan anggaran yang sama [19]. Model-model ini membantu dalam memahami implikasi logistik dan biaya, yang sangat penting untuk meningkatkan cakupan imunisasi.

Selain itu, adanya pandemi COVID-19 menjadi menyoroti pentingnya rantai pasokan yang kuat dan responsif, juga perlunya infrastruktur dan proses yang dapat beradaptasi dengan cepat terhadap gangguan dan lonjakan permintaan yang tak terduga [12]. Secara keseluruhan, meskipun peningkatan cakupan imunisasi bervariasi di setiap negara dan dengan intervensi yang berbeda, mendesain ulang dan mengoptimalkan rantai pasokan vaksin, berpotensi untuk meningkatkan cakupan vaksin secara signifikan. Namun, adanya hambatan seperti transportasi, rantai dingin yang tidak memadai, dan hambatan geografis memerlukan upaya berkelanjutan untuk meningkatkan infrastruktur rantai pasokan dan program penjangkauan yang lebih baik lagi [25].

D. Kondisi Saat Ini

Objek penelitian ini akan berfokus pada distribusi vaksin di wilayah Kota Bandung yang meliputi produsen vaksin, Dinas Kesehatan Pusat, Dinas Kesehatan Provinsi Jawa Barat, Dinas Kesehatan Kota Bandung, Rumah Sakit, Puskesmas dan Klinik yang berada dibawah jaringan Dinas Kesehatan Kota Bandung. Secara umum jaringan distribusi vaksin di kota Bandung mirip dengan jaringan distribusi yang ada di Gambia dimana Pusat kesehatan mengambil komoditas dari toko regional setiap bulan, menggunakan kendaraan yang sama untuk operasi *outreach* [5]. Jaringan pendistribusian vaksin di kota Bandung dibagi tanggungjawabnya antara pemerintah pusat, provinsi, dan daerah/kota. Pemerintah pusat bertanggungjawab untuk mendistribusikan vaksin ke tingkat provinsi. Sementara itu, pemerintah provinsi bertanggungjawab dalam pendistribusian vaksin ke kabupaten atau kota. Di tingkat daerah/kota, tanggung jawab pendistribusian vaksin berada di tangan pemerintah setempat, sehingga harus memastikan vaksin sampai ke puskesmas, klinik, rumah sakit, atau unit pelayanan vaksinasi lainnya. Hal ini tentu saja mirip dengan pendistribusian vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah lainnya, yang mana biasanya memiliki struktur empat tingkat, di mana vaksin masuk ke negara melalui pusat penyimpanan pusat, kemudian didistribusikan ke pusat distribusi menengah, dan akhirnya ke klinik kesehatan di mana vaksinasi dilakukan [29]. Gambaran umum untuk pendistribusian vaksin di kota Bandung diilustrasikan pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Jaringan Distribusi Vaksin di Kota Bandung

Pada jaringan distribusi diatas, pendistribusian di mulai dari pengiriman produk oleh produsen yaitu PT. Biofarma sesuai arahan dari Dinas Kesehatan Pusat yang kemudian mendistribusikan vaksin tersebut kepada Dinas Kesehatan Provinsi Jawa Barat. Setelah itu vaksin akan didistribusikan kepada setiap Dinas Kesehatan Kota/Daerah sesuai dengan permintaan yang sudah diajukan sebelumnya. Selanjutnya, masing-masing fasilitas kesehatan seperti puskesmas, rumah sakit ataupun klinik akan melakukan pengambilan secara mandiri setelah mengajukan perhitungan kebutuhan vaksin menyesuaikan dengan sisa stok vaksin di masing-masing unit. Setiap pengiriman harus disesuaikan dengan standar yang sudah ditetapkan oleh dinas kesehatan yaitu dengan jaringan *cold chain* agar vaksin datang dengan kondisi yang baik. Kondisi pendistribusian dan pelaksanaan vaksinasi di Kota Bandung dengan kota-kota di Negara Berpenghasilan Rendah Menengah menunjukan bahwa kemungkinan untuk meningkatkan cakupan imunisasi dapat dilakukan dengan merancang dan mengevaluasi rantai pasokan vaksin saat ini. Adapun beberapa karakteristik yang

penting untuk dipahami adalah terkait permintaan vaksin Imunisasi di Kota Bandung yang cenderung stabil sesuai dengan hasil peramalan yang dibuat oleh pemegang kebijakan. Sehingga tipe permintaan yang sesuai dengan kota Bandung adalah *Fixed Exogenous* karena dianggap konstan. Akan tetapi hal ini bisa ditinjau kembali untuk mengevaluasi tiap titik pelaksanaan vaksin yang sudah memenuhi permintaan yang ada atau masih memerlukan pembukaan titik pelaksanaan vaksin yang disesuaikan dengan jarak jangkauan untuk dapat memaksimalkan cakupan imunisasi di Kota Bandung.

E. Penelitian Selanjutnya

Penelitian mengenai rantai pasokan vaksin sudah cukup banyak diminati terutama pada 5 tahun terakhir, akan tetapi dari penelitian-penelitian tersebut menggarisbawahi perlunya pendekatan yang lebih terintegrasi yang tidak hanya mengoptimalkan parameter logistik tetapi juga memastikan distribusi yang merata di semua segmen populasi terutama untuk memastikan cakupan vaksin yang merata. Hal ini memungkinkan untuk dapat mengeksplorasi model yang lebih adaptif dengan data yang *real time* untuk merespon perubahan dinamis dalam segi permintaan vaksin dan kondisi rantai pasokan vaksin. Selain itu penerapan teknologi AI dan *machine learning* dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam berbagai aspek seperti memprediksi tren yang dinamis dan mengoptimalkan strategi distribusi, memastikan bahwa semua populasi memiliki akses tanpa adanya hambatan geografis. Penerapan model-model ini juga diharapkan dapat lebih meluas ke berbagai industri dan mengatasi tantangan baru seperti masalah keberlanjutan sehingga secara signifikan dapat meningkatkan ketahanan dan efisiensi sistem kesehatan di negara-negara berkembang atau negara dengan penghasilan rendah menengah.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menyoroti dampak dari optimalisasi rantai pasokan vaksin di negara berpenghasilan rendah menengah, hasil menunjukkan bahwa desain jaringan strategis dapat secara signifikan meningkatkan cakupan imunisasi. Berdasarkan hasil analisis literatur tantangan yang dihadapi oleh dalam vaksin *supply chain* ada pada proses pengiriman, penyimpanan, dan distribusi vaksin yang efektif yang sering kali terhambat oleh infrastruktur rantai dingin yang tidak memadai dan gangguan logistik. Optimasi rantai pasokan vaksin melalui model yang berbeda—termasuk *Mixed Integer Linear Programming* dan berbagai pendekatan permintaan—telah terbukti meningkatkan efisiensi dan cakupan imunisasi. Studi kasus dari Nigeria dan Gambia menunjukkan bahwa desain ulang dan optimasi jaringan distribusi vaksin bisa signifikan menurunkan biaya dan meningkatkan cakupan vaksin, hal ini menunjukkan pentingnya infrastruktur yang responsif dan adaptif untuk meningkatkan akses imunisasi. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa meningkatkan efisiensi rantai pasokan tidak hanya memastikan ketersediaan vaksin tetapi juga memperluas jangkauan di daerah-daerah yang kurang terlayani. Penelitian di masa depan harus berfokus pada model adaptif yang merespons secara dinamis terhadap perubahan kondisi dan mengeksplorasi potensi AI dan pembelajaran mesin untuk memprediksi tren dan mengoptimalkan strategi distribusi. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan gambaran pentingnya sistem rantai pasokan yang kuat dan responsif untuk meningkatkan kualitas kesehatan di negara berpenghasilan rendah menengah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Wijaya, "Pengaruh Cakupan Imunisasi Campak Terhadap Incidence Rate Penyakit Campak Di Indonesia Tahun 2016," *Journal Of Health Sciences*, Vol. Vol. 11 No. 2, Pp. 159–166, 2018.
- [2] E. Osei, M. Ibrahim, And G. Kofi Amenuvegbe, "Effective Vaccine Management: The Case Of A Rural District In Ghana," *Adv Prev Med*, Vol. 2019, Pp. 1–8, Oct. 2019, Doi: 10.1155/2019/5287287.
- [3] P. Yadav *Et Al.*, "Vaccine Supply chains: Priority Areas Of Action Emerging From The Covid-19 Pandemic," *Vaccine Insights*, Vol. 02, No. 02, Pp. 59–66, Mar. 2023, Doi: 10.18609/Vac.2023.011.
- [4] C. J. Iwu *Et Al.*, "A Scoping Review Of Interventions For Vaccine Stock Management In Primary Health-Care Facilities," *Hum Vaccin Immunother*, Vol. 15, No. 11, Pp. 2666–2672, 2019, Doi: 10.1080/21645515.2019.1607130.
- [5] J. Goentzel, T. Russell, H. R. Carretti, And Y. Hashimoto, "Vaccine Network Design To Maximize Immunization Coverage," *Journal Of Humanitarian Logistics And Supply chain Management*, Vol. 13, No. 2, Pp. 140–156, Apr. 2023, Doi: 10.1108/Jhlscm-10-2021-0101.
- [6] J. Lim, E. Claypool, B. A. Norman, And J. Rajgopal, "Coverage Models To Determine Outreach Vaccination Center Locations In Low And Middle Income Countries," *Oper Res Health Care*, Vol. 9, Pp. 40–48, Jun. 2016, Doi: 10.1016/J.Orhc.2016.02.003.
- [7] W. Hanandita And G. Tampubolon, "The Double Burden Of Malnutrition In Indonesia: Social Determinants And Geographical Variations," *Ssm Popul Health*, Vol. 1, Pp. 16–25, 2015, Doi: 10.1016/J.Ssmph.2015.10.002.
- [8] F. C. Noya, S. E. Carr, And S. C. Thompson, "Attracting, Recruiting, And Retaining Medical Workforce: A Case Study In A Remote Province Of Indonesia," *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 20, No. 2, Jan. 2023, Doi: 10.3390/Ijerp20021435.
- [9] D. Moher *Et Al.*, "Preferred Reporting Items For Systematic Reviews And Meta-Analyses: The Prisma Statement," Jul. 01, 2009, *Public Library Of Science*. Doi: 10.1371/Journal.Pmed.1000097.
- [10] Y. Yang, H. Bidkhor, And J. Rajgopal, "Optimizing Vaccine Distribution Networks In Low And Middle-Income Countries," *Omega (United Kingdom)*, Vol. 99, Mar. 2021, Doi: 10.1016/J.Omega.2020.102197.
- [11] S. Enayati, J. F. Campbell, And H. Li, "Vaccine Distribution With Drones For Less Developed Countries: A Case Study In Vanuatu," *Vaccine X*, Vol. 14, Aug. 2023, Doi: 10.1016/J.Jvacx.2023.100312.
- [12] E. B. Tirkolaee, A. E. Torkayesh, M. Tavana, A. Goli, V. Simic, And W. Ding, "An Integrated Decision Support Framework For Resilient Vaccine Supply chain Network Design," *Eng Appl Artif Intell*, Vol. 126, Nov. 2023, Doi: 10.1016/J.Engappai.2023.106945.

- [13] Z. Azadi, S. D. Eksioğlu, And H. N. Geismar, "Optimization Of Pediatric Vaccines Distribution Network Configuration Under Uncertainty," *Comput Ind Eng*, Vol. 192, Jun. 2024, Doi: 10.1016/J.Cie.2024.110230.
- [14] N. Al Theeb, M. Abu-Aleqa, And A. Diabat, "Multi-Objective Optimization Of Two-Echelon Vehicle Routing Problem: Vaccines Distribution As A Case Study," *Comput Ind Eng*, Vol. 187, Jan. 2024, Doi: 10.1016/J.Cie.2023.109590.
- [15] H. Gilani And H. Sahebi, "A Data-Driven Robust Optimization Model By Cutting Hyperplanes On Vaccine Access Uncertainty In Covid-19 Vaccine Supply chain," *Omega (United Kingdom)*, Vol. 110, Jul. 2022, Doi: 10.1016/J.Omega.2022.102637.
- [16] Y. Yang, H. Bidkhorri, And J. Rajgopal, "Optimizing Vaccine Distribution Networks In Low And Middle-Income Countries," *Omega (United Kingdom)*, Vol. 99, Mar. 2021, Doi: 10.1016/J.Omega.2020.102197.
- [17] M. Rastegar, M. Tavana, A. Meraj, And H. Mina, "An Inventory-Location Optimization Model For Equitable Influenza Vaccine Distribution In Developing Countries During The Covid-19 Pandemic," *Vaccine*, Vol. 39, No. 3, Pp. 495–504, Jan. 2021, Doi: 10.1016/J.Vaccine.2020.12.022.
- [18] D. Hirsh Bar Gai, Z. Graybill, P. Voevodsky, And E. Shittu, "Evaluating Scenarios Of Locations And Capacities For Vaccine Storage In Nigeria," *Vaccine*, Vol. 36, No. 24, Pp. 3505–3512, Jun. 2018, Doi: 10.1016/J.Vaccine.2018.04.072.
- [19] J. Goentzel, T. Russell, H. R. Carretti, And Y. Hashimoto, "Vaccine Network Design To Maximize Immunization Coverage," *Journal Of Humanitarian Logistics And Supply chain Management*, Vol. 13, No. 2, Pp. 140–156, Apr. 2023, Doi: 10.1108/Jhlscm-10-2021-0101.
- [20] A. Portnoy *Et Al.*, "Producing Standardized Country-Level Immunization Delivery Unit Cost Estimates," *Pharmacoeconomics*, Vol. 38, No. 9, Pp. 995–1005, Sep. 2020, Doi: 10.1007/S40273-020-00930-6.
- [21] M. Tavana, K. Govindan, A. K. Nasr, M. S. Heidary, And H. Mina, "A Mathematical Programming Approach For Equitable Covid-19 Vaccine Distribution In Developing Countries," *Ann Oper Res*, 2021, Doi: 10.1007/S10479-021-04130-Z.
- [22] S. I. Chen, B. A. Norman, J. Rajgopal, And B. Y. Lee, "Passive Cold Devices For Vaccine Supply chains," *Ann Oper Res*, Vol. 230, No. 1, Pp. 87–104, Jul. 2015, Doi: 10.1007/S10479-013-1502-5.
- [23] M. Fadaki, A. Abareshi, S. M. Far, And P. T. W. Lee, "Multi-Period Vaccine Allocation Model In A Pandemic: A Case Study Of Covid-19 In Australia," *Transp Res E Logist Transp Rev*, Vol. 161, May 2022, Doi: 10.1016/J.Tre.2022.102689.
- [24] S. Abbasi, S. Zahmatkesh, A. Bokhari, And M. Hajiaghahi-Keshteli, "Designing A Vaccine Supply chain Network Considering Environmental Aspects," *J Clean Prod*, Vol. 417, Sep. 2023, Doi: 10.1016/J.Jclepro.2023.137935.
- [25] J. Lim, E. Claypool, B. A. Norman, And J. Rajgopal, "Coverage Models To Determine Outreach Vaccination Center Locations In Low And Middle Income Countries," *Oper Res Health Care*, Vol. 9, Pp. 40–48, Jun. 2016, Doi: 10.1016/J.Orhc.2016.02.003.
- [26] J. Lim, B. A. Norman, And J. Rajgopal, "Redesign Of Vaccine Distribution Networks," *International Transactions In Operational Research*, Vol. 29, No. 1, Pp. 200–225, Jan. 2022, Doi: 10.1111/Itor.12758.
- [27] S. I. Chen, B. A. Norman, J. Rajgopal, T. M. Assi, B. Y. Lee, And S. T. Brown, "A Planning Model For The Who-Epi Vaccine Distribution Network In Developing Countries," *Iie Transactions (Institute Of Industrial Engineers)*, Vol. 46, No. 8, Pp. 853–865, Aug. 2014, Doi: 10.1080/0740817x.2013.813094.
- [28] M. Kolter, S. D. Eksioğlu, S. N. Pinkley, And R. A. Proano, "Designing Drone Delivery Networks For Vaccine Supply chain: A Case Study Of Niger," Aug. 2022, [Online]. Available: [Http://Arxiv.Org/Abs/2208.04357](http://Arxiv.Org/Abs/2208.04357)
- [29] J. Lim, B. A. Norman, And J. Rajgopal, "Redesign Of Vaccine Distribution Networks," *International Transactions In Operational Research*, Vol. 29, No. 1, Pp. 200–225, Jan. 2022, Doi: 10.1111/Itor.12758.