Model Desain dan Optimasi Distribusi Vaksin Influenza dengan pendekatan *Multi-Objective* untuk Minimasi Biaya dan *Waste*

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Nama : Muhammad Faeda Rafi
No. Mahasiswa : 21522139

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 18 September 2025



Muhammad Faeda Rafi
21522139

SURAT BUKTI PENELITIAN

PT. UNISIA EDU MEDIKA
Rumah Sakit
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
Jl. Srandakan Km. 5,5 Wijirejo, Pandak, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta,
55761 Telp. (Hotline). 1500-204, Website: www.rsuii.co.id Email: contact@rsuii.co.id

Nomor : 259 /I/08/VIII/2025
Lampiran : -
Perihal : **Keterangan Selesai Penelitian**

Kepada Yth.
Ketua Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia
Di tempat

Assalamu'alaikum wr wb.

Dengan hormat,
Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala nikmat yang kita rasakan sehingga dapat beraktivitas dengan lancar.

Menanggapi surat Ketua Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia Nomor: 07/Kaprodi.TLS1/20/Prodi.TLS1/IV/2025 perihal Penelitian yang dilaksanakan di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia oleh:

Nama Mahasiswa	:	**Muhammad Faeda Rafi**
NIM	:	**21522139**
Program Studi	:	**Teknik Industri**
Judul Penelitian	:	**Model Desain dan Optimasi Distribusi Produk Vaksin Influenza dengan Pendekatan *Multi Objective* untuk Maksimasi Profit dan Minimasi *Waste* di RS UII**

Bersama surat ini kami informasikan, bahwa yang bersangkutan telah **SELESAI** melakukan penelitian di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia.

Demikian surat ini kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr wb.

Yogyakarta, 26 Agustus 2025
Direktur Utama

dr. Mulyo Hartana, Sp.PD

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Model Desain dan Optimasi Distribusi Vaksin Influenza dengan pendekatan *Multi-Objective* untuk Minimasi Biaya dan *Waste*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Faeda Rafi
No. Mahasiswa : 21522139

Yogyakarta, 18 September 2025

Dosen Pembimbing

(Dr. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

Model Desain dan Optimasi Distribusi Vaksin Influenza dengan pendekatan *Multi-Objective* untuk Minimasi Biaya dan *Waste*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Faeda Rafi

No. Mahasiswa : 21 522 139

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Tekonologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 18 - September – 2025

Tim Penguji

Dr. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc.	
Ketua	
Dr. Ir. Dwi Handayani, S.T., M.Sc., IPM	
Anggota I	
Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc.	
Anggota II	

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph. D., IPM.
NIK: 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini saya persembahkan kepada orang tua tercinta, atas segala doa, kasih sayang, serta dukungan tanpa henti. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, dan umur panjang bagi kalian.

MOTTO

"Katakanlah: Apakah sama orang-orang yang mengetahui dengan orang-orang yang tidak mengetahui? Sesungguhnya hanya orang berakallah yang dapat menerima pelajaran."
(QS. Az-Zumar: 9)
"Barangsiapa menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga."
(HR. Muslim)
"Impossible is a word to be found only in the dictionary of fools."
(Napoleon Bonaparte)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabaraakaatuh

Alhamdulillahirabbil'alamiin, Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, atas limpahan rahmat dan karunia-Nya yang tiada terhingga. Dengan penuh rasa syukur, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Model Desain dan Optimasi Distribusi Vaksin Influenza dengan pendekatan *multi-Objective* untuk Minimasi Biaya dan *Waste*" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana. Semoga shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita, Nabi Muhammad SAW, yang telah membimbing umat manusia menuju jalan terang penuh dengan hikmah dan pengetahuan. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan motivasi dalam penyelesaian laporan ini. Dengan tulus hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU, ASEAN, Eng selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph. D., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Dr. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ivan Darma Wangsa, S.T., M.T., CPLM., CASC. Selaku pembimbing tugas akhir yang telah banyak membantu dan meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, kritik dan saran kepada penulis yang membantu penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini
5. Kedua orang tua terkasih serta kakak dan adik saya yang senantiasa memberikan doa, motivasi, perhatian, dan semangat bagi penulis.
6. Seluruh teman-teman yang telah membantu dan memotivasi dalam pengerjaan laporan tugas akhir.



Yogyakarta, 30 Agustus 2025

ABSTRAK

Vaksin influenza merupakan produk biologis yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu sehingga memerlukan sistem distribusi *cold chain* yang ketat. Di Indonesia, rumah sakit menghasilkan 294,66 ton limbah medis setiap hari, di mana sebagian besar berasal dari kegiatan imunisasi, termasuk sisa vaksin, spuit, dan vial. Penelitian ini bertujuan merancang model matematis berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk mengoptimalkan rantai pasok vaksin influenza di RS UII, menghitung nilai optimal total biaya dan limbah, serta menganalisis sensitivitas terhadap perubahan parameter. Model dikembangkan dengan pendekatan multi-objective weighted sum (60% biaya, 40% *waste*) dan divalidasi menggunakan Solver Microsoft Excel. Hasil optimasi menunjukkan penurunan total biaya sebesar 14,46% dari Rp3.976.821.574 menjadi Rp3.401.842.776, dengan efisiensi terbesar pada biaya simpan (−80,13%), pengiriman (−27,24%), dan pemesanan (−25%), sementara biaya pembelian tetap mendominasi 98,8% dari struktur biaya. *Total waste* juga berkurang sebesar 0,30%, dari 170,23 kg menjadi 169,72 kg, dengan eliminasi penuh pada limbah pemusnahan. Analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa *demand* berpengaruh langsung terhadap biaya dan *waste*, biaya pembelian hanya memengaruhi *total cost*, biaya penyuntikan berdampak sangat kecil, dan bobot vaksin dan kemasan signifikan terhadap *waste*. Dengan demikian, model MILP terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi distribusi vaksin baik dari aspek finansial maupun lingkungan.

Kata kunci: vaksin influenza, rantai pasok, MILP, optimasi biaya, *waste*.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN ii
SURAT BUKTI PENELITIAN iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI v
HALAMAN PERSEMBAHAN vi
MOTTO vii
KATA PENGANTAR viii
ABSTRAK ix
DAFTAR ISI x
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 4
1.5 Batasan Penelitian 4
1.6 Sistematika Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Kajian Literatur 6
2.2 Landasan Teori 14
2.2.1 Rantai Pasok 14
2.2.2 Vaksin 14
2.2.3 Vaksin Influenza 16
2.2.4 Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) 18
2.2.5 Limbah Medis 19
2.2.6 Mixed-Integer Linear Programming 20
BAB III METODE PENELITIAN 23
3.1 Subjek dan Objek Penelitian 23
3.2 Jenis Data Penelitian 23
3.3 Alur Penelitian 23
BAB IV PENGEMBANGAN MODEL DAN PENGUMPULAN DATA 27
4.1 Pengembangan Model Matematis 27
4.2 Pengumpulan Data 32
4.3 Validasi dan Hasil 34
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 42
5.1 Analisis Sensitivitas Model pada Demand 42
5.2 Analisis Sensitivitas Model pada Biaya Pembelian 44
5.3 Analisis Sensitivitas Model pada Biaya Penyuntikan 47
5.4 Analisis Sensitivitas Model pada Bobot Vaksin dan Kemasan 50
BAB VI PENUTUP 54
6.1 Kesimpulan 54
6.2 Saran 54
DAFTAR PUSTAKA 56
LAMPIRAN A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Tabel *Gap Research* 13
Tabel 4. 1 Data Studi Kasus pada Rumah Sakit 33
Tabel 4. 2 Data Studi Kasus untuk Permintaan Konsumen 33
Tabel 4. 3 Hasil Sebelum dan Sesudah *Running* Solver 37
Tabel 4. 4 Presentase biaya yang Diperoleh *Running* Solver 37
Tabel 4. 5 Hasil Optimal untuk Frekuensi Pemesanan 38
Tabel 4. 6 Hasil Optimal Jumlah Vaksin yang Dibeli 39
Tabel 4. 7 Hasil Optimal Jumlah Vaksin pada *Cold Storage* 39
Tabel 4. 8 Hasil Optimal pada Vaksin yang Dimusnahkan 41
Tabel 5. 1 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Demand 42
Tabel 5. 2 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Biaya Pembelian 45
Tabel 5. 3 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Biaya Penyuntikan 47
Tabel 5. 4 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Bobot Vaksin 50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Alur Penelitian....24
Gambar 4. 1 Komponen Keputusan, Batasan, dan Tujuan Model....27
Gambar 4. 2 Komponen Penyusun *Total Cost* (Z1)....29
Gambar 4. 3 Komponen Penyusun *Total Waste* (Z2)....30
Gambar 4. 4 Supply Chain Vaksin Influenza di RS UII....32
Gambar 4. 5 Hasil Validasi dengan t-*Test*....35
Gambar 4. 6 Software Solver Excel....36
Gambar 4. 7 Temuan Hasil Optimal....36
Gambar 5. 1 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas *Demand*....43
Gambar 5. 2 Grafik Total Waste pada Uji Sensitivitas *Demand*....44
Gambar 5. 3 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Biaya Pembelian....46
Gambar 5. 4 Grafik *Total Waste* pada Uji Sensitivitas Biaya Pembelian....47
Gambar 5. 5 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Biaya Penyuntikan....49
Gambar 5. 6 Grafik Total Waste pada Uji Sensitivitas Biaya Penyuntikan....50
Gambar 5. 7 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Bobot Vaksin dan Kemasan....52
Gambar 5. 8 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Bobot Vaksin dan Kemasan....53

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Vaksin merupakan produk biologis yang termasuk dalam kategori *perishable product* karena memiliki karakteristik yang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan, terutama suhu dan cahaya (Astuti et al., 2023). Paparan terhadap suhu yang tidak sesuai, baik terlalu tinggi maupun terlalu rendah, dapat menurunkan potensi vaksin secara signifikan hingga membuatnya tidak lagi efektif dalam memberikan kekebalan. Seperti halnya makanan segar atau produk susu, vaksin memiliki umur simpan terbatas dan tidak boleh digunakan setelah melewati masa kedaluwarsa karena efektivitas dan keamanannya tidak lagi terjamin. Penanganan vaksin membutuhkan sistem penyimpanan dan distribusi yang ketat melalui *cold chain*, yaitu menjaga vaksin tetap pada suhu stabil dan terkontrol sejak proses produksi hingga sampai ke pengguna akhir.

Vaksinasi merupakan salah satu strategi pencegahan influenza yang paling efektif dan efisien (Gwiharto et al., 2021). Vaksin influenza bekerja dengan merangsang sistem kekebalan tubuh untuk menghasilkan antibodi yang spesifik terhadap virus influenza yang beredar. Dengan cakupan vaksinasi yang tinggi, risiko penularan dan komplikasi serius akibat influenza dapat dikurangi secara signifikan, sehingga melindungi individu dan masyarakat secara luas.

Vaksin merupakan produk biologis yang diformulasikan untuk menginduksi imunitas aktif terhadap patogen penyebab penyakit infeksi. vaksin dibuat dari bibit penyakit yang dilemahkan, dimatikan, atau hanya diambil bagian-bagian pentingnya saja (Yadav et al., 2014). Bagian-bagian ini dibuat mirip dengan aslinya supaya tubuh dapat mengenali jika ada penyakit tersebut datang.

Program vaksinasi influenza sebagai upaya pencegahan penyakit menular di Indonesia telah membawa konsekuensi berupa timbulan limbah kesehatan yang signifikan, khususnya limbah vaksin influenza seperti spuit dan jarum suntik bekas, sisa vaksin, vial atau ampul, swab alkohol, masker, sarung tangan, dan alat pelindung diri lainnya (Alam et al., 2024). Indonesia diperkirakan menghasilkan 294,66 ton limbah medis berbahaya (LMB) setiap hari. Kapasitas pengelolaan LMB nasional, yang telah diperkirakan Kementerian Kesehatan, hanya mencapai 241,02 ton/hari. Dari jumlah ini 18,2% sebesar 53,64 ton/hari dari total LMB tidak tertangani (Nabilla et al., 2021). Selain itu, penelitian yang dilakukan Simbolon dan Esrana (2000) menunjukan bahwa biaya operasional

menyumbang hingga 96,6% - 99,96% dari total biaya imunisasi, dengan komponen terbesar adalah vaksin, gaji, alat suntik, dan transportasi lapangan. Imunisasi yang dilakukan di lokasi yang jauh dapat menimbulkan biaya yang sangat besar terhadap komponen transportasi lapangan.

Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia (RS UII) merupakan salah satu institusi kesehatan terkemuka di Yogyakarta yang memiliki peranan dalam pencegahan dan pengendalian influenza di daerah Yogyakarta. Pelayanan vaksinasi influenza yang efektif sangat penting, tidak hanya untuk melindungi pasien dan karyawan medis di rumah sakit, tetapi juga untuk mendukung kesehatan masyarakat secara umum.

Pengelolaan distribusi vaksin influenza di rumah sakit dapat menghadapi sejumlah tantangan yang signifikan. Beberapa masalah yang muncul antara lain adalah perlunya perencanaan yang tepat untuk kebutuhan vaksin, pengelolaan rantai dingin (*cold chain*) guna memastikan kualitas vaksin tetap terjaga, serta penjadwalan dan pelaksanaan vaksinasi yang efektif (Kusumadewi & Widiati, 2023). Selain itu, pengelolaan inventaris vaksin juga harus dilakukan dengan cermat untuk menghindari kekurangan (*stockout*) atau kelebihan stok (*overstock*). Kompleksitas situasi ini semakin bertambah dengan adanya berbagai jenis vaksin influenza yang tersedia, beragamnya target populasi, serta fluktuasi permintaan vaksin yang terjadi dari waktu ke waktu (Gwiharto et al., 2021). Permasalahan yang terjadi pada RS UII terdapat pada pengelolaan stok, pada beberapa bulan terjadi *overstock* maupun *stockout* yang dapat menimbulkan biaya yang tidak diperlukan. Selain itu, terdapat 2 supplier dan 2 merek vaksin yang berbeda, vaksin yang dipesan masih ditekan pada 1 merek vaksin saja. Di lain sisi, dalam mengurangi timbulan limbah yang dihasilkan *overstock,* perlu dilakukannya manajemen yang optimal.

Selain aspek kesehatan dan operasional, aspek ekonomi juga menjadi pertimbangan penting bagi rumah sakit dalam penyediaan layanan vaksinasi. Rumah sakit perlu memastikan bahwa investasi dalam pengadaan dan distribusi vaksin influenza dapat memberikan keuntungan finansial yang berkelanjutan, yang kemudian dapat dialokasikan untuk peningkatan kualitas layanan kesehatan lainnya. Optimasi biaya distribusi dan penyimpanan vaksin sangat penting untuk mencegah kerugian akibat keterlambatan distribusi atau kadaluarsa vaksin, yang dapat berdampak pada pemborosan anggaran dan menurunkan efisiensi layanan kesehatan (Larasanti et al., 2023). Oleh karena itu, optimasi biaya pengadaan, penyimpanan, dan distribusi vaksin menjadi esensial.

Metode MINLP cenderung sangat kompleks karena melibatkan fungsi nonlinier dan masalah NP-*hard* (*Nondeterministic Polynomial time*) sehingga *solver* umum sering kesulitan menangani masalah berskala besar (Kannan & Monma, 1978). Pendekatan heuristik atau metaheuristik seperti algoritma genetika atau *simulated annealing* dapat memberikan solusi cepat, tetapi umumnya hanya mendekati solusi optimum tanpa jaminan keoptimalan (*Optimization vs. Heuristics: Which Is the Right Approach for Your Business? | ICRON*, 2025). Demikian pula, *dynamic programming* terhambat oleh *curse of dimensionality* ketika ruang status menjadi sangat besar sehingga tidak praktis untuk permasalahan nyata skala besar (Bellman, 1972).

Dalam menyelesaikan sebuah permasalahan yang berkaitan dengan optimasi matematis, peneliti menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dalam pembangunan model. Metode ini banyak digunakan dalam pemodelan seperti pengepakan, *knapsack*, inventaris, perencanaan produksi, lokasi, alokasi sumber daya, masalah perutean, dan penjadwalan (Winston & Goldberg, 2004). Selain itu, pendekatan MILP dapat menyelesaikan masalah penambahan gudang untuk penambahan jumlah barang yang optimal dan pengiriman produk dengan tujuan minimasi biaya (Bacchetti et al., 2020). Oleh karena itu, peneliti membuat model optimalisasi dengan metode MILP pada proses rantai pasok vaksin influenza dengan tujuan mengoptimalkan proses-proses yang ada agar efisien.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut merupakan rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Bagaimana rancangan dan penerapan model matematis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) pada sistem rantai pasok vaksin influenza di RS UII?
2. Berapakah nilai optimal total biaya dan *waste* yang diperoleh dari penerapan fungsi tujuan minimasi biaya dan *waste*?
3. Bagaimana pengaruh perubahan parameter (kenaikan maupun penurunan) terhadap nilai optimal total biaya dan *waste* berdasarkan uji sensitivitas?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan tujuan dari penelitian ini:

1. Menyusun dan mengembangkan model matematis berbasis MILP untuk mengoptimalkan rantai pasok vaksin influenza di RS UII.

2. Menghitung nilai optimal total biaya dan *waste* yang diperoleh melalui fungsi tujuan minimasi biaya dan *waste*.
3. Menganalisis hasil uji sensitivitas untuk menilai dampak perubahan parameter terhadap nilai optimal total biaya dan *waste*.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut manfaat dari penelitian ini:

1. Mengetahui komponen biaya yang paling berpengaruh dalam meminimumkan biaya dan waste yang dapat memberikan dampak bagi lingkungan.
2. Mendapatkan rekomendasi perbaikan kepada manajemen rumah sakit dalam meminimalkan biaya.
3. Mengembangkan model yang dapat digunakan sebagai data atau perbandingan untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa batasan, antara lain:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada produk vaksin influenza di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia untuk distribusi wilayah Yogyakarta dan sekitarnya.
2. Objek penelitian ini yaitu vaksin influenza yang tersedia di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia.
3. Metode penelitian yang dilakukan melalui wawancara kepada pihak rumah sakit dan didukung dengan data sekunder dari penelitian terdahulu.
4. Pengambilan data dilakukan pada tahun 2025.

1.6 Sistematika Penelitian

Penulisan tugas akhir ini tersusun atas beberapa bab dan sub-bab. Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memberikan gambaran umum mengenai latar belakang serta alasan dilakukannya penelitian. Selain itu, dijelaskan pula perumusan masalah yang ingin diselesaikan, tujuan dari penelitian, manfaat yang dapat diperoleh, batasan-batasan serta asumsi yang berlaku di dalam perusahaan, serta sistematika penulisan yang berkaitan dengan pembahasan dalam skripsi ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan skripsi ini. Teori-teori tersebut bertujuan untuk mendukung perumusan masalah serta membantu dalam penyelesaian masalah yang diteliti.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan berbagai tahapan dan metode yang digunakan dalam proses penelitian, termasuk diagram alir (*flowchart*) yang menggambarkan langkah-langkah penelitian secara sistematis, terstruktur, dan terarah.

BAB IV PENGABILAN DATA DAN PENGEMBANGAN MODEL

Bab ini memuat proses pengembangan rancangan model analog yang diterapkan dalam penelitian pada produk vaksin influenza. Pengembangan ini bertujuan untuk memperoleh hasil yang relevan dengan perumusan masalah, serta mencakup pembahasan data dan informasi yang digunakan dalam skripsi ini.

BAB V PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan analisis mendalam terhadap hasil penelitian yang telah diperoleh. Hasil-hasil tersebut dianalisis dengan mengaitkannya pada teori yang relevan serta temuan dari penelitian sebelumnya guna memberikan pemahaman yang lebih kontekstual. Selain itu, bagian ini juga menguraikan interpretasi data, menjelaskan faktor-faktor yang melatarbelakangi temuan, serta membahas implikasinya terhadap permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya. Dengan demikian, pembahasan ini berperan penting dalam memberikan pemahaman menyeluruh serta memastikan bahwa hasil penelitian mampu menjawab tujuan dan rumusan masalah yang telah ditetapkan.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini merangkum temuan utama sebagai jawaban atas rumusan masalah yang telah ditetapkan. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil analisis dan pembahasan sebelumnya, dengan tujuan memberikan gambaran akhir mengenai kontribusi penelitian terhadap pengembangan ilmu pengetahuan atau penerapannya dalam praktik. Selain itu, disampaikan pula saran yang berisi rekomendasi untuk penelitian selanjutnya maupun usulan praktis bagi pihak-pihak terkait, seperti dunia industri, masyarakat, atau kalangan akademisi. Saran ini bertujuan memberikan arah tindak lanjut atas temuan yang diperoleh serta mendorong eksplorasi lebih lanjut terhadap isu yang relevan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Bagian ini memuat tinjauan pustaka yang mencakup penelitian-penelitian sebelumnya yang memiliki kesamaan topik atau pendekatan dengan penelitian ini. Studi-studi terdahulu tersebut dijadikan sebagai acuan atau pembanding yang relevan, baik dari segi metodologi maupun permasalahan yang diangkat. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk memberikan konteks teoritis serta mengidentifikasi perbedaan atau kesenjangan hasil antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang sedang dilakukan, sehingga dapat memperkuat landasan analisis dalam studi ini.

Pada penelitian yang berjudul ***"A Dynamic Optimization Model for Vaccine Allocation with Age Considerations: A Study Inspired by the COVID-19 Pandemic"*** yang dilakukan oleh Pirayesh et al. (2025). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model optimasi dinamis dalam pengalokasian vaksin COVID-19 yang mempertimbangkan perbedaan usia guna meminimalkan angka infeksi dan kematian. Metode yang digunakan adalah integrasi model epidemiologi SVIR berbasis kelompok usia dengan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk menentukan distribusi vaksin optimal secara berkala. Hasil penelitian menunjukkan bahwa memprioritaskan vaksinasi untuk kelompok usia tua efektif menurunkan angka kematian, sementara memvaksinasi kelompok usia muda lebih berdampak pada penurunan angka infeksi. Kesimpulannya, strategi alokasi vaksin yang efektif sangat bergantung pada tujuan kebijakan, dan model ini dapat menjadi alat bantu penting bagi pembuat kebijakan dalam merancang distribusi vaksin yang adaptif terhadap dinamika pandemi dan keterbatasan sumber daya.

Penelitian dengan judul ***"Multi-Objective Optimization of Two-Echelon Vehicle Routing Problem: Vaccines Distribution as A Case Study"*** yang dilakukan oleh (Al Theeb et al. (2024). Penelitian ini bertujuan mengembangkan model optimasi multi-objektif berbasis *Two-Echelon Vehicle Routing Problem* (2E-VRP) untuk mendukung distribusi vaksin yang efisien selama pandemi, terutama di wilayah dengan infrastruktur terbatas. Metode yang digunakan adalah *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) yang menggabungkan kendaraan besar sebagai gudang bergerak (*mobile satellite*) dan kendaraan kecil untuk pengiriman ke pusat vaksinasi dan lokasi langsung (*on-spot*), serta algoritma heuristik berbasis *greedy random search* untuk menangani kompleksitas komputasi. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa model ini mampu meningkatkan rata-rata jumlah dosis vaksin yang dikirim dan mengurangi deviasi permintaan yang tidak terpenuhi, dengan performa heuristik yang mengungguli perangkat lunak CPLEX pada *dataset* berskala menengah dan besar. Kesimpulannya, pendekatan ini efektif sebagai solusi distribusi vaksin yang adaptif terhadap keterbatasan logistik dan dapat diterapkan dalam situasi darurat seperti pandemi.

Penelitian dengan judul ***"The Role of Drone Technology and Application of IoT on Vaccine Supply Chain During a Pandemic Under Uncertain Environment: A Real Case Study Of COVID-19 In Iran"*** yang dilakukan oleh Fattahi et al. (2025). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model rantai pasok vaksin COVID-19 berbasis teknologi drone dan *Internet of Things* (IoT) dalam kondisi ketidakpastian, dengan fokus pada efisiensi biaya dan waktu tunggu dalam antrean vaksinasi. Metode yang digunakan adalah model optimasi *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) multi-objektif, yang mencakup empat tingkatan rantai pasok—produsen, pusat distribusi, pusat kesehatan, dan pusat imunisasi—dengan pendekatan *fuzzy* untuk menangani parameter yang tidak pasti seperti biaya dan waktu pengiriman. Hasil dari studi kasus nyata di Iran menunjukkan bahwa tanpa penerapan IoT dan drone, distribusi vaksin menjadi tidak efisien, menyebabkan peningkatan risiko penularan, pemborosan vaksin, dan keterlambatan pengiriman. Kesimpulannya, integrasi teknologi drone dan IoT terbukti efektif dalam mempercepat distribusi vaksin, mengurangi biaya, dan meningkatkan respons rantai pasok kesehatan selama pandemi.

Penelitian dengan judul ***"Vaccine Supply Chain Network Design by Considering Viability, Robustness and Risk"*** yang dilakukan oleh Lotfi et al. (2024). Penelitian ini mengembangkan solusi untuk masalah *Viable Vaccine Supply Chain Network Design* (VVSCND) dengan tujuan menangani keberlanjutan, ketahanan, ketangkasan, risiko, dan ketahanan. Metode yang digunakan adalah model *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) berbasis pendekatan *Robust Stochastic Programming* (RSP) untuk meminimalkan fungsi biaya ekspektasi dan maks tertimbang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fungsi biaya masalah VVSCND hanya sedikit lebih tinggi (0,04%) dibandingkan dengan desain rantai pasokan vaksin yang tidak mempertimbangkan risiko atau skenario kasus terburuk, sehingga menyimpulkan bahwa VSCND optimal dapat dicapai dengan mempertimbangkan berbagai faktor melalui pemodelan MILP berbasis RSP.

Penelitian dengan judul ***"Bi-Objective Optimization of a Stochastic Resilient Vaccine Distribution Network in The Context of the COVID-19 Pandemic"*** yang dilakukan oleh Mohammadi et al. (2022). Penelitian ini mengusulkan metode untuk mengoptimalkan desain jaringan distribusi vaksin dengan menggunakan model *Mixed-Integer Non-Linear Programming* yang memiliki dua tujuan: mengurangi perkiraan jumlah kematian dan meminimalkan biaya distribusi vaksin, dengan mempertimbangkan ketidakpastian dalam parameter input dan potensi gangguan pada jaringan distribusi. Model ini divalidasi melalui studi kasus kampanye vaksinasi COVID-19 di Prancis, yang menunjukkan bahwa strategi vaksinasi saat ini belum optimal dan efektivitasnya dapat ditingkatkan dengan menggabungkan prioritisasi populasi dan pembatasan karantina, yang berpotensi mengurangi jumlah kematian hingga 8,5%.

Penelitian dengan judul **"*Locate Vaccination Stations Considering Travel Distance, Operational Cost, And Work Schedule*"** yang dilakukan oleh Li et al. (2021). Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan lokasi stasiun vaksinasi dengan mempertimbangkan beberapa tujuan yang saling bertentangan: meminimalkan jarak tempuh, memaksimalkan jumlah stasiun yang beroperasi penuh, dan meminimalkan biaya operasional. Untuk mengatasi hal ini, model *Mixed-Integer Nonlinear Programming* (MINLP) multi-tujuan diusulkan, disederhanakan menjadi model *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) menggunakan strategi dua tahap. Metode *ε-constraint* kemudian digunakan untuk menangani berbagai tujuan dan menganalisis skenario yang berbeda untuk mencapai solusi Pareto non-inferior. Studi kasus nyata dari Nanshan CDC di Kota Shenzhen, Cina, mengungkapkan bahwa menyeimbangkan biaya operasional, jarak tempuh rata-rata, dan jumlah stasiun yang beroperasi penuh adalah hal yang penting, dengan model yang menyarankan bahwa membuka sekitar 50 stasiun vaksinasi akan mencapai kompromi yang memuaskan di antara tujuan-tujuan ini.

Penelitian dengan judul **"*Multi-Objective Vaccine Delivery Problem Considering Low Carbon and Customer Loss Aversion*"** dilakukan oleh Li (2023). Penelitian ini membahas masalah optimasi lokasi stasiun vaksinasi, dengan mempertimbangkan tujuan yang bertentangan yaitu meminimalkan jarak tempuh, memaksimalkan jumlah stasiun yang beroperasi penuh, dan meminimalkan biaya operasional, menggunakan model *Mixed-Integer Nonlinear Programming* (MINLP) *multi-objective* yang disederhanakan menjadi model MILP dan diselesaikan dengan metode *ε-constraint*. Selain itu, penelitian ini memiliki tujuan ganda

untuk meminimalkan total biaya logistik dan keterlambatan pengiriman, menggabungkan konsumsi bahan bakar dan keengganan kerugian pelanggan, dan merancang algoritma *Multi-objective Multi-population Fruit Fly Optimization* (MOMPFFO) untuk menyelesaikannya. Penelitian menyimpulkan bahwa menyeimbangkan tujuan-tujuan ini sangat penting, dengan *Nanshan Center for Disease Control* mengurangi jumlah stasiun dari 76 menjadi 54, dan model tersebut menyarankan bahwa membuka sekitar 50 stasiun mencapai kompromi yang memuaskan. Eksperimen numerik untuk masalah pengiriman vaksin menunjukkan efektivitas algoritma dalam mengoptimalkan rute logistik untuk mengurangi penggunaan kendaraan dan konsumsi bahan bakar sambil menyeimbangkan biaya dan efisiensi pengiriman.

Penelitian dengan judul **"*An Optimization Model for Distribution Ofinfluenza Vaccines Through a Green Healthcare Supply Chain*"** dilakukan oleh Levner dan Herbon (2023). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meminimalkan total biaya penyimpanan dan distribusi vaksin di pusat distribusi (DC) dan klinik, sambil memastikan vaksin sampai ke klinik tepat waktu dan dengan tetap memperhatikan batasan lingkungan. Metode yang digunakan adalah pengembangan model *nonlinear mathematical programming*, yang diuji menggunakan data nyata dari studi kasus vaksinasi influenza Clalit HMO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa investasi dalam kegiatan ramah lingkungan lebih kecil dari manfaat moneter yang diharapkan dari kegiatan tersebut. Kesimpulan dari penelitian ini yaitu penerapan tindakan dan kebijakan perlindungan lingkungan dalam program vaksinasi skala besar dapat mengurangi total biaya program vaksinasi, dengan contoh nyata penurunan biaya total objektif dari 16.718.333 NIS menjadi 15.186.144 NIS ketika tindakan perlindungan lingkungan diterapkan.

Penelitian dengan judul **"*A Multi-Echelon Dynamic Cold Chain for Managing Vaccine Distribution*"** dilakukan oleh Manupati et al. (2021). Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang jaringan rantai dingin vaksin pandemi yang baru dan membantu dalam proses distribusi vaksin dengan memberikan panduan tentang cara membuat keputusan taktis dan strategis sehingga vaksin dapat didistribusikan secara efektif kepada populasi dalam waktu yang paling cepat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengembangkan model *multi-echelon dynamic cold* dan menerapkan analisis prediktif untuk memberikan strategi distribusi berdasarkan prioritas dan ketersediaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang diusulkan dapat mengurangi tingkat kematian dari 3% menjadi 1,2%. Model ini memberikan wawasan tentang besarnya sumber daya keuangan yang

dibutuhkan untuk membangun seluruh rantai distribusi dalam situasi yang tidak pasti, dengan total biaya 4.682.460.810.

Penelitian dengan judul **"*Supply Chain Planning of Vaccine and Pharmaceutical Clusters Under Uncertainty: The Case Of COVID-19*"** dilakukan oleh Kochakkashani et al. (2023). Penelitian ini bertujuan untuk menyediakan model matematika untuk mendukung perencanaan rantai pasokan farmasi selama epidemi COVID-19 dan memberikan wawasan baru ke dalam masalah rantai pasokan rumah sakit dengan menggabungkan rantai dingin dan non-dingin serta mempertimbangkan berbagai macam farmasi dan vaksin. Metode yang digunakan adalah *mixed-integer linear programming* (MILP) untuk model rantai pasokan empat tingkat, dengan tujuan meminimalkan biaya rantai pasokan farmasi sambil mempertahankan tingkat layanan yang dapat diterima. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan mampu mencapai tingkat layanan optimum dalam kondisi COVID sambil mempertahankan pengurangan biaya, dan teknik *clustering* terbukti mengurangi ukuran masalah dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan model. Secara khusus, model ini terdiri dari 29.509 persamaan tunggal dan 46.657 variabel, yang mencakup 44.137 variabel kontinu dan 2.520 variabel biner, dan mencapai solusi optimal setelah 2 jam dan 47 menit. Model MILP yang diusulkan efisien dalam memberikan intuisi praktis bagi para pengambil keputusan, dan teknik *clustering* mengurangi ukuran masalah dan waktu penyelesaian secara signifikan.

Penelitian dengan judul **"Model Optimasi Rantai Pasok Susu Sapi Segar untuk Mereduksi Emisi Karbon dan Food Waste"** dilakukan oleh Jeremi dan Vanany (2023). Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan rantai pasok produk susu di Jawa Barat yang meliputi multi pemasok, pabrik pengolahan tunggal, multi-distributor, dan multi-ritel konsumen, dengan mempertimbangkan limbah makanan dan emisi karbon sebagai fungsi tujuan. Metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) digunakan untuk mengoptimalkan total biaya, total limbah makanan, dan total emisi karbon. Hasil penelitian menunjukkan total biaya sebesar Rp18.036.770.000, total limbah makanan sebesar 21.734 liter, dan total emisi karbon sebesar 109.526 lt.CO2-eq. Model MILP dapat digunakan untuk mengoptimalkan rantai pasok susu dengan meminimalkan biaya, limbah makanan, dan emisi karbon.

Penelitian dengan judul **"Analisis Strategi Mitigasi Risiko Pada Rantai Pasok Vaksin Booster Covid-19 Menggunakan Metode House of Risk (HoR) Dan Simulasi**

System Dynamic" dilakukan oleh Anggraeni (2022). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi risiko-risiko yang mempengaruhi rantai pasok vaksin *booster* Covid-19 di Dinas Kesehatan Daerah Istimewa Yogyakarta dan menganalisis alternatif kebijakan perbaikan rantai pasok. Metode penelitian yang digunakan meliputi House of Risk (HOR) dan simulasi *system dynamic*. Hasil penelitian menunjukkan terdapat 16 *risk event* dan 24 *risk agent* yang mempengaruhi rantai pasok vaksin, dengan 5 *risk agent* dominan yaitu staff/petugas yang belum dilakukan *training* secara rutin, ketidaksesuaian suhu tempat penyimpanan vaksin, kesadaran masyarakat terhadap vaksinasi menurun, stok vaksin yang dikirim mendekati *expired date*, dan miskomunikasi jadwal pengiriman vaksin.

Penelitian dengan judul **"Pengembangan Model untuk Dynamic Supplier Selection Problem Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming dengan Mempertimbangkan Faktor Diskon"** dilakukan oleh Izzatunnisa et al. (2021). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk menyelesaikan masalah pemilihan supplier dinamis dengan mempertimbangkan faktor diskon *all-unit*. Metode MILP digunakan untuk memodelkan masalah pengadaan *multi-supplier*, multi-periode, dan multi-produk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang diusulkan terverifikasi dan tervalidasi, mampu menyelesaikan *numerical example* dengan total biaya pengadaan sebesar 792.418, dimana analisis sensitivitas Taguchi mengidentifikasi *unit price* sebagai parameter paling berpengaruh dengan kontribusi 84,25%. Faktor diskon dari supplier signifikan dalam menekan total biaya pengadaan.

Penelitian dengan judul **"Pengembangan Model Optimasi Untuk Mengurangi Total Biaya Outbound Logistics di Industri Unggas Dengan Metode Mixed Integer Linear Programming (MILP)"** dilakukan oleh Hakim et al. (2024). Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model optimasi untuk mengurangi biaya *outbound logistics* di industri unggas. Metode yang digunakan adalah *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dengan perangkat lunak LINGO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model optimasi MILP mampu mengurangi total biaya *outbound logistics* dari Rp451.364.739 menjadi Rp246.817.288, serta mengurangi penggunaan kendaraan dari 229 unit menjadi 89 unit dan meningkatkan utilisasi kendaraan dari 69% menjadi 96%. Model MILP efektif dalam mengoptimalkan biaya dan utilisasi kendaraan dalam *outbound logistics* industri unggas.

Penelitian dengan judul **"Optimasi Biaya Distribusi Multi-eselon untuk multi-produk menggunakan Mix Integer Linier Programming"** dilakukan oleh Fatma dan Manurung (2021). Tujuan penelitian ini adalah untuk meminimasi biaya distribusi pada jaringan distribusi perusahaan minuman ringan dengan menggunakan metode *Mix Integer Linear Programming* (MILP) yang mempertimbangkan biaya transportasi, penanganan material, dan biaya fasilitas *distribution center* (DC) sebagai pusat konsolidasi barang. Metode yang digunakan adalah pengembangan model matematis MILP untuk optimasi distribusi multi-produk dan multi-level. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan DC dapat menurunkan biaya distribusi sebesar 15.29% dari Rp. 784.250.000 menjadi Rp. 664.282.100, dengan mengoptimalkan biaya transportasi meskipun ada penambahan biaya fasilitas dan penanganan material di DC.

Penelitian ini memiliki perbedaan mendasar dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dibahas dalam kajian literatur. Sebagian besar studi terdahulu berfokus pada distribusi vaksin COVID-19 atau produk *perishable* lain seperti susu segar, unggas, dan minuman ringan dengan berbagai pendekatan optimasi, baik menggunakan MILP, MINLP, heuristik, maupun metode dinamis. Sementara itu, penelitian ini secara khusus menyoroti rantai pasok vaksin influenza pada level rumah sakit, yaitu di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia, sehingga memberikan konteks lokal dan aplikatif yang belum banyak diteliti. Perbedaan lain terletak pada fungsi tujuan yang digunakan, di mana penelitian ini mengembangkan model multi-objektif berbasis *weighted sum*, sehingga menyeimbangkan aspek finansial dan lingkungan sekaligus. Pendekatan ini berbeda dengan sebagian besar penelitian terdahulu yang cenderung berfokus hanya pada efisiensi biaya, risiko, atau ketidakpastian permintaan tanpa memasukkan aspek limbah vaksin secara eksplisit.

Tabel 1. 1 Tabel *Gap Research*

No	Penulis	Obyek (Industri)			Metode				
		Vaksin	F&B	Peternakan	MILP	MINLP	Prospect Theory	System Dynamic	House of Risk
1.	(Pirayesh et al., 2025)	√			√				
2.	(Al Theeb et al., 2024)	√			√				
3.	(Fattahi et al., 2025)	√			√				
4.	(Lotfi et al., 2024)	√			√				
5.	(Mohammadi et al., 2022)	√				√			
6.	(Li et al., 2021)	√				√			
7.	(Li, 2023)	√					√		
8.	(Levner & Herbon, 2023)	√				√			
9.	(Manupati et al., 2021)	√			√				
10.	(Rastegar et al., 2021)	√			√				
11.	(Jeremi & Vanany, 2023)		√		√				
12.	(Anggraeni, 2022)	√						√	√
13.	(Izzatunnisa et al., 2021)		√		√				
14.	(Hakim et al., 2024)			√	√				
15.	(Fatma & Manurung, 2021)		√		√				
16.	Usulan	√			√				

2.2 Landasan Teori

Landasan teori berisikan tentang istilah, teori atau formula yang terkait dengan topik penelitian. Landasan teori disusun dengan bersumber pada jurnal bereputasi dan/atau buku.

2.2.1 Rantai Pasok

Menurut Chopra & Meindl (2016), rantai pasok merupakan suatu sistem yang terdiri atas berbagai entitas bisnis yang terhubung dan terkoordinasi, yang terlibat dalam siklus produksi dan penyampaian nilai kepada pelanggan. Sistem ini mencakup aliran material, informasi, dan finansial, melibatkan berbagai pihak seperti pemasok, produsen, distributor, penyimpan, peritel, hingga konsumen akhir, dengan orientasi utama pada peningkatan nilai produk atau layanan dan optimalisasi pemenuhan kebutuhan pasar. Sedangkan menurut Lu (2011), Rantai pasok didefinisikan sebagai sekelompok perusahaan yang berpartisipasi dan saling terhubung, yang menambahkan nilai pada aliran input yang diubah dari sumber asalnya hingga produk atau layanan akhir yang diminta oleh konsumen.

Tujuan utama pengelolaan rantai pasok adalah menciptakan nilai bagi pelanggan dan mencapai keunggulan kompetitif melalui minimalisasi biaya, peningkatan responsivitas, peningkatan kualitas, dan peningkatan efisiensi (Larson, 2001). Dalam konteks yang lebih luas, Porter (1985) menekankan pentingnya aktivitas rantai pasok dalam kerangka *value chain*, di mana setiap aktivitas yang dilakukan dalam proses rantai pasok berkontribusi terhadap penciptaan nilai akhir bagi konsumen. Oleh karena itu, manajemen rantai pasok tidak hanya dipandang sebagai fungsi operasional, melainkan sebagai elemen strategis yang memiliki peran krusial dalam membentuk keunggulan bersaing dan meningkatkan daya saing perusahaan di pasar global.

2.2.2 Vaksin

Vaksin adalah produk biologis yang mengandung antigen berupa mikroorganisme yang telah dilemahkan atau bagian dari mikroorganisme tersebut, yang berfungsi merangsang sistem kekebalan tubuh untuk membentuk respons imun tanpa menyebabkan penyakit (Nirwana & Ubaidullah, 2023). Mekanisme kerja vaksin meniru cara kerja sistem imun tubuh dalam mengenali dan melawan patogen. Setelah vaksin diberikan, tubuh akan memproduksi antibodi yang dapat mengenali dan melawan virus atau bakteri penyebab penyakit jika suatu saat terjadi paparan nyata (WHO, 2025). Vaksin berperan sebagai penghalang (*barrier*) terhadap infeksi dan dapat mengurangi dampak berat dari penyakit.

Proses pengembangan vaksin melalui beberapa tahap uji klinis yang ketat untuk menjamin keamanan, imunogenisitas, dan efektivitasnya sebelum digunakan secara luas. Menurut organisasi kesehatan dunia (WHO), vaksin harus melewati uji klinis fase I, II, dan III yang masing-masing bertujuan menguji keamanan pada populasi kecil, menentukan dosis optimal dan memantau efek samping, serta menguji kemanjuran dan keamanan pada populasi yang lebih besar dalam jangka waktu yang lebih lama. Setelah melewati tahap ini, vaksin dapat dilisensikan dan digunakan dalam program imunisasi.

Proses produksi vaksin menurut Khairi dan Noviantari (2022) terdapat 6 tahap, berikut merupakan tahapannya:

1. Penelitian Pra-klinis

   Uji laboratorium dan uji coba pada hewan untuk mengidentifikasi potensi imunogenik dan toksik.
2. Uji Klinis Fase I

   Melibatkan sejumlah kecil relawan sehat, bertujuan mengkaji keamanan dan respons imun awal.
3. Uji Klinis Fase II

   Melibatkan ratusan partisipan untuk menguji efektivitas awal, menentukan dosis, dan memperluas penilaian keamanan.
4. Uji Klinis Fase III

   Melibatkan ribuan partisipan untuk menilai efikasi secara luas dan mengidentifikasi efek samping langka.
5. Persetujuan dan Produksi

   Setelah hasil uji menunjukkan manfaat yang lebih besar daripada risiko, otoritas kesehatan (seperti BPOM atau FDA) akan memberikan izin edar.
6. Uji Fase IV (Pasca-Pemasaran)

   Pemantauan jangka panjang terhadap keamanan dan efektivitas di masyarakat umum.

Berdasarkan penjelasan diatas, dapat diketahui proses produksi vaksin merupakan serangkaian tahapan yang ketat dan berjenjang, yang dirancang untuk memastikan keamanan dan efektivitas vaksin sebelum digunakan secara luas pada masyarakat. Keseluruhan proses menekankan pentingnya evaluasi ilmiah yang komprehensif dan berlapis untuk menjamin kualitas dan manfaat vaksin bagi kesehatan masyarakat.

Menurut Pebody dan Subbarao (2023), berdasarkan komponen yang digunakan, vaksin diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, antara lain:

1. Vaksin hidup yang dilemahkan (*live attenuated vaccine*)
   Menggunakan patogen hidup yang telah dilemahkan, misalnya vaksin Influenza dan MMR (campak, gondok, rubella).
2. Vaksin inaktif (*inactivated vaccine*)
   Mengandung patogen yang telah dimatikan, seperti vaksin polio (IPV).
3. Vaksin subunit, rekombinan, polisakarida, dan konjugat
   Menggunakan bagian-bagian spesifik dari patogen, seperti protein atau gula permukaan, misalnya vaksin HPV.
4. Vaksin mRNA dan DNA
   Mengandung materi genetik sintetis dari patogen untuk menginstruksikan sel tubuh memproduksi antigen yang memicu respons imun, contohnya vaksin Pfizer-BioNTech (COVID-19).
5. Vaksin vektor virus
   Menggunakan virus jinak sebagai "pembawa" gen patogen, contohnya vaksin AstraZeneca.

2.2.3 Vaksin Influenza

Menurut World Health Organization (2020), vaksin influenza adalah tindakan pencegahan, vaksin yang melindungi terhadap influenza, penyakit pernapasan yang disebabkan oleh virus influenza. Vaksin ini bekerja dengan mengekspos tubuh terhadap virus influenza yang tidak aktif atau dilemahkan, merangsang sistem kekebalan tubuh untuk menghasilkan antibodi terhadap virus dan memberikan kekebalan.

Virus influenza termasuk dalam keluarga *Orthomyxoviridae* dan diklasifikasikan menjadi beberapa tipe (A, B, C, dan D). Tipe A dan B adalah penyebab utama epidemi influenza musiman pada manusia (Webster et al., 1992). Virus influenza A selanjutnya dibagi lagi berdasarkan dua protein permukaannya, yaitu *hemaglutinin* (H) dan *neuraminidase* (N), yang memiliki berbagai subtipe. Kombinasi subtipe H dan N inilah yang menentukan strain virus influenza A seperti H1N1dan H3N2. Virus influenza B tidak diklasifikasikan berdasarkan subtipe, tetapi dibedakan menjadi garis keturunan (*lineage*) seperti *Victoria* dan *Yamagata* (Neumann & Kawaoka, 2006).

Menurut Webster et al. (1992), karakteristik utama virus influenza adalah kemampuannya untuk mengalami perubahan genetik yang signifikan melalui dua mekanisme utama: *antigenic drift* dan *antigenic shift*. *Antigenic drift* adalah akumulasi mutasi kecil pada gen H dan N yang terjadi secara terus-menerus, menyebabkan perubahan antigenik bertahap. Perubahan ini memungkinkan virus untuk menghindari respons imun yang terbentuk dari infeksi atau vaksinasi sebelumnya, yang menjadi alasan utama mengapa vaksin influenza perlu diperbarui setiap tahun. *Antigenic shift* adalah perubahan antigenik yang lebih besar dan tiba-tiba, biasanya terjadi pada virus influenza A, melalui *reassortment* genetik antara virus influenza dari spesies yang berbeda (misalnya, burung dan babi). *Antigenic shift* dapat menghasilkan *strain* virus baru dengan potensi pandemik karena populasi manusia mungkin tidak memiliki kekebalan sebelumnya terhadap antigen baru ini.

Jenis-jenis vaksin influenza terdapat 3 yang sudah dikembangkan para ahli dan digunakan, antara lain:

1. Vaksin Influenza Tidak Aktif (*Inactivated Influenza Vaccines* - IIV): Ini adalah jenis vaksin influenza yang paling umum digunakan. IIV mengandung virus influenza yang telah dimatikan (inaktivasi) dan biasanya diberikan melalui suntikan intramuskular. IIV dapat berupa:
    a. *Trivalent Influenza Vaccines* (TIV): Mengandung antigen dari tiga *strain* virus influenza: satu virus influenza A (H1N1), satu virus influenza A (H3N2), dan satu virus influenza B.
    b. *Quadrivalent Influenza Vaccines* (QIV): Mengandung antigen dari empat *strain* virus influenza: dua virus influenza A (H1N1 dan H3N2) dan dua virus influenza B (dari garis keturunan *Victoria* dan *Yamagata*) (Grohskopf et al., 2015).
2. Vaksin Influenza Rekombinan (*Recombinant Influenza Vaccines* - RIV): Vaksin ini diproduksi menggunakan teknologi rekombinan DNA. Gen yang mengkode protein HA dari *strain* virus influenza yang direkomendasikan dimasukkan ke dalam sel inang (seperti sel serangga), yang kemudian menghasilkan protein HA dalam jumlah besar. Protein HA yang dimurnikan ini kemudian digunakan sebagai antigen dalam vaksin. RIV tidak mengandung virus influenza utuh atau telur ayam dalam proses produksinya (YAP et al., 2018).

3. Vaksin Influenza Virus Hidup yang Dilemahkan (*Live Attenuated Influenza Vaccines* - LAIV): Vaksin ini mengandung virus influenza yang telah dilemahkan sehingga tidak menyebabkan penyakit tetapi masih dapat menginduksi respons imun. LAIV biasanya diberikan melalui semprotan hidung dan saat ini hanya direkomendasikan untuk orang sehat berusia 2 hingga 49 tahun yang tidak hamil (Levani & Paramita, 2021).

Menurut World Health Organiztion (2015), Tempat penyimpanan vaksin influenza harus memenuhi kriteria suhu yang ketat dan stabil, yaitu antara 2°C hingga 8°C dan tidak boleh membeku sama sekali. Idealnya, vaksin disimpan dalam lemari es khusus vaksin (*purpose-built* atau *pharmaceutical-grade*) untuk memastikan stabilitas suhu yang lebih baik. Jika menggunakan lemari es domestik, vaksin harus diletakkan di bagian tengah, berjauhan dari pintu dan elemen pendingin. Penataan vaksin dalam lemari es memerlukan jarak antar kemasan untuk sirkulasi udara yang baik dan menghindari kontak langsung dengan dinding lemari es. Pemantauan suhu yang akurat dan teratur, minimal dua kali sehari menggunakan termometer yang terkalibrasi, serta pencatatan suhu minimum dan maksimum. Selain suhu, perlindungan vaksin dari paparan cahaya langsung dan penerapan sistem manajemen stok FIFO/FEFO turut berkontribusi pada pemeliharaan kualitas vaksin. Dengan demikian, kepatuhan terhadap kriteria penyimpanan yang tepat merupakan fondasi penting dalam menjaga potensi imunogenisitas vaksin influenza hingga saat pemberian.

2.2.4 Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009, limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) didefinisikan sebagai substansi, material, atau sisa proses yang mengandung bahan berbahaya dan/atau beracun yang memiliki karakteristik seperti mudah meledak, mudah menyala, reaktif, beracun, korosif, dan/atau menyebabkan infeksi, sehingga berpotensi mengancam lingkungan dan kesehatan manusia secara langsung maupun tidak langsung. Sumber-sumber penghasil limbah B3 bermacam-macam, mencakup residu proses produksi industri seperti lumpur logam berat, pelarut bekas, limbah medis dari fasilitas kesehatan seperti obat sitotoksik, limbah infeksius terkontaminasi kimia, buangan laboratorium seperti reagen kadaluarsa, serta limbah dari kegiatan rumah tangga dan komersial seperti baterai bekas, oli bekas (Linden & Reichel, 2020). Implikasi dari pengelolaan limbah B3 yang tidak adekuat dapat bersifat multidimensional, meliputi kontaminasi tanah dan air tanah yang berpotensi merusak ekosistem dan sumber daya air bersih, emisi gas beracun ke atmosfer yang

berkontribusi pada polusi udara dan perubahan iklim, serta risiko kesehatan yang signifikan bagi populasi terpapar, termasuk gangguan sistem saraf, kanker, dan masalah reproduksi (United Nation Environment Programme, 2024).

2.2.5 Limbah Medis

Limbah medis secara umum didefinisikan sebagai sampah yang mengandung bahan infeksius atau berpotensi infeksius, yang berasal dari fasilitas kesehatan seperti rumah sakit, klinik, laboratorium, dan praktik dokter (SAFETYSIGN.CO.ID, 2025). Definisi menurut Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (2020) menyebutnya sebagai limbah yang dihasilkan dari pelayanan medik, perawatan gigi, farmasi, penelitian, pengobatan, atau pendidikan yang melibatkan bahan-bahan beracun, infeksius, berbahaya, atau membahayakan. Kandungan zat berbahayanya, limbah medis dikategorikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Klasifikasi limbah medis dapat bervariasi antara standar internasional dan nasional, namun memiliki inti yang serupa dalam mengidentifikasi potensi bahaya. Menurut World Health Organization (2014) mengklasifikasikan limbah medis ke dalam beberapa kategori utama:

1. Limbah Infeksius

   Limbah yang terkontaminasi organisme patogen dan berpotensi menularkan penyakit. Contohnya meliputi selang dan botol infus, kain kasa bekas cairan tubuh (darah, liur, keringat, urine), serta kultur dari laboratorium.

2. Limbah Patologis

   Terdiri dari jaringan tubuh manusia, cairan darah, bagian tubuh, atau bangkai hewan yang telah terkontaminasi.

3. Limbah Benda Tajam

   Semua benda yang dapat menembus kulit, seperti jarum suntik, pisau bedah, pecahan kaca, ampul, staples, silet, atau kabel.

4. Limbah Kimia

   Mengandung senyawa kimia yang umum digunakan di laboratorium (misalnya disinfektan, pelarut), logam berat (seperti merkuri, kadmium), atau alat medis yang rusak (termasuk termometer).

5. Limbah Farmasi

   Sisa obat-obatan, antibiotik, atau vaksin yang telah kadaluarsa atau tidak lagi terpakai.

6. Limbah Sitotoksik/Genotoksik

   Jenis limbah berbahaya yang memiliki sifat karsinogenik (penyebab kanker), teratogenik (penyebab cacat lahir), dan mutagenik (penyebab mutasi gen). Umumnya berasal dari obat-obatan kemoterapi.

7. Limbah Radioaktif

   Berasal dari cairan radioterapi yang tidak terpakai di laboratorium atau alat/bahan lain yang telah terkontaminasi zat radioaktif, seperti dari mesin CRT, MRI, atau rontgen.

2.2.6 *Mixed-Integer Linear Programming*

Metode Mixed Integer Linear Programming (MILP) pada rantai pasok adalah suatu pendekatan optimasi matematis yang digunakan untuk memodelkan dan menyelesaikan masalah pengambilan keputusan yang melibatkan variabel *integer* dan kontinu secara linear (Fatma & Manurung, 2021). model MILP bertujuan untuk mengoptimalkan (memaksimalkan atau meminimalkan) sebuah fungsi tujuan linear yang bergantung pada sejumlah variabel keputusan, dengan tetap memenuhi serangkaian batasan linear yang berbentuk persamaan atau ketidaksamaan. Karakteristik MILP terletak pada keberadaan setidaknya satu variabel keputusan yang dibatasi untuk mengambil nilai dalam himpunan bilangan bulat, sementara variabel lainnya dapat berupa bilangan riil non-negatif.

Algoritma Mixed-Integer Linear Programming (MILP) yang dilakukan oleh Jeremi dan Vanany (2023) bertujuan mengetahui nilai optimal total biaya, *food waste*, emisi karbon dan mengetahui kuantitas optimal pada pembelian, produksi, dan pengiriman antar eselon dengan fungsi tujuan meminimumkan total biaya rantai pasokan, *food waste*, dan emisi karbon pada industri susu sapi segar. Berikut formulasi matematis model dari Jeremi dan Vanany (2023):

Model Matematis:

Objective 1: minimasi $z1$

$$z1 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CR_{tip} \cdot ukud_{tip} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CS_{tip} \cdot zkd_{tip} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CWKUD_{tip} \cdot ekud_{tip}$$
$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} CP_{tp} \cdot xx_{tp} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CIR_{tip} \cdot ir_{tip} \cdot COP_{p} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CIP_{tip} \cdot ip_{tp}$$
$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} CHP_{tp} \cdot ip_{tp} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} CD_{tjp} \cdot ddc_{tjp} \cdot S_{j} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} CK_{tjp} \cdot wdc_{tjp}$$
$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CWDC_{tip} \cdot edc_{tip} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} CID_{tjp} \cdot id_{tjp} \cdot COPDc_{tjp}$$
$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} CHDC_{tp} \cdot id_{tjp} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P} CT_{tjkp} \cdot q_{tjkp} \cdot R_{jk} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} CET_{tp} \cdot tet_{tp}$$
$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} CEI_{tp} \cdot tei_{tp} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{p=1}^{P} CED_{tp} \cdot ted_{tp}$$

Fungsi tujuan pertama diatas telah disesuaikan dengan kondisi aktual yang terdapat pada studi kasus perusahaan pengolahan produk susu yang berlokasi di wilayah Jawa Barat, dengan fokus utama penelitian pada aspek distribusi. Dalam fungsi ini, terdapat 16 komponen biaya yang menjadi objek minimisasi. Komponen-komponen tersebut mencakup: biaya pembelian susu dari KUD, biaya *quality control* (QC) susu dari KUD ke pabrik produksi, biaya deteriorasi atau *food waste* di pabrik produksi, biaya produksi dan pengemasan susu, biaya pendinginan susu sebelum dan sesudah proses inspeksi di pabrik produksi, biaya penyimpanan (*holding cost*) di gudang pabrik, biaya distribusi dari pabrik ke *distribution center* (DC), biaya QC di DC, biaya deteriorasi di DC, biaya pendinginan produk di DC, biaya penyimpanan di DC, biaya transportasi dari DC ke konsumen, serta biaya emisi karbon yang timbul dari aktivitas transportasi, pendinginan (*cold storage*), dan *food waste*.

***Objective* 2:** minimasi $z2$

$$z2 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} DRKUD_{tip}(\%) \cdot zkud_{tip} + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} DRDC_{tjp}(\%) \cdot ddc_{tjp}$$

Fungsi tujuan kedua difokuskan pada upaya meminimalkan total limbah makanan (*food waste*) yang terjadi baik sebelum maupun sesudah proses *quality control* (QC) produk susu, baik di pabrik produksi maupun di *distribution center* (DC).

***Objective* 3**: minimasi $z3$

$$z3 = \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P}\left[\left(ddc_{tjp} \cdot S_j + q_{tjkp} \cdot R_{jk}\right) \cdot ET_{tjkp}\right]$$

$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\left[\left(ir_{tip} + ip_{tp} + id_{tjp}\right) \cdot EI_{tijp}\right]$$

$$+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\left[\left(ekud_{tip} + edc_{tip}\right) \cdot ED_{tijp}\right]$$

Fungsi tujuan ketiga bertujuan untuk meminimalkan total emisi gas karbon yang dihasilkan dari aktivitas distribusi transportasi, proses pendinginan, serta limbah makanan (*food waste*) pada produk susu.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Subjek dan Objek Penelitian

Objek penelitian ini berfokus pada pembuatan model optimasi untuk maksimasi profit dan minimasi *waste* pada produk. Subjek penelitian adalah vaksin influenza yang berada di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia.

3.2 Jenis Data Penelitian

Berikut merupakan data yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian:

1. Data Primer

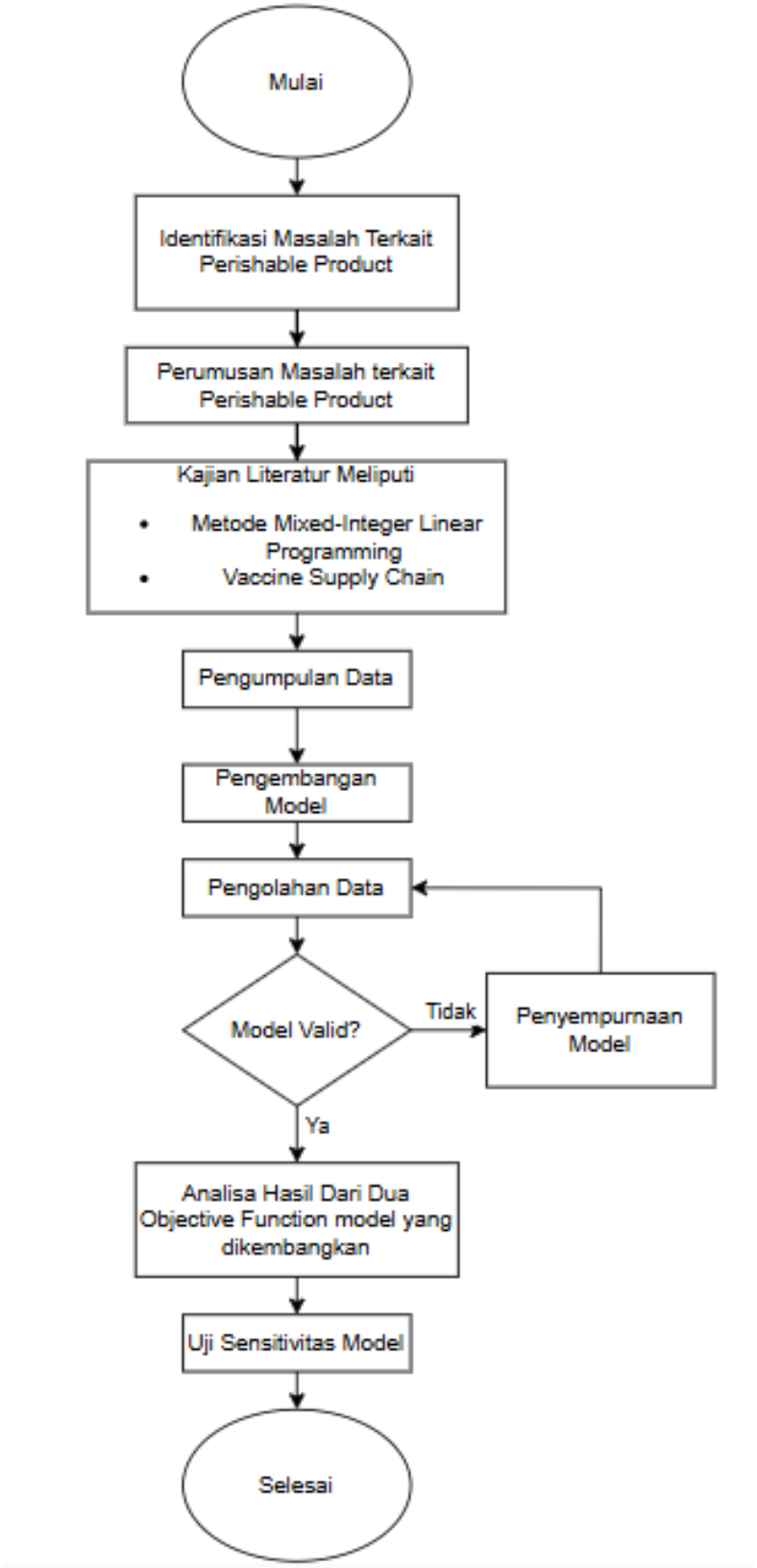
   Data yang diperoleh dari wawancara secara langsung dengan narasumber dari pihak RS UII. Dalam penelitian ini data yang diperlukan seperti data pemasok dan pembeli. Data yang diperlukan seperti *safety stock* vaksin di *cold storage,* alur rantai pasok vaksin influenza di rumah sakit, kapasitas maksimum *cold storage,* data konsumsi listrik *cold storage,* dan data-data lain yang hanya dapat diperoleh dari wawancara.

2. Data Sekunder

   Data yang diperoleh melalui laporan perusahaan, artikel, jurnal, atau data instansi pemerintah yang berkaitan dengan penelitian. Dalam penelitian ini data yang diperlukan seperti data permintaan, data pemesanan vaksin, data stok vaksin, data pembelian vaksin, dan data-data lain yang berkaitan dengan rantai pasok vaksin influenza.

3.3 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur pada penelitian ini:



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Berikut adalah penjelasannya langkah demi langkah:

1. Mulai
2. Identifikasi Masalah Terkait *Perishable Product*

   Tahap ini mengidentifikasi berbagai permasalahan yang terkait dengan produk yang mudah rusak, dalam konteks ini adalah vaksin influenza. Hal ini mencakup tantangan dalam distribusi, penyimpanan, dan potensi terjadinya *waste* akibat kadaluarsa atau kerusakan.
3. Perumusan Masalah Terkait *Perishable Product*

   Berdasarkan identifikasi masalah, tahap ini merumuskan masalah penelitian secara lebih spesifik. Rumusan masalah akan fokus pada bagaimana merancang sistem distribusi vaksin influenza yang optimal untuk mencapai profit maksimal dan *waste* minimal.
4. Kajian Literatur Meliputi

   Tahap ini melakukan penelusuran dan analisis terhadap literatur-literatur yang relevan dengan topik penelitian. Secara spesifik, kajian literatur mencakup:

   - *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP): Mempelajari bagaimana metode MILP telah digunakan dalam masalah optimasi, terutama dalam konteks rantai pasok dan distribusi.
   - *Vaccine Supply Chain*: Memahami karakteristik unik dari rantai pasok vaksin, termasuk persyaratan suhu, regulasi, dan tantangan distribusinya.
5. Pengumpulan Data

   Tahap ini melibatkan pengumpulan data yang dibutuhkan untuk membangun dan menguji model optimasi. Data yang dikumpulkan meliputi biaya produksi, biaya transportasi, permintaan vaksin di berbagai lokasi, kapasitas penyimpanan, tingkat kerusakan atau kadaluarsa vaksin, harga jual vaksin, dan lain-lain.
6. Pengembangan Model

   Berdasarkan perumusan masalah, kajian literatur, dan data yang terkumpul, model matematika MILP untuk desain dan optimasi distribusi vaksin influenza dikembangkan. Model ini akan memiliki dua fungsi tujuan (*multi-objective*): memaksimalkan profit dan meminimalkan *waste*, serta mempertimbangkan berbagai batasan dalam sistem distribusi.

7. Pengolahan Data

   Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah dan disiapkan agar dapat digunakan dalam model MILP yang telah dikembangkan. Tahap ini melibatkan transformasi data, dan analisis deskriptif awal.

8. Model Valid?

   Tahap ini merupakan tahap validasi model. Model yang telah dikembangkan diuji untuk memastikan bahwa model tersebut sesuai dengan realitas sistem yang dimodelkan dan memberikan hasil yang masuk akal.

9. Tidak

   Jika hasil validasi menunjukkan bahwa model belum valid atau perlu perbaikan, maka dilakukan Penyempurnaan Model (*Model Improvement*). Proses ini melibatkan identifikasi kekurangan model, melakukan penyesuaian pada formulasi matematika, batasan, atau parameter model, dan kembali ke tahap pengolahan data dan validasi.

10. Ya

    Jika model dinyatakan valid, maka penelitian dilanjutkan ke tahap berikutnya.

11. Analisa Hasil dari Dua *Objective Function* Model yang Dikembangkan

    Pada tahap ini, model MILP yang valid digunakan untuk menghasilkan solusi optimal yang mempertimbangkan kedua fungsi tujuan, yaitu maksimalisasi profit dan minimalisasi *waste*. Analisis dilakukan untuk memahami kedua tujuan tersebut dan mengidentifikasi strategi distribusi yang paling efektif.

12. Uji Sensitivitas Model

    Uji sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan pada parameter-parameter kunci dalam model seperti biaya transportasi, harga vaksin, tingkat *waste* mempengaruhi solusi optimal yang dihasilkan. Hal ini penting untuk memahami ketahanan solusi dan mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh.

13. Selesai

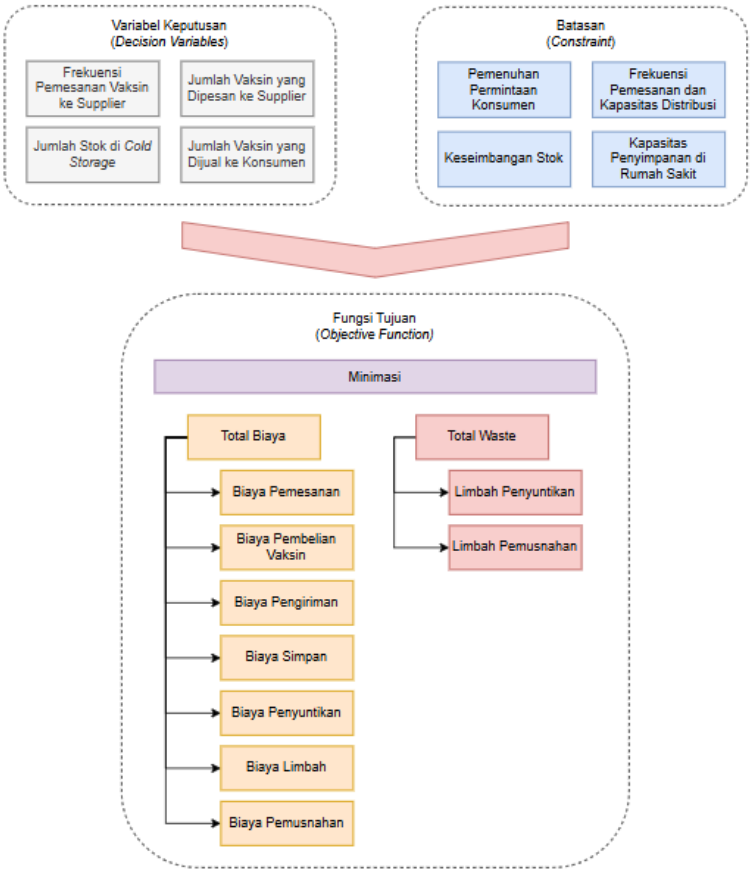
BAB IV
PENGEMBANGAN MODEL DAN PENGUMPULAN DATA

Bab IV Pengumpulan dan Pengolahan Data *atau* Pembangunan Sistem menguraikan proses pengolahan data dengan prosedur tertentu, termasuk gambar dan grafik yang diperoleh dari hasil penelitian. Apabila topik TA adalah pembangunan sistem, maka langkah detil pembangunan sistem diuraikan secara jelas dalam bab ini.

4.1 Pengembangan Model Matematis

Pada bagian ini diuraikan hasil dari pengumpulan data sesuai dengan tahapan yang telah diuraikan pada Bab III Metode Penelitian. Pada bagian ini juga diuraikan gambaran umum proses bisnis / sistem amatan.

Pengembangan model yang dilakukan mempertimbangkan dan memodifikasi model matematis milik Jeremi dan Vanany (2023) agar dapat menyesuaikan kondisi kegiatan rantai pasok vaksin influenza yang ada di RS UII.



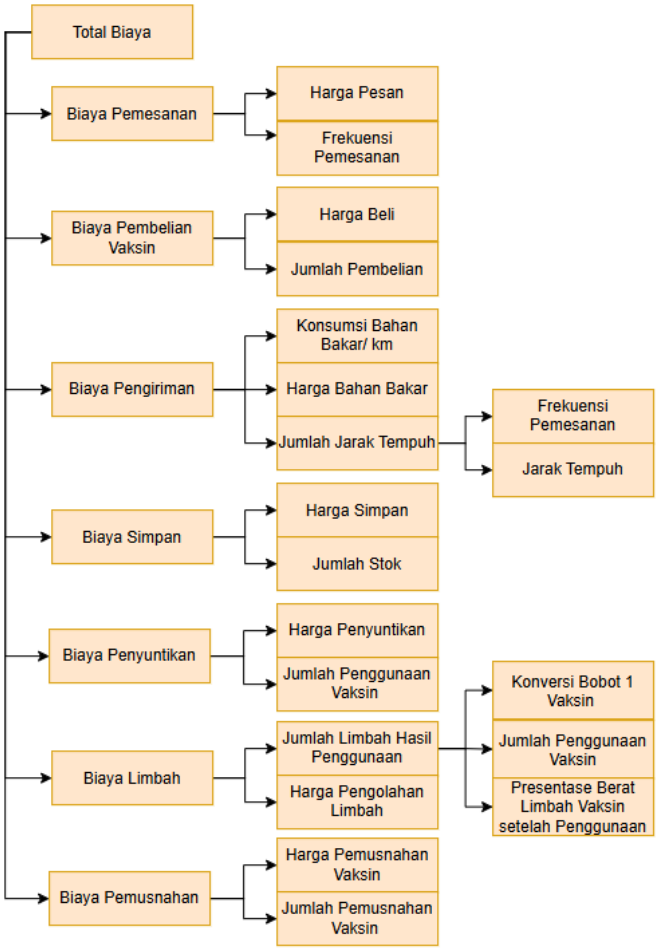
Gambar 4. 1 Komponen Keputusan, Batasan, dan Tujuan Model

modifikasi yang telah dilakukan, diperoleh fungsi model matematis baru. Berikut merupakan rincian lebih jelas terkait model matematis pada penelitian ini.

***Objective* 1**: Minimasi Z^1

$$Z^1 = \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HP_{pt} \cdot npes_{pt} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HB_{pt} \cdot nvas_{pt} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\left[KB.B.\left(npes_{pt}.X_u\right)\right] + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HS_{pt} \cdot is_{pt} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HO_{pt} \cdot nsv_{tp} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HL_{pt}.(\theta \cdot nsv_{pt} \cdot PL_{pt}(\%)) + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} HM_{pt} \cdot nvp_{pt}$$

Pada fungsi tujuan pertama telah dimodifikasi sesuai dengan kondisi yang terjadi pada studi kasus instansi kesehatan di RS UII dan fokus penelitian pada proses distribusi. Terdapat 6 (enam) kompoenen biaya yang harus diminimasi, yaitu biaya pemesanan vaksin oleh rumah sakit ke *supplier*, biaya pembelian vaksin, biaya pengiriman (transportasi) vaksin dari *supplier* ke rumah sakit, biaya penyimpanan vaksin di ruang pendingin rumah sakit (*cold storage*), biaya penggunaan vaksin, dan biaya pengolahan limbah vaksin. Berikut merupakan gambar komponen *total cost* pada Z^1:

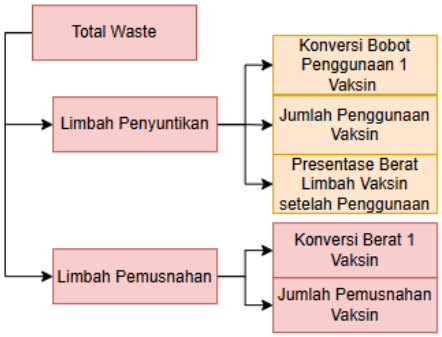


Gambar 4. 2 Komponen Penyusun *Total Cost* (Z1)

***Objective* 2**: Minimasi Z^2

$$Z^2 = \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} \theta \cdot nsv_{pt} \cdot PL_{pt}(\%) + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T} \theta \cdot nvp_{pt}$$

Pada fungsi tujuan kedua yang meminimumkan total limbah vaksin pada rantai pasok setelah proses penggunaan vaksin influenza Vaxigrip Tetra dan Fluatrix Tetra di RS UII. Komponen-komponen *total waste* digambarkan pada gambar berikut:



Gambar 4. 3 Komponen Penyusun *Total Waste* (Z2)

Dengan metode MILP yang memiliki tujuan-ganda (*multi-objective*) menyeimbangkan nilai antara 2 tujuan tersebut, digunakan metode *weighted sum* dalam model matematisnya. Berikut merupakan model matematisnya:

$$\boldsymbol{Minimize} = (\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{Z^1}) + (\boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{Z^2})$$

Pada fungsi matematis diatas, mengimplementasikan asumsi pembobotan dalam proses minimasi biaya pada model tujuan. Bobot-bobot ini ditentukan secara deterministik oleh praktisi di RS UII berdasarkan prioritas. Prioritas utama pada biaya ditentukan sebesar 60% (α = 0,6) dan fungsi tujuan limbah vaksin dengan bobot = 40% atau β = 0,4.

Fungsi Pembatas (*Constraint Function*)

$$nsv_{pt} = D_{pt}$$

$$\left(\frac{nvas_{pt}}{KT}\right) \leq npes_{pt}$$

$$kkmi_{pt} \leq is_{pt} \leq kkma_{pt}$$

Pada fungsi pembatas diatas menunjukan jumlah vaksin yang digunakan sama dengan permintaan vaksin jenis p pada periode tertentu. Frekuensi pengiriman truk pendingin (*cold truck*) tidak melebihi dengan kapasitas truk pendingin dengan satuan kilogram (kg). Kapasitas persediaan vaksin jenis p yang terdapat pada ruang pendingin khusus pada vaksin jenis p untuk periode t, harus kurang dari kapasitas tempat penyimpanan vaksin yang ada di rumah sakit. Kapasitas tempat penyimpanan (*cold storage*) vaksin tidak boleh kurang dari sama dengan 10 dan tidak boleh lebih dari sama dengan 4000.

$$\sum_{u=1}^{U} nvas_{pt} + is_{pt-1} = nsv_{pt} + is_{pt} + nvp_{pt}$$

Pada fungsi pembatas diatas berfungsi untuk menjaga keseimbangan stok. Jumlah stok vaksin jenis p yang tersisa dari periode sebelumnya ditambah jumlah vaksin yang diterima dari

semua *supplier* pada periode t harus sama dengan jumlah vaksin yang digunakan untuk vaksinasi, jumlah vaksin yang menjadi limbah pada periode tersebut, dan ditambah jumlah stok vaksin yang masih tersisa di akhir periode t.

Keterangan

Indeks:

p : Jenis produk vaksin, $p \in P$

t : Periode waktu, $t \in T$

Parameter:

D_{pt} : Tingkat permintaan penyuntikan untuk vaksin influenza jenis p di RS UII pada periode t (kg).

$kkmi_{pt}$: Kapasitas minimum pada ruang pendingin (*cold storage*) untuk vaksin influenza jenis p pada periode t (kotak).

$kkma_{pt}$: Kapasitas maksimum pada ruang pendingin (*cold storage*) untuk vaksin influenza jenis p pada periode t (kotak).

HP_{put} : Biaya pemesanan vaksin influenza jenis p oleh RS UII ke *supplier* u untuk pada periode t (Rp/pesan).

HB_{put} : Biaya pembelian untuk vaksin influenza jenis p oleh RS UII ke *supplier* u pada periode t (Rp/kotak).

HS_{pt} : Biaya penyimpanan dingin (*cold storage*) vaksin influenza jenis p di RS UII pada periode t (Rp/kotak).

HO_{pt} : Biaya penggunaan (penyuntikan) vaksin influenza jenis p di RS UII untuk pada periode t (Rp/penyuntikan).

HL_{pt} : Biaya pengolahan limbah vaksin influenza jenis p di RS UII pada periode t (Rp/kg).

HM_{pt} : Biaya pemusnahan vaksin influenza jenis p di RS UII pada periode t (Rp/kotak).

PL_{pt} : Tingkat timbulan limbah di RS UII untuk vaksin influenza jenis p periode t (%).

θ : Konversi 1 kotak vaksin (kg).

KT : Kapasitas transportasi kendaraan (kotak).

X_u : Jarak dari supplier u ke RS UII (km).

B : Biaya bahan bakar kendaraan (Rp/liter).

KB : Konsumsi bahan bakar kendaraan (liter/km).

Variabel keputusan

$npes_{put}$: Frekuensi pemesanan vaksin influenza jenis p dari *supplier* u ke RS UII pada periode t (kali).

$nvas_{put}$: Jumlah vaksin influenza jenis p yang dibeli oleh RS UII ke *supplier* u pada periode t (kotak).

is_{pt} : Jumlah stok vaksin influenza jenis p di RS UII pada periode t (kotak).

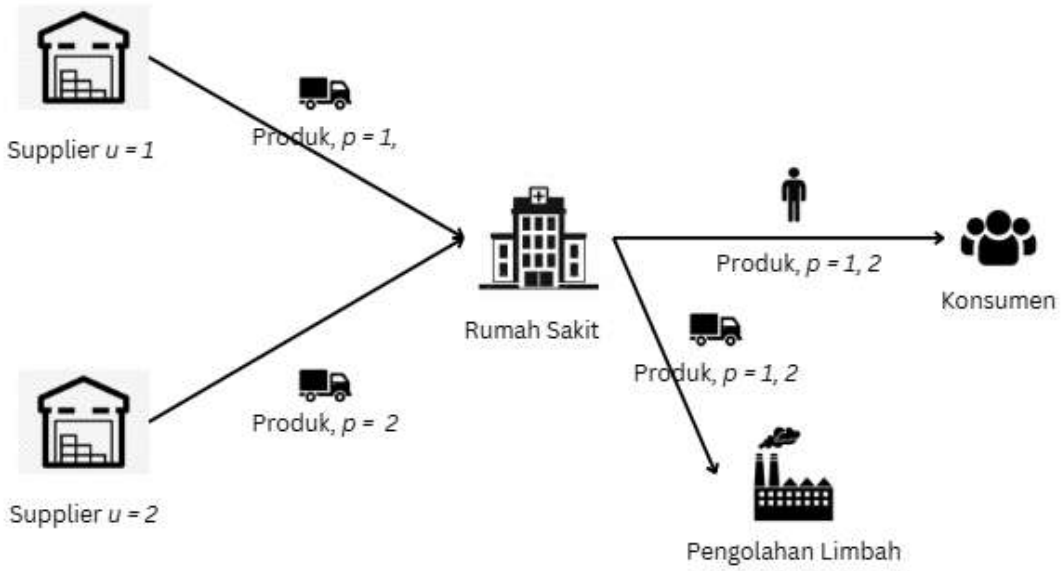
nsv_{pt} : Jumlah vaksin influenza jenis p yang digunakan oleh RS UII pada periode t (kotak).

nvp_{pt} : Jumlah vaksin influenza jenis p yang dimusnahkan oleh RS UII pada periode t (kotak).

4.2 Pengumpulan Data

Pada bagian ini diuraikan hasil dari pengolahan data sesuai dengan tahapan yang telah diuraikan pada Bab III Metode Penelitian. Gambar atau tabel yang dipaparkan diberikan penjelasan. Pada bagian ini belum dilakukan analisa terhadap hasil dari pengolahan data.

Penelitian ini dilakukan pada kegiatan rantai pasok vaksin influenza di Rumah Sakit yang berletak di Bantul, Yogyakarta. Kegiatan yang dilakukan antara lain, kegiatan distribusi dari pemasok (*supplier*) ke konsumen dan kegiatan penyimpanan pada gudang untuk mempertahankan suhu dan kualitas.



Gambar 4. 4 *Supply Chain* Vaksin Influenza di RS UII

Dalam kegiatan pembelian vaksin dari supplier hingga pendistribusian ke konsumen dilakukan kurang dari 6 bulan. Vaksin influenza Fluatrix Tetra dan Vaxigrip Tetra memiliki masa efektif maksimal 6 bulan dalam penyimpanan dingin. Produk vaksin ini membutuhkan mesin pendingin/ kulkas (*cold storage*) untuk menjaga suhu agar efektifitas produk tetap dalam keadaan efektif dengan ketentuan suhu 2°C - 8°C. Kapasitas maksimum yang dapat ditampung dari mesin pendingin/kulkas sebanyak 4000 dosis. Jarak antara rumah sakit dengan *supplier* p=1 dan p=2 adalah 16 km dan 20 km. Dalam penelitian ini, vaksin yang dikirim dari supplier ke rumah sakit perlu menerapkan standar operasional produk (SOP) yang diberikan oleh rumah sakit sesuai MoU (*Memorandum of Understanding*), jika tidak menerapkan SOP maka barang yang dikirim pada hari itu akan ditolak seluruhnya dan dikembalikan ke *supplier*.

Tabel 4. 1 Data Studi Kasus pada Rumah Sakit

Parameter	Nilai	Satuan
HP_{pt}	30000	Rp/pesan
HB_{pt}	P1 = 224,445 dan P2 = 223,400	Rp/kotak
HS_{pt}	100	Rp/kotak
HO_{pt}	2,400	Rp/penyuntikan
HL_{pt}	4300	Rp/kg
HM_{pt}	300	Rp/kotak
PL_{pt}	93	Persen
θ	0,0121	Kg
KT	P1 = 720 dan P2 = 480	Km
X_u	P = 16 dan P2 = 20	Km
B	P1 = 6,800 dan P2 = 10,000	Rp/liter
KB	P1 = 0,143 dan P2 = 0,167	Liter/km
$kkmi_{pt}$	10	Kotak
$kkma_{pt}$	100	Kotak

Tabel 4. 2 Data Studi Kasus untuk Permintaan Konsumen

Periode	Vaxigrip	Fluatrix	Satuan
Januari 2024	508	509	Kotak

Periode	Vaxigrip	Fluatrix	Satuan
Februari 2024	578	479	Kotak
Maret 2024	368	379	Kotak
April 2024	563	407	Kotak
Mei 2024	544	479	Kotak
Juni 2024	470	303	Kotak
Juli 2024	470	350	Kotak
Agustus 2024	672	495	Kotak
September 2024	428	380	Kotak
Oktober 2024	560	290	Kotak
November 2024	650	382	Kotak
Desember 2024	720	414	Kotak
Januari 2025	587	383	Kotak
Februari 2025	907	87	Kotak
Maret 2025	842	74	Kotak
April 2025	541	263	Kotak

Tabel 4. 1 menyajikan data yang berhubungan dengan komponen-komponen total biaya yang dikeluarkan dalam rantai pasok vaksin influenza di rumah sakit. Data yang diperoleh dari hasil wawancara antara lain, biaya pemesanan, biaya pembelian, biaya penyimpanan, biaya penyuntikan, data terkait limbah, data jarak dari supplier ke rumah sakit, data kapasitas maksimum distribusi dari *supplier*, data jenis kendaraan, dan data kapasitas maksimum serta minimum dari *cold storage* di rumah sakit. Pada tabel 4.2 diperlihatkan permintaan dari konsumen kepada rumah sakit terkait produk vaksin influenza. Data permintaan ini memperlihatkan permintaan tiap periode pada vaksin influenza, Vaxigrip Tetra dan Fluatrix Tetra

4.3 Validasi dan Hasil

Proses validasi model yang dilakukan dengan *software* Excel saat pengambilan solusi, untuk melakukan pemeriksaan model sudah sesuai dengan keadaan nyata yang ada di rumah sakit. Tahap selanjutnya dilakukan pemeriksaan pada batasan (*constraint*) yang telah dibuat apakah sudah sesuai dengan model matematis yang dikembangkan. Pemeriksaan batasan (*constraint*)

dilakukan dengan menjalankan setiap kendalanya. Validasi model dilakukan menggunakan *t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances*. Hipotesis yang digunakan menguji model yaitu:

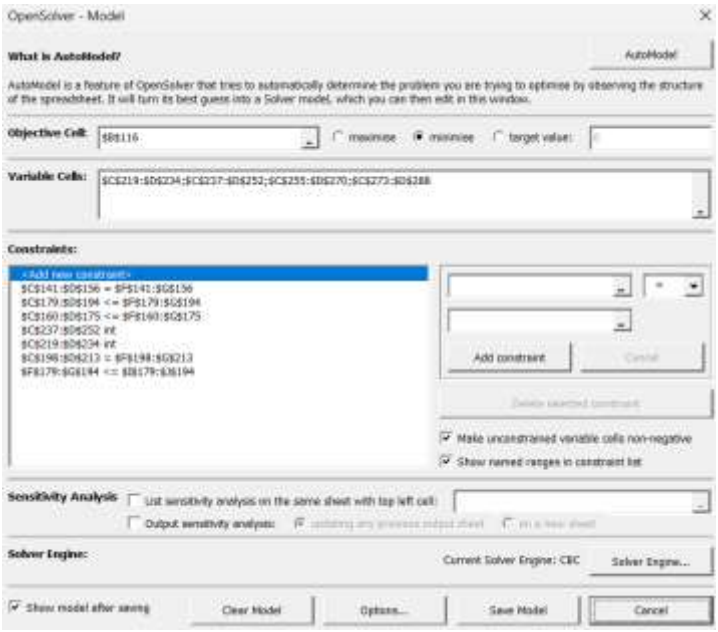
H_0 : Tidak ada perbedaan signifikan antara Z1 Real dan Z1 Solver (model valid)

H_1 **:** Ada perbedaan signifikan antara Z1 Real dan Z1 Solver (model tidak valid)

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Z1 Real	*Z1 Solver*
Mean	3395760423	3405046932
Variance	2,16154E+17	2,20969E+17
Observations	9	9
Pooled Variance	2,18561E+17	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	16	
t Stat	-0,042137829	
P(T<=t) one-tail	0,483455097	
t Critical one-tail	1,745883676	
P(T<=t) two-tail	0,966910193	
t Critical two-tail	2,119905299	

Gambar 4. 5 Hasil Validasi dengan t-*Test*

Hasil perhitungan uji t menunjukkan nilai t-statistik = -0,042 dengan p-value = 0,967. Karena nilai p jauh lebih besar dari nilai signifikansi yang umum digunakan 0,05, maka keputusan pengujian adalah H_0 diterima**.** Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara Z1 *Real* dan Z1 Solver. Hal ini berarti hasil perhitungan model (solver) sangat konsisten dengan data real, sehingga model dapat dinyatakan valid dan layak digunakan untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, Ketika dilakukan *running* model dengan solver Excel tidak menunjukan error atau tidak dapat menampilkan hasil optimal, maka dapat dipastikan bahwa model dan *constraint* sudah benar. Pada Gambar 4. 6 dan Gambar 4. 7 dibawah menunjukan bahwa model dan *constraint* dapat dimasukan dan memperoleh hasil optimal.



Gambar 4. 6 Software Solver Excel

Result - Optimal solution found (within gap tolerance)					
Objective value:	1912183.19999838				
Lower bound:	1911774.360				
Gap:	0.00				
Enumerated nodes:	59				
Total iterations:	1352				
Time (CPU seconds):	0.29				
Time (Wallclock seconds):	0.29				
Total time (CPU seconds):	0.30	(Wallclock seconds):	0.30		

Gambar 4. 7 Temuan Hasil Optimal

Setelah dilakukan pengembangan model menggunakan software Excel didapatkan hasil optimal. Pada Tabel 4. 3 menunjukan hasil dari 2 fungsi tujuan (*objective function*) yaitu total biaya dan total *waste*. Pada fungsi tujuan minimasi biaya terdapat pengurangan biaya 14,44%, sebelum dilakukan *running software* solver excel sebesar Rp. 3,976,351,714 menjadi Rp. 3,401,841,976. Komponen biaya yang menyebabkan penurunan yaitu pada biaya pemesanan sebesar 25%, biaya pembelian sebesar 14,4%, biaya pengiriman sebesar 27,24%, dan biaya simpan sebesar 80,13%. Pada fungsi tujuan minimasi *waste*, terjadi pengurangan *waste* sebesar 0,30% dengan nilai 170,23 Kg menjadi 169,72 Kg.

Tabel 4. 3 Hasil Sebelum dan Sesudah *Running* Solver

No	Jenis Biaya	Sebelum	Sesudah	Keterangan
1	Biaya Pemesanan	Rp. 1,680,000	Rp. 1,260,000	Turun 25%
2	Biaya Pembelian	Rp. 3,928,195,270	Rp. 3,362,674,580	Turun 14,4%
3	Biaya Pengiriman	Rp. 1,278,258	Rp. 930,010	Turun 27,24%
4	Biaya Simpan	Rp. 259,800	Rp. 51,600	Turun 80,13%
5	Biaya Penyuntikan	Rp. 36.196.000	Rp. 36.196.000	Tetap
6	Biaya Limbah	Rp. 729,786	Rp. 729,786	Tetap
7	Biaya Pemusnahan	Rp. 12,600	Rp. 0	Turun 100%
Total Biaya		**Rp. 3,976,351,714**	**Rp. 3,401,841,976**	**Turun 14,44%**
1	Waste Penyuntikan	169,72 Kg	169,72 Kg	Tetap
7	Waste Pemusnahan	0,51 Kg	0 Kg	Turun 100%
Total Waste		**170,23 Kg**	**169,72 Kg**	**Turun 0,30%**

Tabel 4. 4 Presentase biaya yang Diperoleh *Running* Solver

No	Jenis Biaya	Nilai	%
1	Biaya Pemesanan	Rp. 1,260,000	0,037%
2	Biaya Pembelian	Rp. 3,362,674,580	98,849%
3	Biaya Pengiriman	Rp. 930,010	0,0027%
4	Biaya Simpan	Rp. 51,600	0,002%
5	Biaya Penyuntikan	Rp. 36.196.000	1,064%
6	Biaya Limbah	Rp. 729,786	0,021%
7	Biaya Pemusnahan	Rp. 0	0%
Total		Rp. 3,973,394,951	100%

Berdasarkan Tabel 4. 4 diketahui dari total biaya Rp. 3,362,674,580, sebagian besar digunakan untuk pembelian vaksin (98,849%). Biaya terbesar kedua adalah biaya penyuntikan (1,064%), kemudian biaya pemesanan, biaya pengiriman, biaya penyimpanan, dan biaya limbah kurang dari 1%. Biaya yang terkecil yaitu biaya pemusnahan yang menyumbang 0% dari keseluruhan biaya.

Hasil optimal variabel keputusan dengan *running software* solver excel untuk frekuensi pemesanan vaksin ke *supplier*, jumlah vaksin yang dibeli ke *supplier*, jumlah stok yang

disimpan di penyimpanan dingin (*cold storage*), jumlah vaksin yang digunakan, dan jumlah vaksin yang dimusnahkan ditunjukan pada tabel

Tabel 4. 5 Hasil Optimal untuk Frekuensi Pemesanan

Periode	Sebelum		Sesudah	
	Fluatrix	Vaxigrip	Fluatrix	Vaxigrip
Jan-24	2	2	1	2
Feb-24	2	2	1	2
Mar-24	1	2	1	1
Apr-24	0	1	1	1
May-24	3	0	1	2
Jun-24	1	3	1	1
Jul-24	1	2	1	1
Aug-24	3	2	1	2
Sep-24	2	1	1	1
Oct-24	2	2	1	2
Nov-24	1	3	1	2
Dec-24	2	3	1	2
Jan-25	1	1	1	2
Feb-25	0	4	1	2
Mar-25	1	2	1	2
Apr-25	3	1	1	1
Total	25	31	16	26

Pada Tabel 4. 5 menunjukan hasil optimal frekuensi dalam pemesanan vaksin ke *supplier* dengan total jumlah 42 kali pemesanan. Pemesanan kepada supplier vaksin Fluatrix Tetra sebanyak 16 kali dengan pemesan setiap periode sebanyak 1 kali. Sedangkan vaksin Vaxigrip Tetra sebanyak 16 kali dengan pemesanan tiap periodenya 1-2 kali. Frekuensi pemesanan sebelum dilakukan solver Excel memiliki total pemesanan untuk kedua jenis vaksin sebesar 56 kali pemesanan, vaksin jenis Fluatrix sebanyak 25 kali dan vaksin jenis Vaxigrip sebanyak 31 kali.

Tabel 4. 6 Hasil Optimal Jumlah Vaksin yang Dibeli

Periode	Sebelum		Sesudah	
	Fluatrix	Vaxigrip	Fluatrix	Vaxigrip
Jan-24	609	608	519	518
Feb-24	579	678	479	578
Mar-24	429	476	379	451
Apr-24	407	623	407	480
May-24	629	544	479	544
Jun-24	353	620	303	470
Jul-24	400	570	350	470
Aug-24	555	772	495	672
Sep-24	420	478	380	480
Oct-24	390	660	290	580
Nov-24	432	800	382	650
Dec-24	514	870	414	720
Jan-25	413	637	383	587
Feb-25	87	1087	87	907
Mar-25	124	992	74	903
Apr-25	333	591	263	480
Total	6674	11006	5684	9418

Pada Tabel 4. 6 menunjukan hasil optimal kuantitas yang dibeli dari *supplier* kedua jenis vaksin dengan total vaksin yang dibeli sebanyak 15102 dengan jumlah pembelian terbanyak untuk jenis Vaxigrip sebanyak 9418 kotak. Sedangkan jenis Fluatrix sebanyak 5684 kotak. Total jumlah kedua vaksin yang dibeli sebelum solver Excel yaitu 17680 kotak, dengan jumlah vaksin jenis Fluatrix sebanyak 6674 dan vaksin jenis Vaxigrip sebanyak 11006 kotak.

Tabel 4. 7 Hasil Optimal Jumlah Vaksin pada *Cold Storage*

Periode	Sebelum		Sesudah	
	Fluatrix	Vaxigrip	Fluatrix	Vaxigrip
Jan-24	100	100	10	10
Feb-24	100	100	10	10
Mar-24	50	108	10	93

Periode	Sebelum		Sesudah	
	Fluatrix	Vaxigrip	Fluatrix	Vaxigrip
Apr-24	0	60	10	10
May-24	150	0	10	10
Jun-24	50	150	10	10
Jul-24	50	100	10	10
Aug-24	60	100	10	10
Sep-24	40	50	10	62
Oct-24	100	100	10	10
Nov-24	50	150	10	10
Dec-24	100	150	10	10
Jan-25	30	50	10	10
Feb-25	0	180	10	10
Mar-25	50	150	10	71
Apr-25	70	50	10	10
Total	1000	1598	160	356

Pada Tabel 4. 7 menunjukan berapa banyak vaksin yang disimpan tiap periodenya. Vaksin influenza dengan jenis Fluatrix memiliki jumlah yang sama dari awal hingga akhir periode yaitu 10, sesuai dengan stok minimum yang harus ada di *cold storage*. Pada vaksin influenza dengan jenis Vaxigrip memiliki jumlah stok yang variatif dengan jumlah stok paling banyak pada periode Maret 2024 sebesar 93 kotak. Jumlah total kedua vaksin tersebut sebelum solver Excel yaitu 2598 kotak, sedangkan setelah hasil optimal sebanyak 516 kotak. Selisih sebelum dan setelah dilakukan solver Excel memiliki hasil yang sangat signifikan yaitu sebesar 1082.

Tabel 4. 8 Hasil Optimal pada Vaksin yang Dimusnahkan

Periode	Sebelum		Sesudah	
	Fluatrix	Vaxigrip	Fluatrix	Vaxigrip
Jan-24	0	0	0	0
Feb-24	0	0	0	0
Mar-24	0	1	0	0
Apr-24	1	4	0	0
May-24	6	0	0	0
Jun-24	0	1	0	0
Jul-24	0	3	0	0
Aug-24	0	1	0	0
Sep-24	2	2	0	0
Oct-24	0	0	0	0
Nov-24	0	2	0	0
Dec-24	0	0	0	0
Jan-25	3	5	0	0
Feb-25	0	8	0	0
Mar-25	0	2	0	0
Apr-25	1	0	0	0
Total	13	28	0	0

Pada Tabel 4. 8 dapat dilihat bahwa pada keseluruhan periode mulai dari Januari 2024 hingga April 2025 dan kedua jenis vaksin influenza, Fluatrix Tetra serta Vaxigrip Tetra berjumlah 0 kotak. Hal ini disebabkan, solver excel melakukan minimasi untuk Z1 dan Z2 tanpa melanggar *constraint* yang telah dibuat hingga titik dimana mendapatkan nilai paling rendah. Sebelum dilakukan solver Excel, jumlah kedua jenis vaksin bervariasi dengan total jenis vaksin Fluatrix sebanyak 13 kotak dan vaksin Vaxigrip sebanyak 28 kotak.

BAB V
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Sensitivitas Model pada Demand

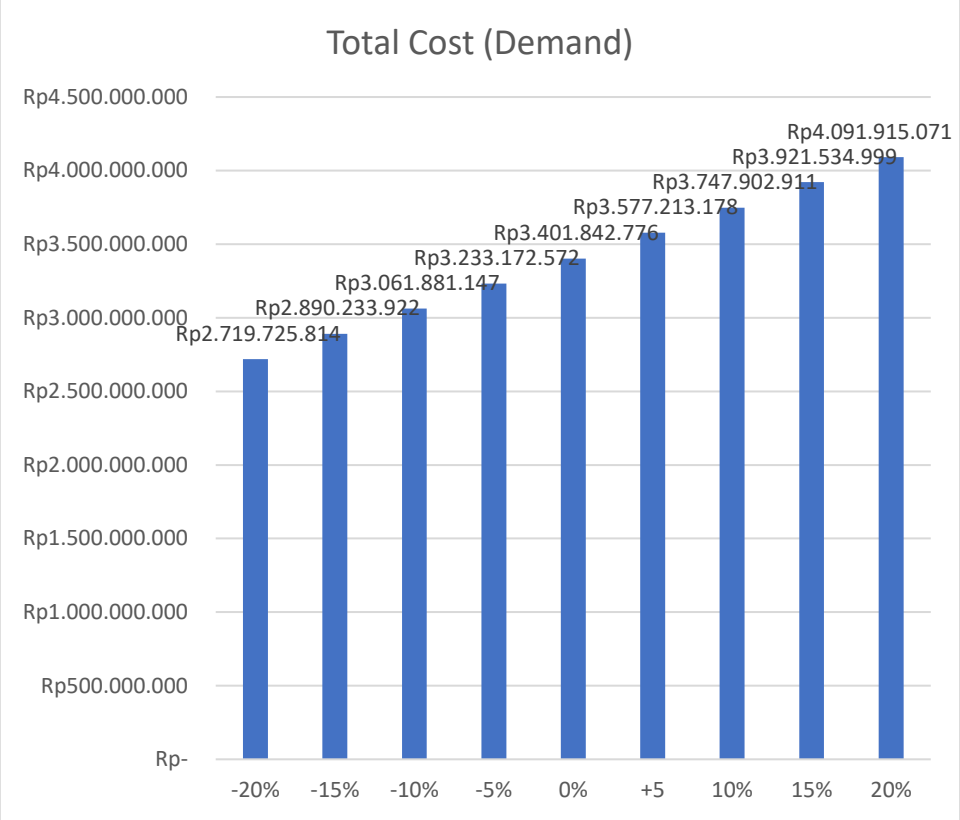
Analisis sensitivitas terhadap variabel demand dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan permintaan terhadap kinerja model yang digunakan dalam penelitian ini. Permintaan bersifat fluktuatif dan sering tidak dapat diprediksi secara pasti, maka diperlukan pengujian untuk menilai sejauh mana variasi tersebut memengaruhi hasil optimasi, khususnya terkait biaya total dan total *waste*. Melalui analisis ini, diperoleh pemahaman mengenai tingkat stabilitas serta keandalan model dalam menghadapi ketidakpastian, sehingga dapat mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih rasional dan berbasis data. Berikut merupakan hasil uji sensitivitas pada *demand*:

Tabel 5. 1 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Demand

Demand	Uji Sensitivitas			
	Total *Cost* (Rp)	Presentase (%)	Total *Waste* (Kg)	Presentase (%)
-20%	Rp 2.719.725.814	-20,1%	135,92	-19,9%
-15%	Rp 2.890.233.922	-15%	144,39	-14,9%
-10%	Rp 3.061.881.147	-10%	152,89	-9,9%
-5%	Rp 3.233.172.572	-5%	161,38	-4,9%
0%	**Rp 3.401.842.776**	0%	**169,72**	0,0%
+5	Rp 3.577.213.178	5,2%	178,38	5,1%
10%	Rp 3.747.902.911	10,2%	186,81	10,1%
15%	Rp 3.921.534.999	15,3%	195,37	15,1%
20%	Rp 4.091.915.071	20,3%	203,77	20,1%

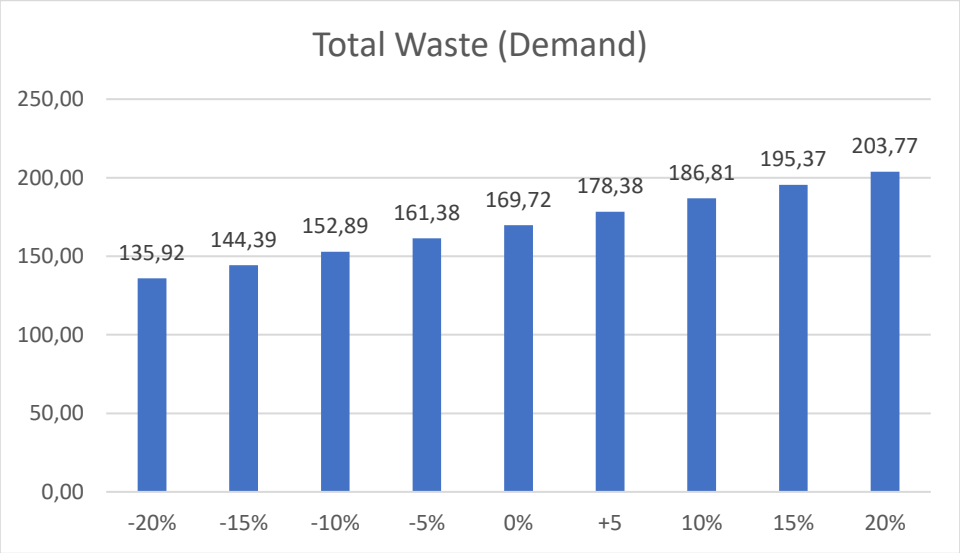
Berdasarkan hasil uji sensitivitas terhadap demand, dapat dilihat bahwa perubahan permintaan berpengaruh secara langsung terhadap *total cost* dan *total waste*. Pada saat demand mengalami penurunan sebesar 20%, *total cost* tercatat sebesar Rp 2.719.725.814 dengan *total* waste 135,92 kg. Pada kondisi normal (0%), *total cost* mencapai Rp 3.401.842.776 dan *total waste* sebesar 169,72 kg. Sementara itu, peningkatan demand hingga 20% menyebabkan *total cost* naik menjadi Rp 4.091.915.071 dengan *total waste* sebesar 203,77 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan *demand* cenderung meningkatkan *total cost* dan jumlah *waste*

secara proporsional, sedangkan penurunan demand menurunkan keduanya. Maka dari itu, meskipun peningkatan demand dapat mendorong pertumbuhan aktivitas produksi, perusahaan perlu memperhatikan keseimbangan biaya dan pengelolaan waste agar efisiensi operasional tetap terjaga.



Gambar 5. 1 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas *Demand*

Gambar 5. 1 menunjukkan grafik hasil uji sensitivitas *total cost* terhadap *demand*. Dari grafik terlihat bahwa *total cost* mengalami kenaikan secara konsisten seiring dengan meningkatnya demand. Pada saat *demand* menurun hingga 20%, *total cost* berada di Rp 2.719.725.814, sedangkan pada kondisi normal (0%) *total cost* tercatat sekitar Rp 3.401.842.776. Selanjutnya, ketika demand meningkat hingga 20%, *total cost* naik signifikan mencapai lebih dari Rp 4 miliar. Pola garis yang cenderung linier ini menunjukkan bahwa *total cost* sangat dipengaruhi oleh perubahan *demand*, di mana semakin tinggi permintaan, maka biaya yang dikeluarkan juga semakin besar.



Gambar 5. 2 Grafik Total Waste pada Uji Sensitivitas *Demand*

Gambar 5. 2 memperlihatkan grafik hasil uji sensitivitas total waste terhadap *demand*. Dari grafik terlihat bahwa total waste meningkat seiring dengan bertambahnya *demand*. Pada kondisi *demand* menurun sebesar 20%, *total waste* berada pada 135,92 kg. Pada kondisi normal (0%), jumlah *waste* tercatat 169,72 kg, sedangkan ketika *demand* meningkat hingga 20%, *total waste* bertambah menjadi 203,77 kg. Pola garis yang cenderung linier menunjukkan bahwa kenaikan *demand* berbanding lurus dengan peningkatan jumlah waste. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun peningkatan permintaan dapat mendorong aktivitas produksi, konsekuensinya adalah timbulnya waste yang semakin besar.

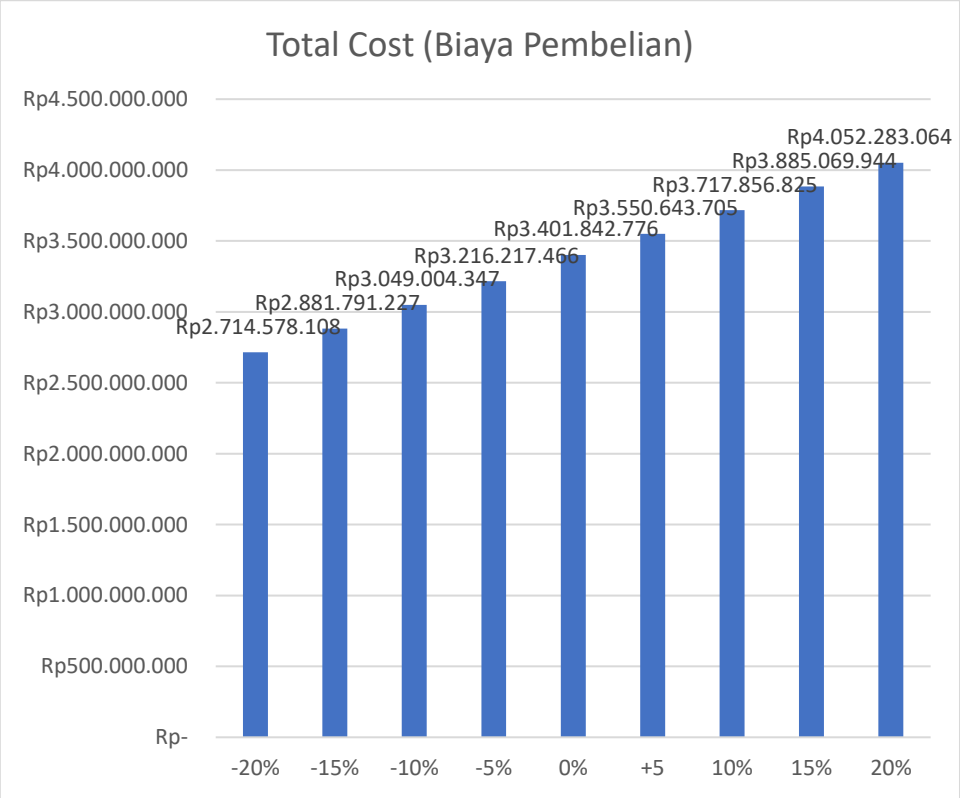
5.2 Analisis Sensitivitas Model pada Biaya Pembelian

Pada sub bab ini dilakukan analisis sensitivitas untuk melihat pengaruh perubahan biaya pembelian terhadap hasil model. Analisis ini penting karena biaya pembelian merupakan komponen utama dalam struktur biaya, sehingga setiap perubahan akan berdampak langsung pada total biaya dan hasil keputusan yang dihasilkan model. Berikut merupakan hasil uji sensitivitas pada biaya pembelian

Tabel 5. 2 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Biaya Pembelian

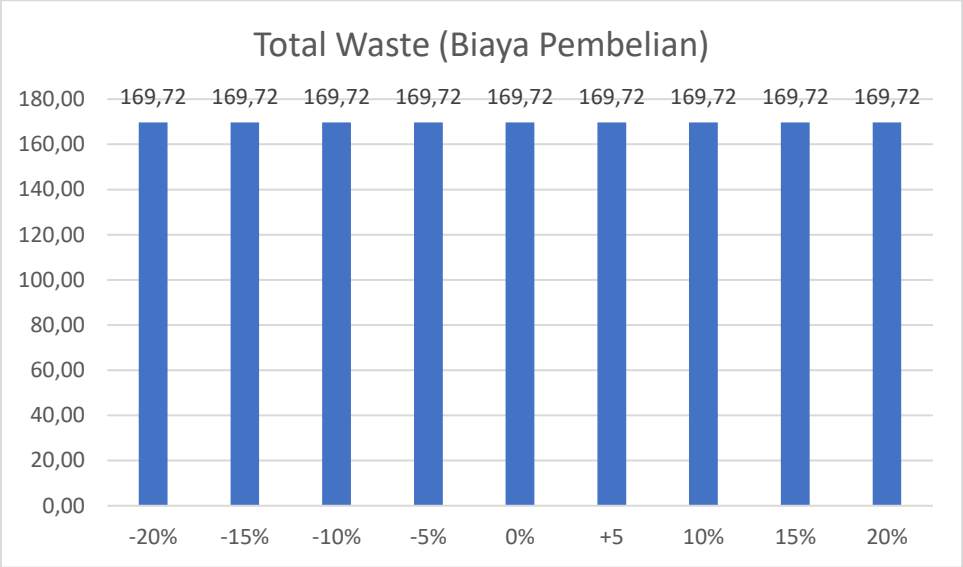
Biaya Pembelian	Uji Sensitivitas			
	Total Cost (Rp)	Presentase (%)	*Total Waste* (Kg)	Presentase (%)
-20%	Rp2.714.578.108	-20,2%	169,72	0%
-15%	Rp2.881.791.227	-15,3%	169,72	0%
-10%	Rp3.049.004.347	-10,4%	169,72	0%
-5%	Rp3.216.217.466	-5,5%	169,72	0%
0%	**Rp3.401.842.776**	**0,0%**	**169,72**	**0%**
+5	Rp3.550.643.705	4,4%	169,72	0%
10%	Rp3.717.856.825	9,3%	169,72	0%
15%	Rp3.885.069.944	14,2%	169,72	0%
20%	Rp4.052.283.064	19,1%	169,72	0%

Berdasarkan hasil uji sensitivitas terhadap biaya pembelian, terlihat bahwa perubahan biaya pembelian berpengaruh langsung terhadap *total cost*, namun tidak memberikan dampak terhadap *total waste*. Ketika biaya pembelian diturunkan sebesar 20%, *total cost* menurun hingga Rp 2.714.578.108 atau sekitar -20,2% dari kondisi normal. Sebaliknya, ketika biaya pembelian dinaikkan hingga 20%, *total cost* meningkat menjadi Rp 4.052.283.064 atau sekitar 19,1% lebih tinggi dibanding kondisi normal. Sementara itu, *total waste* tetap konstan pada angka 169,72 kg di setiap skenario perubahan biaya pembelian. Hal ini menunjukkan bahwa variabel biaya pembelian hanya memengaruhi aspek finansial berupa *total cost*, tetapi tidak berpengaruh terhadap volume *waste* yang dihasilkan dalam sistem.



Gambar 5. 3 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Biaya Pembelian

Grafik pada Gambar 5. 3 memperlihatkan hubungan antara biaya pembelian dan *total cost***.** Terlihat bahwa *total cost* meningkat secara linier seiring dengan kenaikan biaya pembelian. Pada saat biaya pembelian diturunkan sebesar 20%, *total cost* berada pada Rp. 2,714,578,108, sementara pada kondisi normal (0%) *total cost* tercatat Rp 3,401,942,776. Ketika biaya pembelian meningkat hingga 20%, *total cost* naik menjadi lebih dari Rp 4,052,283,064 miliar. Hal ini menunjukkan bahwa *total cost* sangat sensitif terhadap perubahan biaya pembelian, di mana setiap peningkatan harga input akan langsung meningkatkan biaya total yang harus dikeluarkan.



Gambar 5. 4 Grafik *Total Waste* pada Uji Sensitivitas Biaya Pembelian

Grafik pada Gambar 5. 4 diatas menggambarkan hubungan antara biaya pembelian dan *total waste*. Berbeda dengan *total cost*, jumlah *waste* terlihat konstan pada angka sekitar 169,72 kg meskipun terjadi perubahan biaya pembelian dari -20% hingga +20%. Pola garis datar pada grafik menunjukkan bahwa variabel biaya pembelian tidak memiliki pengaruh terhadap jumlah *waste* yang dihasilkan. Dengan demikian, perubahan harga bahan baku hanya berdampak pada aspek finansial berupa *total cost*, namun tidak berimplikasi pada volume *waste* dalam sistem produksi.

5.3 Analisis Sensitivitas Model pada Biaya Penyuntikan

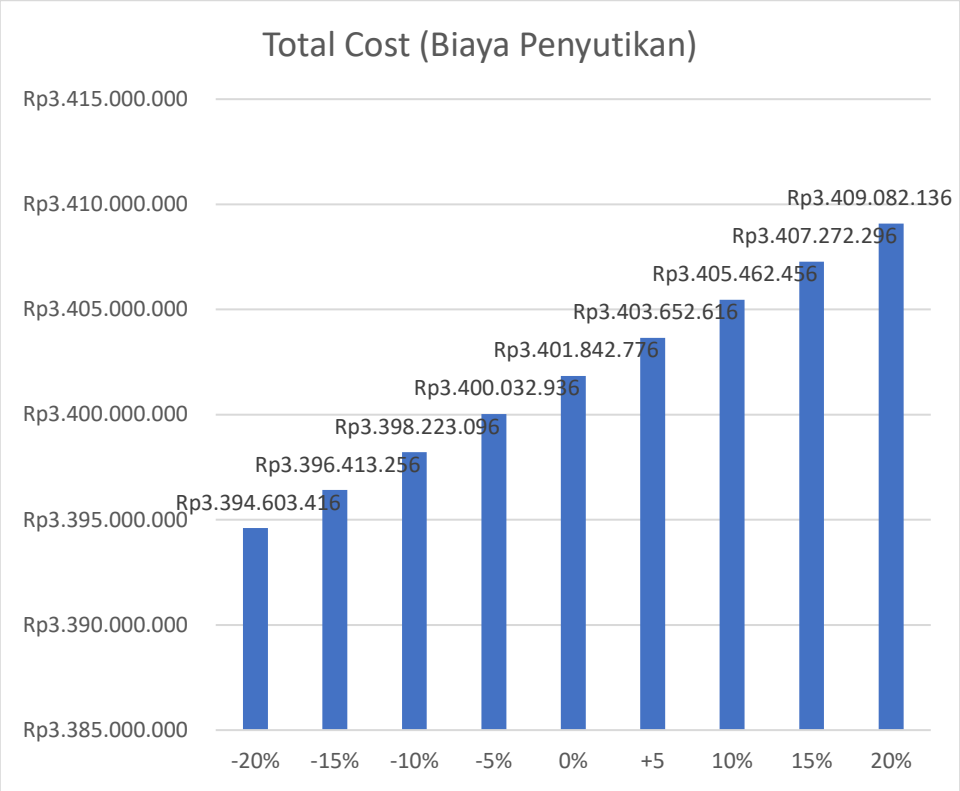
Pada sub bab ini dilakukan analisis sensitivitas untuk mengetahui pengaruh perubahan biaya penyuntikan terhadap hasil model. Analisis ini penting karena biaya penyuntikan merupakan salah satu komponen biaya operasional yang dapat memengaruhi *total cost* secara keseluruhan. Berikut merupakan hasil uji sensitivitas pada biaya penyuntikan:

Tabel 5. 3 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Biaya Penyuntikan

Biaya Penyuntikan	Uji Sensitivitas			
	Total Cost (Rp)	Presentase (%)	*Total Waste* (Kg)	Presentase (%)
-20%	Rp3.394.603.416	-0,2%	169,72	0%
-15%	Rp3.396.413.256	-0,2%	169,72	0%

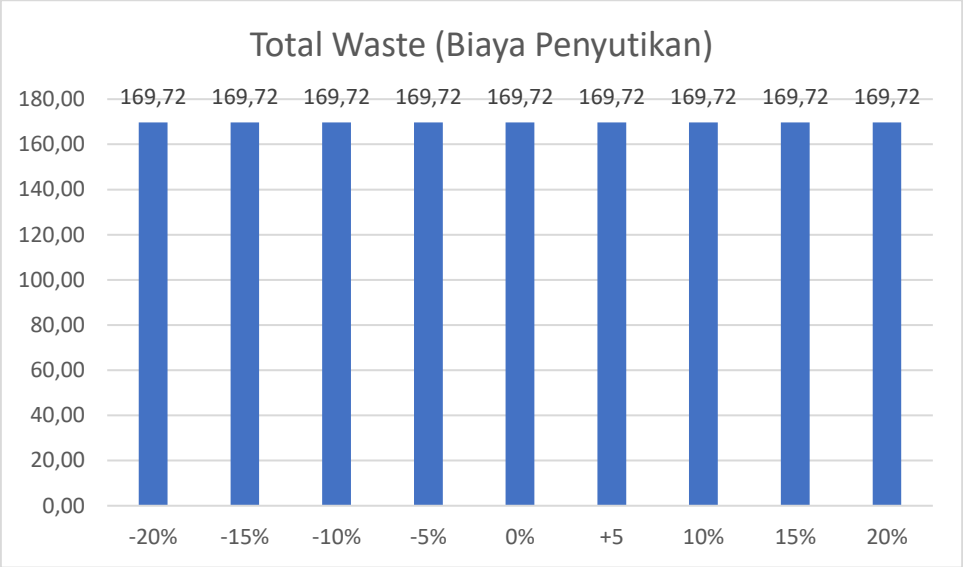
Biaya Penyuntikan	Uji Sensitivitas			
	Total Cost (Rp)	Presentase (%)	*Total Waste* (Kg)	Presentase (%)
-10%	Rp3.398.223.096	-0,1%	169,72	0%
-5%	Rp3.400.032.936	-0,1%	169,72	0%
0%	**Rp3.401.842.776**	**0,0%**	**169,72**	**0%**
+5	Rp3.403.652.616	0,1%	169,72	0%
10%	Rp3.405.462.456	0,1%	169,72	0%
15%	Rp3.407.272.296	0,2%	169,72	0%
20%	Rp3.409.082.136	0,2%	169,72	0%

Berdasarkan gambar yang disajikan, uji sensitivitas pada biaya penyuntikan menunjukkan bahwa perubahan persentase biaya tersebut, baik penurunan maupun kenaikan, memiliki dampak yang sangat kecil terhadap total biaya dan tidak memengaruhi jumlah total limbah. Ketika biaya penyuntikan berubah dari -20% hingga +20%, total biaya (*Total Cost*) hanya mengalami fluktuasi yang kecil, dengan persentase perubahan dari -0,2% hingga +0,2%. Sementara itu, total limbah (*Total Waste*) tetap konstan pada 169,72 Kg, tanpa adanya perubahan sama sekali. Hal ini mengindikasikan bahwa biaya penyuntikan bukanlah variabel yang sensitif atau dominan dalam menentukan total biaya proyek, dan dampaknya terhadap jumlah limbah dapat diabaikan.



Gambar 5. 5 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Biaya Penyuntikan

Pada grafik diatas menunjukkan garis miring ke atas yang jelas, menunjukkan bahwa total biaya meningkat seiring dengan kenaikan biaya penyuntikan. Ketika biaya penyuntikan menurun dari 0% hingga -20%, total biaya menurun dari Rp3.401.842.776 menjadi Rp3.394.603.416. Sebaliknya, ketika biaya penyuntikan naik dari 0% hingga +20%, total biaya meningkat secara bertahap hingga mencapai Rp3.409.408.136. Ini mengindikasikan adanya korelasi positif antara biaya penyuntikan dan total biaya.



Gambar 5. 6 Grafik Total Waste pada Uji Sensitivitas Biaya Penyuntikan

Berdasarkan grafik diatas, terlihat bahwa total limbah tetap konstan pada angka sekitar 169,72 Kg, tanpa terpengaruh oleh perubahan biaya penyuntikan. Hal ini ditunjukkan oleh garis horizontal yang lurus, yang berarti tidak ada korelasi antara fluktuasi biaya penyuntikan (dari -20% hingga +20%) dengan jumlah limbah yang dihasilkan. Dengan kata lain, variabel biaya penyuntikan tidak memiliki sensitivitas terhadap jumlah total limbah.

5.4 Analisis Sensitivitas Model pada Bobot Vaksin dan Kemasan

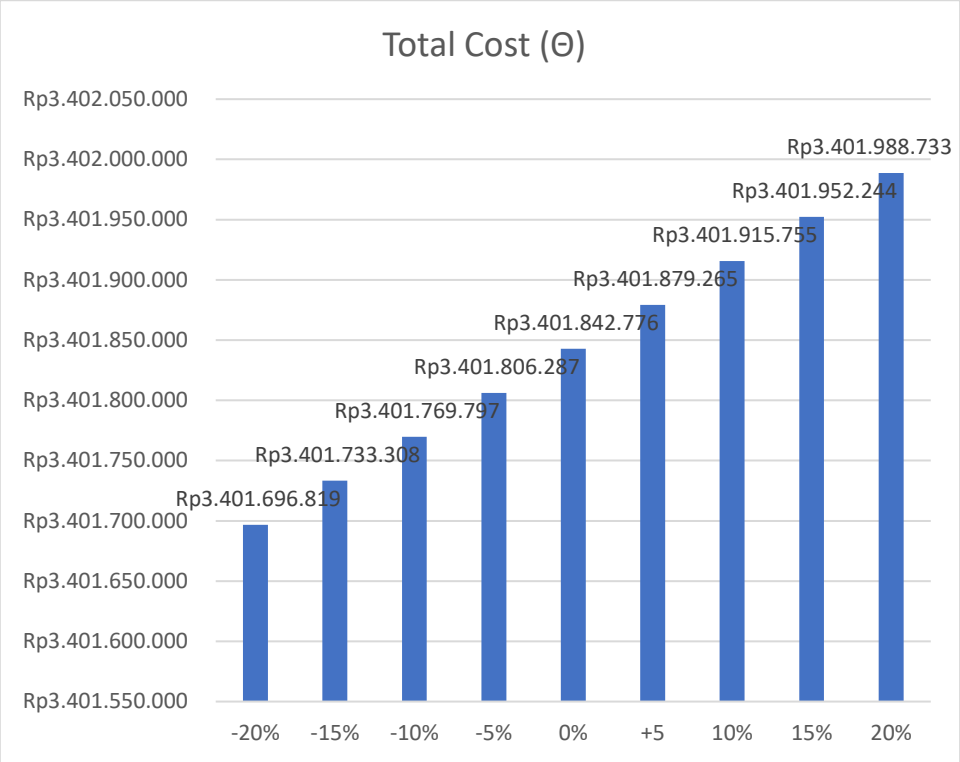
Analisis sensitivitas model pada konversi bobot vaksin dan kemasan dilakukan untuk mengetahui bagaimana perubahan bobot vaksin dan kemasan memengaruhi hasil perhitungan model. Konversi bobot vaksin dan kemasan berperan penting dalam menentukan total biaya limbah dan total waste. Berikut merupakan hasil uji sensitivitas pada konversi bobot vaksi dan kemasan:

Tabel 5. 4 Hasil Uji Sensitivitas Model pada Bobot Vaksin dan Kemasan

Bobot Vaksin dan Kemasan	Uji Sensitivitas			
	Total Cost (Rp)	Presentase (%)	*Total Waste* (Kg)	Presentase (%)
-20%	Rp3.401.696.819	-0,0043%	135,77	-20%
-15%	Rp3.401.733.308	-0,0032%	144,26	-15%
-10%	Rp3.401.769.797	-0,0021%	152,75	-10%

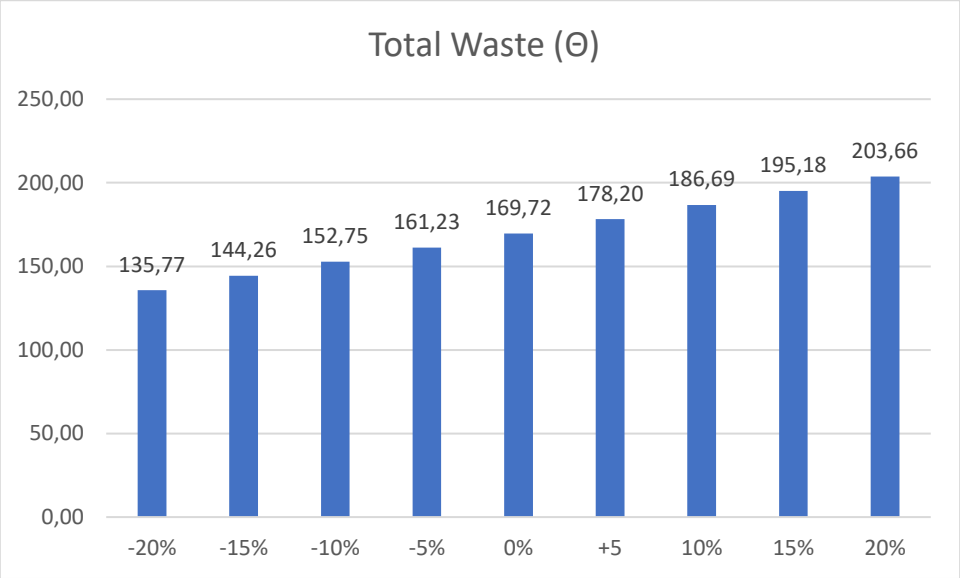
Bobot Vaksin dan Kemasan	Uji Sensitivitas			
	Total Cost (Rp)	Presentase (%)	*Total Was*te (Kg)	Presentase (%)
-5%	Rp3.401.806.287	-0,0011%	161,23	-5%
0%	**Rp3.401.842.776**	**0,0000%**	**169,72**	**0%**
+5%	Rp3.401.879.265	0,0011%	178,20	5%
10%	Rp3.401.915.755	0,0021%	186,69	10%
15%	Rp3.401.952.244	0,0032%	195,18	15%
20%	Rp3.401.988.733	0,0043%	203,66	20%

Berdasarkan tabel uji sensitivitas pada bobot vaksin dan kemasan, perubahan bobot vaksin memiliki dampak yang berbeda terhadap total biaya dan total limbah. Meskipun bobot dan kemasan vaksin berfluktuasi dari -20% hingga +20%, total biaya (*Total Cost*) hanya mengalami perubahan yang sangat kecil, yaitu dari -0,0043% hingga +0,0043%. Sebaliknya, total limbah yang dihasilkan (*Total Waste*) menunjukkan perubahan yang signifikan dan sebanding, bergerak dari -20% hingga +20% seiring dengan perubahan bobot vaksin dan kemasannya. Hal ini mengindikasikan bahwa bobot vaksin dan kemasan adalah variabel yang sangat sensitif terhadap jumlah total limbah, namun dampaknya terhadap total biaya proyek hampir dapat diabaikan.



Gambar 5. 7 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Bobot Vaksin dan Kemasan

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat bahwa ada hubungan positif antara parameter Θ dan total biaya. Saat nilai Θ meningkat dari -20% hingga +20%, total biaya proyek juga mengalami peningkatan secara bertahap, bergerak dari Rp3.401.696.819 hingga mendekati Rp3.401.988.733. Hal ini mengindikasikan bahwa total biaya proyek cukup sensitif terhadap perubahan nilai Θ.



Gambar 5. 8 Grafik *Total Cost* pada Uji Sensitivitas Bobot Vaksin dan Kemasan

Grafik pada Gambar 5. 8 menunjukkan korelasi positif yang kuat antara parameter Θ dan jumlah limbah yang dihasilkan. Saat nilai Θ meningkat dari -20% menjadi +20%, total limbah juga meningkat secara signifikan dari sekitar 135,77 Kg menjadi lebih dari 203,66 Kg. Hal ini menunjukkan bahwa total limbah sangat sensitif terhadap perubahan nilai Θ.

BAB VI
PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berikut merupakan kesimpulan dari penelitian ini:

1. Model matematis MILP yang dikembangkan dalam penelitian ini merepresentasikan rantai pasok vaksin influenza di RS UII, meliputi pemesanan ke supplier, distribusi dengan *cold chain*, penyimpanan di *cold storage*, hingga penggunaan dan pengolahan limbah. Model ini disusun dengan pendekatan *multi-objective* untuk meminimalkan biaya dan limbah vaksin, dengan pembobotan fungsi tujuan sebesar 60% untuk biaya dan 40% untuk waste. Validasi model menggunakan *solver* pada Microsoft Excel menunjukkan hasil yang layak dan sesuai kondisi riil.
2. Dari hasil optimasi model pada solver Microsoft Excel menghasilkan nilai fungsi tujuan minimasi *cost* mengalami penurunan 14,44% yaitu sebesar Rp3.401.842.776 yang sebelumnya sebesar Rp. 3.976.351.714. Sedangkan untuk tujuan minimasi *waste* mengalami penurunan 0,30 % yaitu sebesar 169,72 kg yang sebelumnya 170,23 kg.
3. Berdasarkan uji sensitivitas yang telah dilakukan parameter yang memiliki dampak terhadap kedua tujuan yaitu demand serta bobot dan kemasan vaksin. Uji sensitivitas pada demand serta bobot dan kemasan vaksin berbanding lurus terhadap hasilnya, semakin tinggi demand serta bobot dan kemasan vaksin maka semakin tinggi juga *total cost* dan *waste*-nya. Namun, untuk uji sensitivitas yang mengasilkan nilai paling rendah yaitu pada parameter biaya pembelian yang mana ketika diuji dengan nilai -20% menghasilkan nilai Rp2.714.578.108 pada *total cost* dan 169,72 kg pada *total waste.* Uji sensitivitas terhadap biaya pembelian hanya berpengaruh terhadap total *cost*, sedangkan total *waste* akan tetap sama.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian skripsi ini, terdapat saran yang dapat diberikan oleh penulis adalah sebagai berikut:

Berdasarkan hasil penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Bagi Rumah Sakit UII
    a. Efisiensi distribusi dapat difokuskan pada pengendalian biaya pembelian dan distribusi, karena berkontribusi besar terhadap total cost.

2. Bagi Penelitian Selanjutnya
    a. Model dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan ketidakpastian (*uncertainty*) dalam permintaan, harga, dan kapasitas distribusi menggunakan pendekatan *stochastic programming*.
    b. Menambahkan fungsi tujuan tambahan seperti emisi karbon atau biaya lingkungan sehingga mendukung penerapan *green supply chain* di sektor kesehatan.
    c. Menggunakan software lain seperti LINGO, Python, atau GAMS agar dapat menyelesaikan model dengan skala lebih besar dan kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

Al Theeb, N., Abu-Aleqa, M., & Diabat, A. (2024). Multi-objective optimization of two-echelon vehicle routing problem: Vaccines distribution as a case study. *Computers and Industrial Engineering*, *187*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109590

Alam, S., Katiandagho, D., Pinontoan, S. P. M., Kesehatan, P., & Manado, K. (2024). Analisis Pengelolaan Limbah Medis Program Imunisasi Rutin Di Puskesmas Kota Manado. In *Jurnal Sulolipu : Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat* (Vol. 24, Issue 2).

Anggraeni, D. (2022). *Analisis Strategi Mitigasi Risiko Pada Rantai Pasok Vaksin Booster Covid-19 Menggunakan Metode House Of Risk (HOR)[Skripsi Sarjana]* [Universitas Islam Indonesia]. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/42236

Astuti, D., Wigati, A., & Mundriyastutik, Y. (2023). Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Ketersediaan Tempat Penyimpanan Dan Pengelolaan Vaksin Imunisasi Dasar Pada Anak. *Jurnal Ilmu Keperawatan Dan Kebidanan*, *14*(1), 38–48.

Bacchetti, A., Bertazzi, L., & Zanardini, M. (2020). *Optimizing the distribution planning process in supply chains with distribution strategy choice* (4th ed., Vol. 72). Thomson Learning. www.duxbury.com

Bellman, Richard. (1972). *Dynamic programming*. Princeton University Press. https://gwern.net/doc/statistics/decision/1957-bellman-dynamicprogramming.pdf

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: strategy, planning, and operation* (6th ed., Vol. 6). Pearson.

Fatma, E., & Manurung, S. (2021a). *Optimasi Biaya Distribusi Multi-eselon untuk Multi-produk menggunakan Mix Integer Linier Programming*. *08*(01). https://doi.org/10.25292/j.mtl.v8i1.418

Fattahi, P., Ansari, N., & Shiri, M. (2025). The role of drone technology and application of IoT on vaccine supply chain during a pandemic under uncertain Environment: A real case study of COVID-19 in Iran. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *193*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103831

Grohskopf, L. A., Sokolow, L. Z., Olsen, S. J., Bresee, J. S., Broder, K. R., & Karron, R. A. (2015). *Groups Recommended for Vaccination and Timing of Vaccination* (Issue 30). http://www.cdc.gov/vaccines/acip/committee/members.html.Anyupdateswillbepostedathttp://www.cdc.gov/flu.

Gwiharto, A. K., Suhandi, C., Alodya, C., & Sinurya, R. K. (2021). Studi Efektivitas Vaksin Influenza: Updated Review. Keluwih. *KELUWIH: Jurnal Kesehatan Dan Kedokteran*, *3*(1), 48–56. https://doi.org/10.24123/kesdok.v3i1.4063

Hakim, M., Nazihah, A. S., & Windasari, A. Z. (2024). *Pengembangan Model Optimasi Untuk Mengurangi Total Biaya Outbound Logistics di Industri Unggas Dengan Metode Mixed Integer Linear Programming (MILP)*. https://lontar.ui.ac.id/detail?id=9999920526330&lokasi=lokal

Izzatunnisa, L., Wicaksono, A., & Prastawa, H. (2021). Pengembangan Model untuk Dynamic Supplier Selection Problem Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming dengan Mempertimbangkan Faktor Diskon. *Industrial Engineering Online Journal*, *6*(4), 1–10. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/ieoj/article/view/18708

Jeremi, N. A., & Vanany, I. (2023). Supply Chain Optimization Model for Fresh Cow's Milk to Reduce Carbon Emissions and Food Waste. *PROZIMA (Productivity, Optimization and*

Manufacturing System Engineering), *7*(1), 46–58. https://doi.org/10.21070/prozima.v7i1.1617

Kannan, R., & Monma, C. L. (1978). On The Computational Complexity Of Integer Programming Problems. In R. Henn, B. Korte, & W. Oettli (Eds.), *Optimization and Operations Research. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* (pp. 161–172). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-95322-4_17

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Limbah Medis Fasilitas Pelayanan Kesehatan Berbasis Wilayah*. https://peraturan.bpk.go.id/Details/152561/permenkes-no-18-tahun-2020

Khairi, & Noviantari, A. (2022). Perjalanan Panjang Dalam Pengembangan Vaksin Baru. *Seminar Nasional Riset Kedokteran (SENSORIK) 2022*, 128–134. https://conference.upnvj.ac.id/index.php/sensorik/article/view/1947/1514

Kochakkashani, F., Kayvanfar, V., & Haji, A. (2023). Supply chain planning of vaccine and pharmaceutical clusters under uncertainty: The case of COVID-19. *Socio-Economic Planning Sciences*, *87*. https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101602

Kusumadewi, A., & Widiati, M. C. (2023). Gambaran Sistem Pengelolaan Rantai Dingin Vaksin Pada Tiga Rumah Sakit Di Wilayah Jakarta Timur Tahun 2019. *PHRASE*, *3*(1), 43–55. https://openjournal.wdh.ac.id/index.php/Phrase/article/view/473

Larasanti, A., Jundullah, S. M., Pradana, A. N., Herlinda, O., & Sumulyo, S. A. K. (2023). *Covid-19 Pada Masyarakat Adat Dan Kelompok Rentan Development Initiatives (CISDI) Kajian dan penerbitan laporan ini didukung oleh CLUA (The Climate and Land Use Alliance) dan Koalisi Akses Vaksin untuk Masyarakat Adat dan Kelompok Rentan*. www.cisdi.org

Larson, P. D. (2001). Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies, David Simchi-Levi Philip Kaminsky Edith Simchi-Levi. *Journal of Business Logistics*, *22*(1), 259–261. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00165.x

Levani, Y., & Paramita, A. L. (2021). The Usage of Influenza Vaccine to Prevent Seasonal Influenza during Pandemic COVID-19. *MAGNA MEDICA Berkala Ilmiah Kedokteran Dan Kesehatan*, *8*(2), 93. https://doi.org/10.26714/magnamed.8.2.2021.93-101

Levner, I., & Herbon, A. (2023). An optimization model for distribution of influenza vaccines through a green healthcare supply chain. In *Operations Research for Health Care* (Vol. 37). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2023.100387

Li, X. (2023). Multi-objective vaccine delivery problem considering low carbon and customer loss aversion. *Expert Systems with Applications*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119870

Li, X., Pan, Y., Jiang, S., Huang, Q., Chen, Z., Zhang, M., & Zhang, Z. (2021). Locate vaccination stations considering travel distance, operational cost, and work schedule. *Omega (United Kingdom)*, *101*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102236

Linden, A. Van Der, & Reichel, A. (2020). Bio-waste in Europe-turning challenges into opportunities. *European Environment Agency*, *4*, 1–56. https://doi.org/10.2800/630938

Lotfi, R., Mohammad Shafiei, R., Komeleh, M. G., Pasha, F. G., & Ferasat, M. (2024). Vaccine supply chain network design by considering viability, robustness and risk. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.007

Lu, D. (2011). *Fundamentals of Supply Chain Management* (1st ed.). Bookboon. https://my.uopeople.edu/pluginfile.php/57436/mod_book/chapter/121631/BUS5116.Lu.Fundamentals.Supply.Chain.Mgmt.pdf

Manupati, V. K., Schoenherr, T., Subramanian, N., Ramkumar, M., Soni, B., & Panigrahi, S. (2021). A multi-echelon dynamic cold chain for managing vaccine distribution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *156*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102542

Mohammadi, M., Dehghan, M., Pirayesh, A., & Dolgui, A. (2022). Bi-objective optimization of a stochastic resilient vaccine distribution network in the context of the COVID-19 pandemic. *Omega (United Kingdom)*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102725

Nabilla, M., Luthfi, A., & Puteri, A. D. (2021). Analisis Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Tindakan Pengelolaan Limbah Medis Selama Pandemi Covid-1 Di Rsud Bangkinang. *Jurnal Kesehatan Tambusai*, *2*(3), 179–187. https://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jkt/article/view/2263/pdf

Neumann, G., & Kawaoka, Y. (2006). *Host Range Restriction and Pathogenicity in the Context of Influenza Pandemic*. *12*(6), 881–886.

Nirwana, S., & Ubaidullah, M. A. (2023). Analisis Dampak Kebijakan Vaksinasi Covid-19 Terhadap Masyarakat Di Desa Kuning 1 Kabupaten Aceh Tenggara Pada Tahun 2021. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa*, *8*(2). https://jim.usk.ac.id/FISIP/article/view/24544

Optimization vs. heuristics: Which is the right approach for your business? | ICRON. (2025, June). https://www.icrontech.com/resources/blogs/optimization-vs-heuristics-which-is-the-right-approach-for-your-business

Pebody, R., & Subbarao, K. (2023). *Influenza Vaccine—Live* (8th ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-79058-1.00034-7

Pirayesh, A., Asadaraghi, A., Mohammadi, M., Siadat, A., & Battaïa, O. (2025). A dynamic optimization model for vaccine allocation with age considerations: A study inspired by the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Economics*, *280*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109474

Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance* (1st ed.). The Free Press. https://resource.1st.ir/PortalImageDb/ScientificContent/182225f9-188a-4f24-ad2a-05b1d8944668/Competitive%20Advantage.pdf

Rastegar, M., Tavana, M., Meraj, A., & Mina, H. (2021). An inventory-location optimization model for equitable influenza vaccine distribution in developing countries during the COVID-19 pandemic. *Vaccine*, *39*(3), 495–504. https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.12.022

SAFETYSIGN.CO.ID. (2025, March 19). *Jenis-Jenis Limbah Medis dan Cara Tepat Mengatasinya • Safety Sign Indonesia - Rambu K3, Lalu Lintas, Exit & Emegency , Label B3*. https://www.safetysign.co.id/news/Jenis-Jenis-Limbah-Medis-dan-Cara-Tepat-Mengatasinya

Simbolon, & Esrana, O. (2000). *Analisis Biaya Efektifitas (Cost Effectiveness Analysis) Program Imunisasi Campak Dalam Upaya Pengendalian Penyakit Campak Di Kabupaten Bogor Tahun 2000*.

United Nation Environment Programme. (2024). *Beyond an age of waste Turning rubbish into a resource*. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939

Webster, R. G., Bean, W. J., Gorman, O. T., Chambers, T. M., & Kawaoka, Y. (1992a). Evolution and Ecology of Influenza A Viruses. In *Microbiological Reviews* (Vol. 56, Issue 1). https://journals.asm.org/journal/mr

WHO. (2014). *Safe management of wastes from health-care activities* (Y. Chartier, J. Emmanuel, U. Pieper, A. Pruss, P. Rushbrook, R. Stringer, W. Townend, S. Wilburn, &

R. Zghondi, Eds.; 2nd ed.). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789241548564

WHO. (2015). *Immunization handbook for Medical Officers* (1st ed., Vol. 4). World Health Organization. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/searo/india/publications/immunization-handbook-107-198-part2.pdf

WHO. (2020). *Seasonal Influenza Vaccines: An overview for decision-makers*. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/336951

WHO. (2025). *How do vaccines work?* World Health Organization. https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/how-do-vaccines-work

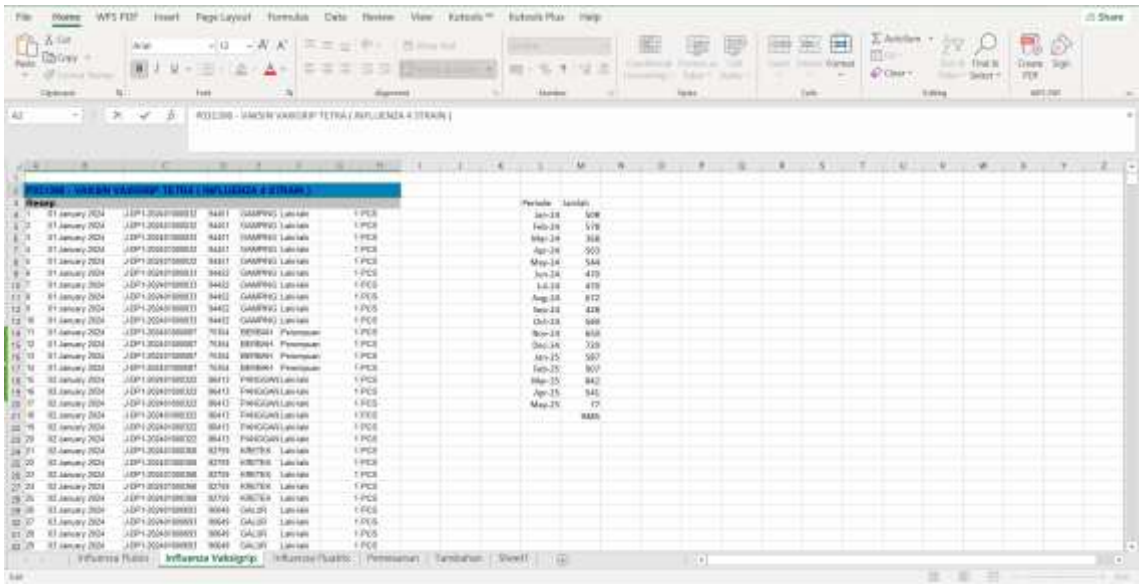
Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). *Operations Research: Applications And Algorithms* (C. Hinrichs, Ed.; 4th ed.). Thomson Learning. https://webweb.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/simmcdev.webweb.ai.in/MCAdigitalbook/OPTIMIZATION-TECHNIQUES-20240629T072451Z-001/Operations%20Research%20by%20Wayne%20L.Winston%204th%20Edition.pdf

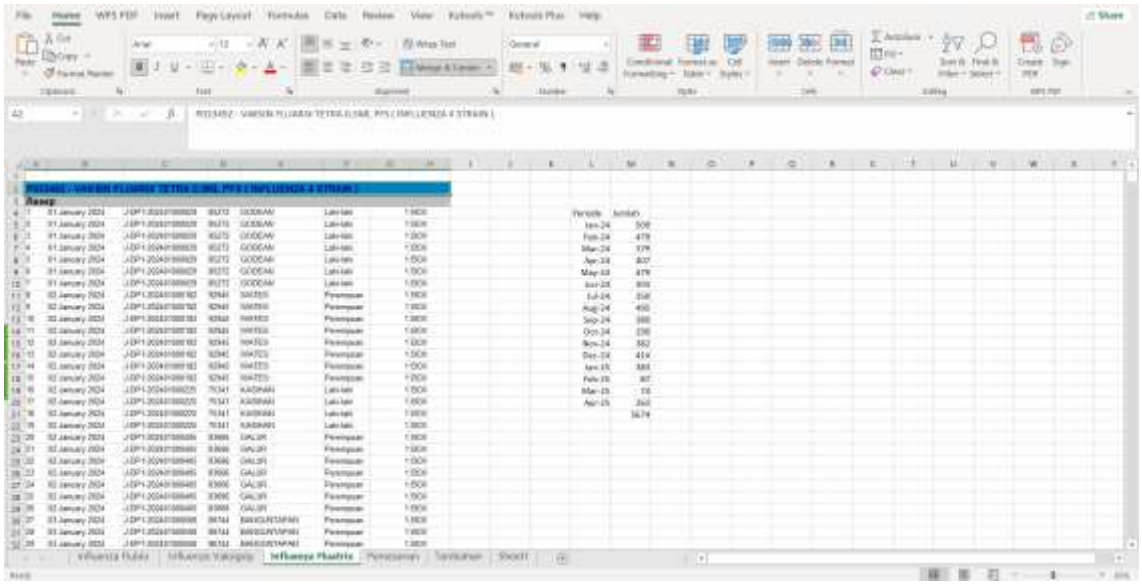
Yadav, D. K., Yadav, N., & Khurana, S. M. P. (2014). Vaccines: Present Status and Applications. *Animal Biotechnology: Models in Discovery and Translation*, 491–508. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416002-6.00026-2

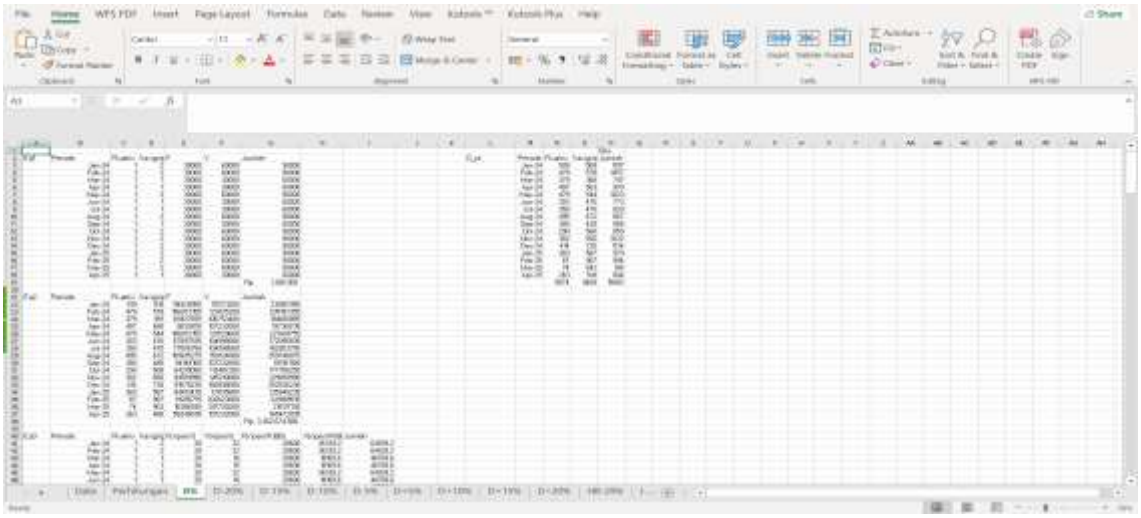
YAP, W. B., TOONG, S. T., & SYED HASSAN, S. (2018). Universal Oral Vaccine for Influenza Infections. *Jurnal Sains Kesihatan Malaysia*, *16*(02), 51–64. https://doi.org/10.17576/jskm-2018-1602-07

LAMPIRAN

1. Pengambilan Data







2. Pengolahan Data

