

**OPTIMASI PERENCANAAN DISTRIBUSI PRODUK VAKSIN POLIO DENGAN
MODEL MILP**

(STUDI KASUS: DI WILAYAH PERKOTAAN KOTA YOGYAKARTA)

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 Luthfi Nashih
No. Mahasiswa : 21522109

**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 Luthfi Nashih)
21522109

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 : 258 /1/08/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 kehadiran 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.TI.S1/20/Prodi.TI.S1/IV/2025 perihal Penelitian yang dilaksanakan di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia oleh:

Nama Mahasiswa	: Muhammad Luthfi Nashih
NIM	: 21522109
Program Studi	: Teknik Industri
Judul Penelitian	: Strategi Perencanaan Distribusi Produk Vaksin Polio dengan Model MILP

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

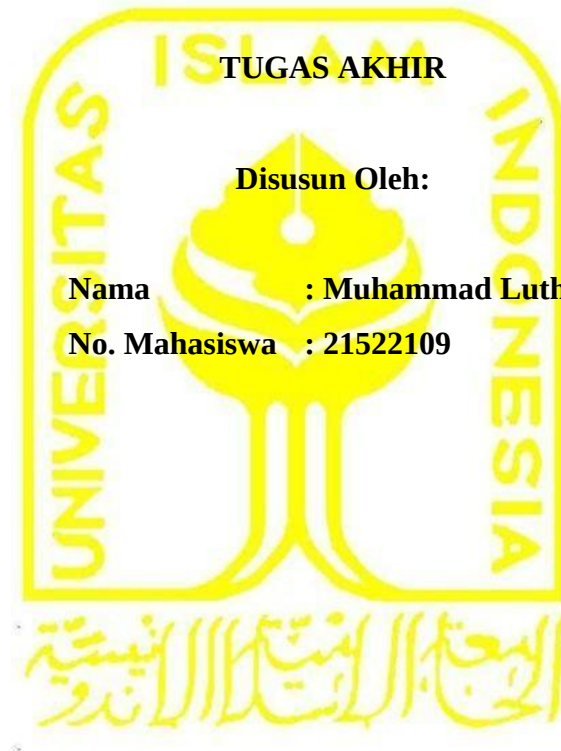
dr. Mulyo Hartana, Sp.PD



LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**OPTIMASI PERENCANAAN DISTRIBUSI PRODUK VAKSIN POLIO DENGAN
MODEL MILP**

(STUDI KASUS: DI WILAYAH PERKOTAAN KOTA YOGYAKARTA)



TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Muhammad Luthfi Nashih

No. Mahasiswa : 21522109

Yogyakarta, 18 September 2025

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
OPTIMASI PERENCANAAN DISTRIBUSI PRODUK VAKSIN POLIO DENGAN
MODEL MILP

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Muhammad Luthfi Nashih

No. Mahasiswa : 21522109

**Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi 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

Laporan tugas akhir ini penulis persembahkan kepada diri penulis sendiri yang telah berjuang dan berusaha semaksimal mungkin untuk menunaikan kewajiban sebagai seorang mahasiswa, laporan ini juga penulis persembahkan kepada kedua orangtua penulis yang selalu mendukung dan mendoakan tanpa ada hentinya.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kemampuannya”

(QS. Al-Baqarah:286)

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(QS. Al-Insiroh:6)

“One day, i am gonna grow wings”

(Radiohead)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penyelesaian Laporan Tugas Akhir dapat diselesaikan dengan baik. Tidak lupa juga bershalawat serta salam penulis curahkan kepada Baginda Nabi Besar, Muhammad SAW., serta para sahabat pengikutnya yang telah membimbing kita dari alam kegelapan menuju alam yang diridhai oleh Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan tugas ini tidak luput dari kesalahan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran untuk dapat memperbaiki kesalahan sehingga penelitian ini dapat lebih berguna bagi penulis maupun pembaca.

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU, ASEAN.Eng selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.Sc.. selaku Ketua Jurusan S1 Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM selaku Ketua Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Dr. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU. selaku dosen pembimbing laporan tugas akhir yang telah memberikan bimbingan serta arahan, motivasi, dan ilmu yang telah beliau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr. Ivan Darma Wangsa, S.T., M.T., CPLM. yang telah memberikan bimbingan dan pembelajaran terkait pengembangan model matematis sehingga penulis dapat mengembangkan model pada laporan ini dengan baik.
6. Kedua orangtua penulis yang selalu mendoakan dan memberikan semangat yang tiada hentinya.
7. Teman-teman seperjuangan yang telah menemani penulis menyusun laporan dan menghibur penulis disela-sela waktu penyusunan tugas akhir ini.

Yogyakarta, 18 September 2025



Muhammad Luthfi Nashih
21522109

ABSTRAK

Dalam dunia medis, imunisasi diperlukan untuk mencegah agar suatu penyakit tidak dapat berkembang biak didalam tubuh dan menularkan ke orang lain. Rantai pasok merupakan sistem dimana suatu organisasi dapat menyalurkan barang dan jasanya ke para pelanggan. Di Indonesia, vaksin polio merupakan golongan vaksin wajib bagi balita. Pada tahun 2024, wilayah Yogyakarta berhasil melakukan imunisasi polio sebesar 77,2% anak dengan usia 0-7 tahun dari total 115,659 anak yang ditargetkan. Vaksin polio juga merupakan salah satu produk kesehatan yang termasuk kategori *perishable product*, sehingga memerlukan pengelolaan distribusi yang tepat agar kualitas tetap terjaga dan kebutuhan masyarakat dapat terpenuhi. Di sisi lain, proses distribusi vaksin juga berkontribusi terhadap emisi karbon melalui penggunaan kendaraan, konsumsi energi listrik untuk penyimpanan, serta pengelolaan limbah medis. Dengan melakukan optimasi pada sistem rantai pasok dapat terjadi penghematan biaya dan juga peningkatan keuntungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematis MILP pada rantai pasok vaksin polio, mengetahui nilai optimal total profit dan total emisi karbon dengan fungsi tujuan maksimasi profit dan mereduksi emisi karbon dan untuk mengetahui seberapa berpengaruh kenaikan ataupun penurunan parameter pada kedua fungsi tujuan. Model di jalankan menggunakan *open solver software* microsoft excel untuk menemukan hasil optimal. Data yang digunakan mencakup biaya pembelian, biaya penyimpanan, tingkat emisi, biaya limbah dan kapasitas penyimpanan, hasil penyelesaian penelitian menggunakan *open solver* menunjukkan total profit sebesar Rp.164.461.804,35 dan total emisi sebesar 68.192,5 lt.CO2-eq. Selain itu, uji sensitivitas pada variansi permintaan, biaya pembelian, dan biaya emisi menunjukkan bahwa perubahan parameter tersebut memberikan pengaruh linear terhadap fungsi tujuan.

Kata Kunci: Rantai Pasok, Distribusi Vaksin, MILP, Profit, Emisi Karbon, Vaksin Polio

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kajian Literatur.....	6
2.1.1 <i>State of the Art</i>	6
2.2 Landasan Teori	12
2.2.1 Rantai Pasok	12
2.2.2 Vaksin	12
2.2.3 Vaksin Polio.....	13
2.2.4 Metode <i>Mixed-Integer Linear Programming (MILP)</i>	14
2.2.5 Metode Validasi.....	15
2.2.6 Emisi Karbon.....	16
BAB III METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Subjek Penelitian	18
3.2 Objek Penelitian.....	18
3.3 Data Penelitian.....	18
3.4 Alur Penelitian	18
BAB IV PENGEMBANGAN MODEL DAN PENGUMPULAN DATA.....	22
4.1 Pengembangan Model Matematis.....	22
4.2 Pengumpulan Data.....	25
4.3 Validasi dan Hasil.....	27
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	37
5.1 Analisis Sensitivitas Model Optimasi.....	37

BAB VI PENUTUP	42
6.1 Kesimpulan	42
6.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN	A

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Literatur	9
Tabel 4. 1 Data Pada Lokasi Studi Kasus.....	26
Tabel 4. 2 Data Permintaan Vaksin Polio Pada Tiap Periode	27
Tabel 4. 3 Perbandingan Data Riil dan Optimal.....	29
Tabel 4. 4 Jumlah Penggunaan Vaksin; <i>ust</i>	30
Tabel 4. 5 Frekuensi Pemesanan Kepada Supplier (Sebelum).....	31
Tabel 4. 6 Frekuensi Pemesanan Kepada Supplier; <i>uest</i>	31
Tabel 4. 7 Jumlah Vaksin Yang Dibeli (Sebelum).....	32
Tabel 4. 8 Jumlah Vaksin yang Dibeli; <i>uvakst</i>	32
Tabel 4. 9 Jumlah Persediaan Vaksin; <i>pvt</i>	33
Tabel 4. 10 Jumlah Emisi Persediaan Vaksin; <i>est</i>	34
Tabel 4. 11 Emisi Distribusi (Sebelum)	34
Tabel 4. 12 Emisi Distribusi; <i>edst</i>	35
Tabel 4. 13 Emisi Limbah; <i>elt</i>	35
Tabel 5. 1 Uji Sensitivitas Terhadap Vaiansi Permintaan (<i>Demand</i>).....	37
Tabel 5. 2 Uji Sensitivitas Terhadap Vaiansi Biaya Pembelian.....	38
Tabel 5. 3 Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Data Imunisasi Polio Nasional (28 November 2022 - 23 Juli 2024).....	2
Gambar 1. 2 Grafik Emisi Karbon Di Indonesia.....	2
Gambar 2. 1 Grafik Sektor Penyumbang Emisi Karbon per Kapita	17
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	19
Gambar 4. 1 Komponen keputusan, Batasan dan Tujuan Model.....	22
Gambar 4. 2 Alur Rantai Pasok Penyediaan Vaksin Polio	26
Gambar 4. 3 Hasil Validasi dengan <i>t-Test</i>	28
Gambar 4. 4 <i>Constraint</i>	29
Gambar 4. 5 Temuan Hasil Optimal	29
Gambar 5. 1 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi <i>Demand</i>	38
Gambar 5. 2 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi <i>Demand</i>	38
Gambar 5. 3 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Pembelian.....	39
Gambar 5. 4 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Pembelian	40
Gambar 5. 5 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi	41
Gambar 5. 6 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi.....	41

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perishable product adalah produk dalam kehidupan sehari-hari yang kedaluwarsa atau menurun kualitas atau nilainya seiring berjalannya waktu (Lhamo & Chiadamrong, 2017). *Perishable product* atau produk yang mudah rusak seperti buah, sayur, daging, obat-obatan dan vaksin dapat memiliki umur yang pendek karena dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, lingkungan, pencahayaan dan penanganan yang salah. Produk yang mudah rusak adalah produk dalam kehidupan sehari-hari yang kedaluwarsa atau menurun kualitas atau nilainya seiring berjalannya waktu.

Vaksin adalah mikroorganisme atau toksoid yang diubah sedemikian rupa sehingga patogenitas atau toksisitasnya hilang tetapi masih tetap mengandung sifat anti genisitasnya (Imam & Masruroh, 2020). Vaksin termasuk kedalam *perishable product* karena produk tersebut akan mudah kadaluwarsa jika tidak disimpan melalui penanganan yang tepat. Vaksin umumnya dapat bertahan selama 18 bulan dari selesai produksi. Penyimpanan dan pendistribusian vaksin harus melengkapi syarat kondisi pada rantai dingin antara lain, suhu *freezer* yang digunakan yaitu 2°C sampai dengan 8°C (Fahra Ningrum & Kartika Untari, 2022).

Menurut laporan dari WHO, *poliomyelitis* (polio) adalah penyakit virus yang sangat menular yang sebagian besar menyerang anak-anak di bawah usia 5 tahun. Virus ini ditularkan dari orang ke orang terutama melalui jalur fekal-oral atau, yang lebih jarang, melalui media umum (misalnya air atau makanan yang terkontaminasi) dan berkembang biak di usus, dari sana ia dapat menyerang sistem saraf dan menyebabkan kelumpuhan. Tidak ada obat untuk polio, sehingga pencegahan melalui vaksinasi adalah satu-satunya cara untuk mengendalikan penyebaran penyakit ini (Karingga & Hikmah, 2024).

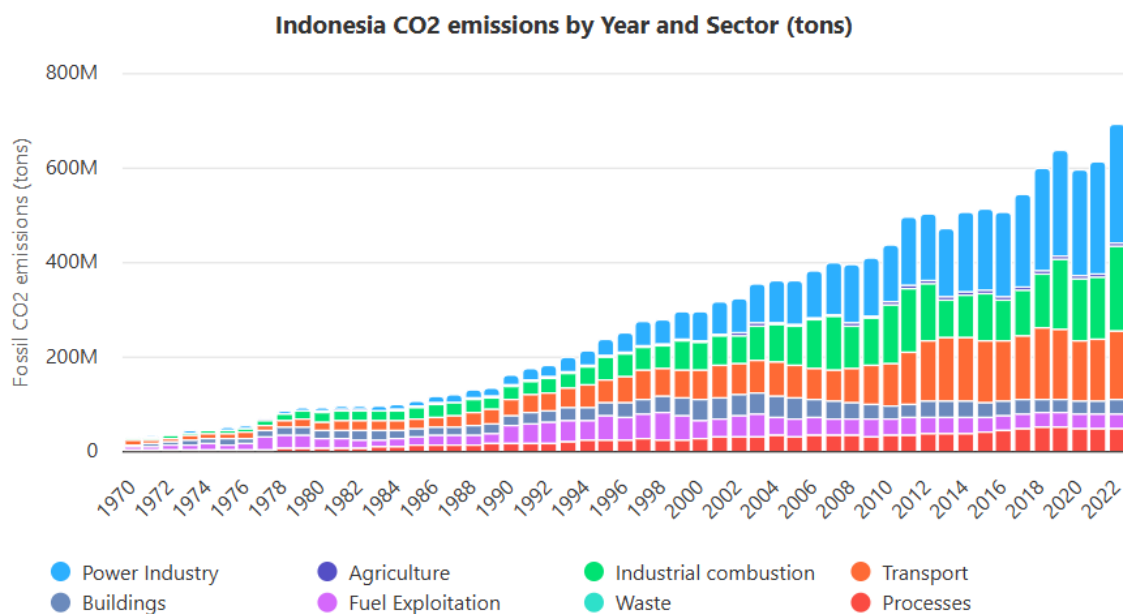
Di Indonesia ada dua jenis vaksin polio yang umum digunakan yaitu *Oral Polio Vaccine* (OPV) yang diberikan dengan cara meneteskan vaksin melalui mulut dan *Inactivated Polio Vaccine* (IPV) yang diberikan dengan cara suntikan ke bagian lengan atau paha. Pada Gambar 1. 1 menunjukkan data target umur, target populasi dan persentase ketercapaian imunisasi polio secara nasional yang dilakukan di seluruh provinsi Indonesia, dari data tersebut dapat dilihat bahwa angka kebutuhan dari vaksin polio terbilang sangat tinggi sehingga layanan kesehatan termasuk rumah sakit perlu memiliki stok vaksin yang mencukupi dan sesuai dengan target pasien.

Province	Period	Age	Number of targets	Round 1		Round 2	
				Number vaccinated	%	Number vaccinated	%
Aceh	28 Nov 2022 – 12 March 2023	0-12 years	1,217,939	1,180,322	96.9%	1,153,310	94.7%
North Sumatra	13 Feb – 30 May 2023	0-59 months	1,346,655	1,294,171	96.1%	1,276,852	94.8%
West Java	3 April – 22 June 2023	0-59 months	3,984,797	3,834,634	96.2%	3,676,799	92.3%
East Java	15 Jan – 09 April 2024	0-7 years	4,437,679	4,735,572	106.7%	4,696,688	105.8%
Central Java	15 Jan – 09 April 2024	0-7 years	3,903,678	3,991,363	102.2%	3,899,509	99.9%
Sleman (DIY)	15 Jan – 09 April 2024	0-7 years	149,821	115,659	77.2%	111,407	74.4%
Papua Region	Ongoing, started on 27 May 2024	0-7 years	865,690	469,874	54.3%	314,761	36.4%
27 Province	Ongoing, started 23 July 2024	0-7 years	16,420,460	14 685 577	89.4%	13 317 762	81.1%

Gambar 1. 1 Data Imunisasi Polio Nasional (28 November 2022 - 23 Juli 2024)

Sumber: Kemenkes

Emisi karbon adalah gas yang dikeluarkan dari hasil pembakaran senyawa yang mengandung karbon seperti CO₂, solar, *Liquefied Petroleum Gas* (LPG), dan bahan bakar lainnya. Secara sederhana emisi karbon adalah pelepasan karbon ke atmosfer (Nugroho & Rianto, 2022). Pada tahun 2019 emisi karbon perkapita di Indonesia adalah sebesar 2,30 ton CO₂e. Angka ini terus mengalami kenaikan sejak tahun 2013 (Pusparini et al., 2023). Berdasarkan data dari World Meter yang ditunjukkan pada Gambar 1. 2, pada tahun 2022 emisi karbon dari fosil di Indonesia mencapai angka 692,236,110 ton, dengan tiga sektor sebagai penghasil emisi tertinggi yaitu industri tenaga listrik yang menghasilkan 36%, pembakaran industri 26% dan transportasi 21%.



Gambar 1. 2 Grafik Emisi Karbon Di Indonesia

Sumber: World Meters

Mengambil data dari World Bank Group, jumlah emisi karbon di Indonesia yang dihasilkan dari transportasi pada tahun 2023 mencapai angka 149,5 juta ton. Pada tahun 2020 sektor

kesehatan berkontribusi sekitar 4,6% dari total emisi global setara dengan 2 gigaton karbon dioksida (Triwidawati et al., 2024). Dalam proses pendistribusian vaksin dari *supplier* ke RS UII, masih menggunakan kendaraan konvensional dengan bahan bakar fosil dapat menghasilkan emisi karbon yang berdampak buruk bagi bumi seperti polusi udara, pemanasan global, perubahan iklim dan kerusakan ekosistem. Selain dari faktor kendaraan, penggunaan listrik pada poses pengelolaan vaksin dan limbah vaksin yang telah digunakan juga dapat menghasilkan emisi karbon.

Rantai pasok merupakan sistem dimana suatu organisasi dapat menyalurkan barang dan jasanya ke para pelanggan. Rantai pasok ini juga merupakan jejaring dari berbagai organisasi yang saling keterkaitan atau berhubungan yang memiliki tujuan yakni menyelenggarakan pengadaan atau penyaluran barang secara baik (Irvai & Herdiansyah, 2021). Adapun dengan melakukan optimasi pada sistem rantai pasok dapat terjadi penghematan biaya dan juga peningkatan keuntungan yang didapat oleh produsen atau penyedia jasa.

Rumah sakit Universitas Islam Indonesia merupakan rumah sakit yang berlokasi di kabupaten Bantul, provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Rumah sakit ini telah beroperasi sebagai penyedia layanan kesehatan di Yogyakarta kurang lebih selama 5 tahun, dengan menyediakan berbagai pelayanan kesehatan seperti pengobatan, konsultasi kesehatan, persalinan dan juga penyediaan vaksin bagi masyarakat. Untuk menjamin kelayakan vaksin polio ke masyarakat, rumah sakit UII melakukan pengelolaan dan juga penyimpanan vaksin dengan memperhatikan ketentuan yang berlaku pada setiap vaksin yang tersedia, termasuk vaksin polio, selain itu juga ketika dalam proses pendistribusian vaksin perlu di simpan kedalam kotak dingin dengan suhu minimal 2°C - 8°C untuk menjaga kondisi vaksin tetap bagus dan tidak mengalami kadaluwarsa sebelum di bagikan ke pasien, dengan memiliki 3 *supplier* vaksin polio yang berbeda tentunya hal tersebut dapat menyebabkan beberapa biaya tinggi dan disamping itu rumah sakit UII juga menghadapi tuntutan untuk meminimumkan emisi karbon yang dihasilkan.

Dalam melakukan penyelesaian masalah optimasi pada rantai pasok, dengan dua atau lebih fungsi tujuan yang saling bertolak belakang dibutuhkan metode yang tepat untuk membantu dalam proses penyelesaian dan juga memberikan hasil yang relevan. Pada penelitian-penelitian terdahulu terdapat beberapa metode yang umum di gunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada suatu rantai pasok seperti *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) dan *Linear Programming* (LP). MILP merupakan pendekatan optimasi

matematis yang menggabungkan variabel kontinu dan diskrit, serta mampu memformulasikan fungsi tujuan dan kendala secara linier (Zarlis & Efendi, 2020). Berbeda dengan metode MILP, *Linear Programming* (LP) adalah subkelas penting dari MILP di mana semua variabelnya kontinu (Gnegel et al., 2021). Berdasarkan hal tersebut metode MILP cocok untuk digunakan pada penelitian yang memiliki fungsi tujuan yang saling bertolak belakang serta memiliki gabungan antara variabel diskrit dan juga kontinu. Sementara itu, metode LP lebih cocok digunakan ketika memiliki fungsi tujuan yang searah dan hanya memiliki nilai variabel kontinu. Pada penelitian ini, terdapat dua fungsi tujuan yang bertolak belakang yaitu maksimasi total profit yang memiliki nilai variabel diskrit dan minimasi total emisi karbon dengan nilai variabel kontinu. Berdasarkan kondisi tersebut pemilihan metode yang paling tepat adalah dengan menggunakan metode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP).

Penelitian ini bertujuan untuk membuat optimasi perencanaan distribusi vaksin polio menggunakan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Selain itu penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan profit dan meminimalkan emisi karbon dari proses pendistribusian vaksin polio. Hasil dari penelitian ini di harapkan dapat menjadi saran bagi pihak rumah sakit untuk memaksimalkan pendistribusian vaksin polio di daerah Yogyakarta.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut ini adalah rumusan masalah:

1. Bagaimana pengembangan model matematis dengan MILP pada rantai pasok vaksin polio?
2. Berapa nilai optimal untuk total profit dan total emisi karbon dari fungsi tujuan maksimasi profit dan minimasi emisi karbon?
3. Bagaimana hasil uji sensitivitas pada beberapa skenario kenaikan dan penurunan parameter terhadap nilai optimal total profit dan total emisi karbon?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut ini merupakan tujuan penelitian:

1. Mengembangkan model matematis MILP pada rantai pasok vaksin polio.
2. Mengetahui nilai optimal total profit dan total emisi karbon dengan fungsi tujuan maksimasi profit dan mereduksi emisi karbon.
3. Mengetahui seberapa berpengaruh kenaikan ataupun penurunan parameter pada kedua fungsi tujuan.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat penelitian:

1. Bagi Perusahaan

Memberikan rekomendasi kepada pihak rumah sakit terkait strategi perencanaan distribusi vaksin polio dengan memaksimalkan profit dan meminimalkan emisi karbon.

2. Bagi Peneliti

Mampu mengimplementasikan keilmuan teknik industri yang telah diperoleh selama perkuliahan serta menambah wawasan terkait rantai pasok vaksin polio di kota Yogyakarta.

1.5 Batasan Penelitian

Berikut ini merupakan batasan penelitian

1. Penelitian ini hanya dilakukan di rumah sakit UII.
2. Penelitian hanya berfokus pada pendistribusian vaksin polio di wilayah perkotaan kota Yogyakarta.
3. Objek penelitian ini hanya berfokus pada vaksin polio rumah sakit UII di Yogyakarta.
4. Penelitian ini hanya berfokus sampai pada tahap pengembangan model matematis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Berikut ini merupakan kajian literatur yang peneliti gunakan untuk mendukung penelitian ini.

2.1.1 *State of the Art*

Penelitian mengenai desain dan optimasi rantai pasok vaksin semakin berkembang, terutama sejak pandemi covid-19 yang menimbulkan tantangan besar dalam distribusi global. Mohammadi et al. (2024) mengembangkan model *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) untuk alokasi vaksin dan kebijakan karantina secara simultan dengan mempertimbangkan aspek biaya, *equity*, serta strategi *fractional dosing*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun distribusi vaksin yang adil penting secara sosial, pertimbangan *equity* justru dapat meningkatkan jumlah infeksi jika tidak disertai strategi karantina yang optimal. Dalam konteks vaksin hewan, Mehravaran dan Nemati (2025) mengusulkan model multi-periode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) untuk perancangan rantai pasok vaksin unggas dengan mempertimbangkan faktor *perishability*, strategi *resiliency*, dan *offshore supplier selection*. Model ini berhasil menunjukkan pentingnya strategi kapasitas cadangan dan diversifikasi pemasok untuk meningkatkan ketahanan rantai pasok vaksin

Işık dan Yildiz (2023) menyoroti permasalahan distribusi vaksin covid-19 di Turki dengan menambahkan dimensi pengelolaan limbah medis. Mereka mengembangkan model multi-objektif MILP dengan pendekatan *robust optimization*, yang bertujuan memaksimalkan jumlah individu yang diimunisasi sekaligus meminimalkan biaya distribusi dan dampak limbah. Penelitian ini menegaskan bahwa ketidakpastian suplai adalah faktor paling kritis yang dapat menyebabkan kegagalan pemenuhan permintaan hingga 30%. Lotfi et al. (2024) mengembangkan konsep *Viable Vaccine Supply Chain Network Design* (VVSCND) dengan mempertimbangkan keberlanjutan, ketahanan, kelincahan, risiko, dan robustnes melalui pendekatan *robust stochastic programming*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian emisi CO₂, kapasitas fleksibel, dan redundansi fasilitas menjadi faktor penting dalam menjaga keberlangsungan distribusi vaksin.

Sengul Orgut et al. (2023) mengembangkan model *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) untuk alokasi vaksin covid-19 yang mempertimbangkan aspek keadilan dan efektivitas. Model ini mampu meminimalkan waktu tempuh masyarakat menuju lokasi vaksinasi sekaligus mengurangi risiko pemborosan akibat keterbatasan kapasitas penyimpanan atau rendahnya

tingkat penerimaan vaksin. Hasil studi kasus di Alabama menunjukkan bahwa pendekatan MILP dapat secara signifikan meningkatkan pemerataan akses vaksin dibandingkan dengan kebijakan alokasi sederhana berbasis pro rata. Pendekatan strategi rantai pasok juga diteliti oleh Gomes et al. (2023) yang membandingkan strategi *Lean* dan *Agile* dalam distribusi vaksin covid-19. Dengan menggabungkan model MILP dan simulasi *system dynamics*, penelitian ini menemukan bahwa strategi *Lean* lebih hemat biaya, sedangkan strategi *Agile* lebih unggul dalam kecepatan respon dan mempercepat tercapainya kekebalan populasi. Studi ini menekankan perlunya menyesuaikan strategi rantai pasok dengan kondisi disrupsi yang dihadapi, khususnya di wilayah berpenduduk padat. Di sisi lain, Georgiadis (2021) mengembangkan model MILP untuk perencanaan rantai pasok vaksin covid-19 secara optimal di Yunani. Model ini memperhitungkan kapasitas penyimpanan dingin, umur simpan vaksin mRNA, serta target vaksinasi harian. Dengan menerapkan strategi dekomposisi, penelitian ini berhasil meminimalkan biaya distribusi sekaligus mengurangi jumlah dosis vaksin yang terbuang. Sementara itu, Manupati et al. (2021) mengusulkan rantai pasok vaksin *multi-echelon* dengan mempertimbangkan kapasitas dinamis *cold chain*. Penelitian ini menggunakan kombinasi *decision tree analysis* dan MILP untuk menentukan lokasi fasilitas penyimpanan serta strategi distribusi berdasarkan prioritas kelompok populasi. Lebih lanjut, sistem rantai pasok vaksin menjadi aspek penting untuk meningkatkan cakupan imunisasi.

Pada penelitian Rastegar et al. (2021) berfokus pada distribusi vaksin influenza yang mencakup keadilan distribusi berdasarkan kelompok prioritas, perencanaan lokasi dan persediaan dalam rantai pasok. Metode yang digunakan adalah MILP dan juga model optimasi lokasi dan persediaan yang bertujuan untuk merancang model matematis untuk distribusi, menentukan lokasi optimal pusat distribusi dan mengoptimalkan distribusi. Hasil dari penelitian ini berhasil memastikan kelompok prioritas seperti bayi dan lansia menerima alokasi vaksin sesuai tingkat risiko, selain itu juga model MILP terbukti efektif dalam distribusi adil vaksin, dengan hasil lebih baik dibanding pendekatan distribusi merata. Selain vaksin, pendekatan MILP juga diaplikasikan dalam sistem suplai darah. Mansur et al. (2023) merancang model MILP untuk rantai pasok darah berkelanjutan dengan mempertimbangkan emisi karbon, keterbatasan umur simpan, serta berbagai jenis darah. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi faktor lingkungan dalam perencanaan rantai pasok produk medis yang mudah rusak. Sementara itu, penelitian dari Charlie et al. (2024) menekankan bahwa strategi *forecast* dalam perencanaan produksi mampu meningkatkan pemenuhan permintaan vaksin

hingga 92%, yang menunjukkan efektivitas industri farmasi dalam mengantisipasi fluktuasi kebutuhan fasilitas kesehatan.

Penggunaan metode optimasi MILP juga banyak diaplikasikan dalam konteks distribusi dan produksi di berbagai sektor, seperti pada penelitian Pramudyo et al. (2021) yang mengembangkan model untuk meminimalkan biaya transportasi mengoptimalkan rute distribusi beras dari gudang ke konsumen, kemudian penelitian oleh Rachman & Mawengkang (2023) mengembangkan model MILP untuk perencanaan produksi makanan laut dengan mempertimbangkan ketidakpastian permintaan. Hasilnya, metode ini efektif meminimalkan biaya produksi sekaligus memberikan keputusan yang optimal terkait jenis dan jumlah produk yang diproduksi, sementara itu, Putri et al. (2023) menerapkan MILP untuk merancang rute distribusi sayuran pada PT ABC. Model yang digunakan mampu mengurangi keterlambatan pengiriman hingga 5% dan menurunkan biaya transportasi sebesar 4%, menunjukkan efektivitas MILP dalam menyelesaikan masalah distribusi dengan karakteristik *Vehicle Routing Problem*. Pada penelitian Rosyidi et al. (2022) menjelaskan bahwa metode MILP juga dapat digunakan untuk meminimalkan total biaya rantai pasok, mencakup biaya pembelian, jasa *outsourcing* logistik, dan transportasi pada suatu perusahaan, penelitian ini berhasil menemukan biaya optimal dan variabel *demand* merupakan variabel yang paling sensitive terhadap perubahan hasil optimal.

Dari berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa meskipun telah banyak model MILP dikembangkan untuk mengatasi tantangan distribusi pada vaksin sebagian besar studi masih berfokus pada efisiensi biaya, kapasitas *cold chain*, serta ketidakpastian permintaan. Namun, integrasi yang lebih komprehensif aspek profit, keberlanjutan lingkungan, dan pengelolaan limbah medis masih relatif terbatas. Hal inilah yang menjadi celah penelitian yang dapat diisi dalam studi ini. Selain dari lokasi, perbedaan penelitian ini juga terletak pada fungsi tujuan (*objective function*) dimana fungsi tujuan dari penelitian ini adalah untuk memaksimalkan total profit dan juga meminimalkan total emisi karbon yang dihasilkan.

Tabel 2. 1 Kajian Literatur

NO	Penulis	Judul	Objek <i>Perishable Product</i>				Metode	
			Vaksin	Darah	Makanan	Lainnya	MILP	Nearest Neighbour Forecasting
1	(Mohammadi et al., 2024)	<i>Vaccine supply chain network design by considering viability, robustness and risk</i>	√				√	
2	(Mehravaran & Nemati, 2025)	<i>A resilient poultry vaccine supply chain network design considering perishability and stress test</i>	√				√	
3	(Ensar Işık & Topaloglu Yildiz, 2023)	<i>Optimizing the COVID-19 cold chain vaccine distribution network with medical waste management: A robust optimization approach</i>	√				√	
4	(Lotfi et al., 2024)	<i>Vaccine supply chain network design by considering viability, robustness and risk</i>	√				√	
5	(Mansur et al., 2023)	<i>A mixed-integer linear programming model for sustainable blood supply chain problems with shelf-life time and multiple blood types</i>		√			√	
6	(Sengul Orgut et al., 2023)	<i>Equitable and effective vaccine access considering vaccine hesitancy and capacity constraints</i>	√				√	

NO	Penulis	Judul	Objek Perishable Product				Metode	
			Vaksin	Darah	Makanan	Lainnya	MILP	Nearest Neighbour Forecasting
7	(Gomes et al., 2023)	<i>Comparative analysis of lean and agile supply chain strategies for effective vaccine distribution in pandemics: A case study of COVID-19 in a densely populated developing region</i>	√				√	
8	(Georgiadis & Georgiadis, 2021)	<i>Optimal planning of the COVID-19 vaccine supply chain</i>	√				√	
9	(Manupati et al., 2021)	<i>A multi-echelon dynamic cold chain for managing vaccine distribution</i>	√				√	
10	(Rastegar et al., 2021)	<i>An inventory-location optimization model for equitable influenza vaccine distribution in developing countries during the COVID-19 pandemic</i>	√				√	
11	(Pramudyo et al., 2021)	Penentuan Rute Pengiriman Beras Menggunakan Metode Nearest Neighbour dan Mixed Integer Linear Programming			√		√	√
12	(Putri et al., 2023)	Perancangan Rute Pengiriman pada PT. ABC untuk Meminimasi Tingkat Keterlambatan Pengiriman			√		√	

NO	Penulis	Judul	Objek <i>Perishable Product</i>					Metode	
			Vaksin	Darah	Makanan	Lainnya	MILP	Nearest Neighbour	Forecasting
		dan Biaya Transportasi Menggunakan Model Mixed Integer Linear Programming							
13	(Charlie et al., 2024)	Analisa Kinerja Rantai Pasok: Studi Kasus Keberhasilan Pemenuhan Kebutuhan Vaksin di Industri Farmasi XYZ	√						√
14	(Rachman & Mawengkang, 2023)	Perencanaan Produksi Makanan Laut dengan Pertimbangan Permintaan dan Kapasitas			√		√		
15	(Rosyidi et al., 2022)	Model Pemrograman Linier Integer Campuran dari Alokasi Pesanan yang Melibatkan Layanan Logistik Kustomisasi Massal				√	√		
16		Usulan	√				√		

2.2 Landasan Teori

Berikut ini merupakan landasan teori dari penelitian ini.

2.2.1 Rantai Pasok

Rantai pasok atau *supply chain* dapat didefinisikan sebagai sekumpulan aktifitas (dalam bentuk entitas/fasilitas) yang terlibat dalam proses transformasi dan distribusi barang mulai dari bahan baku paling awal dari alam sampai produk jadi pada konsumen akhir. suatu *supply chain* terdiri dari perusahaan yang mengangkut bahan baku dari bumi/alam, perusahaan yang mentransformasikan bahan baku menjadi bahan setengah jadi atau komponen, *supplier* bahan-bahan pendukung produk, perusahaan perakitan, distributor, dan retailer yang menjual barang tersebut ke konsumen akhir (Irvai & Herdiansyah, 2021). Terdapat tiga komponen dalam rantai pasokan, yaitu:

1. Rantai pasokan hulu (*upstream supply chain*), meliputi berbagai aktivitas perusahaan dengan para penyalur, antara lain berupa pengadaan bahan baku dan bahan pendamping.
2. Rantai pasokan internal (*internal supply chain*), meliputi semua proses pemasukan barang ke gudang yang digunakan sampai pada proses produksi. Aktivitas utamanya antara lain produksi dan pengendalian persediaan.
3. Rantai pasokan hilir (*downstream supply chain*), meliputi semua aktivitas yang melibatkan pengirim produk kepada pelanggan. Fokus utama kegiatannya adalah distribusi, pergudangan, transportasi dan pelayanan.

Pada suatu rantai pasokana biasanya ada 3 macam aliran yang harus dikelola. Pertama adalah aliran barang yang mengalir dari hulu (*upstream*) ke hilir (*downstream*). Kedua adalah aliran uang dan sejenisnya yang mengalir dari hilir ke hulu. Ketiga adalah aliran informasi yang bisa terjadi dari hulu ke hilir ataupun sebaliknya (Taula et al., 2022).

2.2.2 Vaksin

Vaksin adalah suatu sediaan yang diformulasikan untuk dapat merangsang sistem kekebalan tubuh manusia ketika diberikan. Vaksinasi, atau pemberian vaksin ke tubuh manusia, berdampak positif terhadap kesehatan dan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup. Dr. Edward Jenner dari Inggris menemukan vaksin pertama kali pada tahun 1796, memberikan metode pencegahan untuk penyakit cacar. Temuan ini menjadi landasan perkembangan dalam dunia kesehatan hingga kini, memungkinkan vaksinasi sebagai langkah pencegahan terhadap berbagai penyakit serius seperti pertusis, hepatitis, infeksi HPV, campak, rubella, tuberkulosis,

dan yang paling baru, vaksin COVID-19. Vaksinasi diyakini dapat mencegah 3,5-5 juta kematian setiap tahun di seluruh dunia (Charlie et al., 2024).

Di antara jenis vaksin adalah: hepatitis (untuk mengusahakan kekebalan hati terhindar dari penyakit), polio (untuk mengusahakan atropi otot sehingga kebal dari penyakit dan jika kebal manfaatnya antara lain bentuk kaki lurus atau normal tidak seperti huruf O atau huruf X, dan kelumpuhan), rubella (supaya kebal dari serangan campak), BCG (*Bacillus Calmette Guérin*) untuk mencegah serangan TBC (*Tuber Culocis*), DPT (*Difteri Portucis Tetanus*) mencegah timbulnya penyakit gomen atau sariawan dan batuk rejan serta tetanus, MMR (*Measless Mumps Rubella*). Di Indonesia, praktik vaksinasi-imunisasi terhadap balita (bayi di bawah umur lima tahun) antara lain: hepatitis B, BCG, polio, MMR, IPV, dan DPT. Vaksinasi-imunisasi bahkan telah deprogramkan secara internasional oleh WHO (Imam & Masruroh, 2020).

2.2.3 Vaksin Polio

Menurut *World Health Organization* (WHO), *poliomyelitis* (polio) adalah penyakit virus yang sangat menular yang sebagian besar menyerang anak-anak di bawah usia 5 tahun. Virus ini ditularkan dari orang ke orang terutama melalui jalur fekal-oral atau, yang lebih jarang, melalui media umum (misalnya air atau makanan yang terkontaminasi) dan berkembang biak di usus, dari sana ia dapat menyerang sistem saraf dan menyebabkan kelumpuhan. Tidak ada obat untuk polio, sehingga pencegahan melalui vaksinasi adalah satu-satunya cara untuk mengendalikan penyebaran penyakit ini (Karingga & Hikmah, 2024). Menurut Satari et al. (2016) di Indonesia ada dua jenis vaksin polio yang dapat di berikan ke pasien yaitu:

1. *Oral poliovirus vaccine* (OPV)

OPV sering disebut sebagai vaksin polio Sabin sesuai nama penemunya, bentuk trivalen (tOPV) untuk mencegah tiga jenis virus polio. Vaksin tOPV adalah vaksin hidup yang dilemahkan (*liveattenuated virus vaccine*), diberikan tiga dosis secara serial untuk memberikan kekebalan seumur hidup. Vaksin polio oral lebih efektif untuk pemberantasan poliomiелitis, karena virus yang dilemahkan akan mengadakan replikasi di traktus gastrointestinalis bagian bawah.

2. *Inactivated poliovirus vaccine* (IPV)

Vaksin IPV berisi virus inaktif, berisi 3 tipe virus polio liar. Vaksin yang disuntikkan akan memunculkan imunitas yang dimediasi IgG dan mencegah terjadinya viremia serta melindungi motor neuron. Vaksin IPV mampu mencegah kelumpuhan karena menghasilkan antibodi netralisasi yang tinggi. Pada tahun 1980an, komposisi awal IPV

yang ditemukan Salk dikembangkan sehingga memiliki kandungan antigen yang lebih tinggi, dikenal sebagai *enhanced potency* IPV (eIPV) dan digunakan sampai sekarang. Pemberian IPV pada berbagai studi dilaporkan dapat menyebabkan serokonversi terhadap ketiga tipe virus polio sebesar 94% setelah pemberian dua dosis dan 99-100% setelah pemberian injeksi 3 dosis.

2.2.4 Metode *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP)

MILP merupakan pendekatan optimasi matematis yang menggabungkan variabel kontinu dan diskrit, serta mampu memformulasikan fungsi tujuan dan kendala secara linier (Zarlis & Efendi, 2020). Metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) memiliki karakteristik yang mirip dengan model *linear programming* (LP). Namun, perbedaannya adalah bahwa model MILP memiliki fungsi dan batasan tujuan linier, atau beberapa variabel keputusan adalah bilangan bulat. Metode MILP dapat memberikan pengoptimalan global untuk setiap solusi yang teridentifikasi, di mana diperlukan variabel bilangan bulat (Zhagi et al., 2022). Berikut adalah formulasi matematis model: (Santoso & Heryanto, 2022).

Model Matematis:

Fungsi Tujuan (*Objective Function*):

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L Q_{ij} X_{ij} Y_{jl} \quad [1]$$

Batasan Masalah (*Constraint*):

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L Y_{jl} \leq P \quad \forall i \quad [2]$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} \geq 1 \quad \forall i \forall j \forall I \quad [3]$$

$$X_{ij} \leq h_{ij} Y_{jl} \quad \forall j \quad [4]$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{ij} X_{ij} \leq K_1 Y_{jl} \quad \forall j \quad [5]$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{ij} X_{ij} = d_i \quad \forall i \quad [6]$$

$$Q_{ij} \leq X_{ij} \cdot M \quad \forall i \forall j \quad [7]$$

$$Y_{jl} = [0,1] \quad \forall j \quad [8]$$

$$X_{ij} = [0,1] \quad \forall i \forall j \quad [9]$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_l \leq B \quad [10]$$

$$\sum_{l=1}^L Y_j \leq 1 \quad \forall j \quad [11]$$

Fungsi tujuan [1] menjelaskan fungsi tujuan dari pengembangan model pada penelitian ini yaitu maksimasi permintaan produk yang dapat di-cover suatu DC yang dibangun. Berikutnya fungsi [2] adalah kendala yang menjabarkan jumlah maksimal dari DC

yang dapat dibangun. Fungsi [3] dan fungsi [4] adalah kendala yang menjabarkan bahwa paling tidak kebutuhan produk dapat terpenuhi oleh DC yang dibangun oleh DC j . Fungsi berikutnya [5] adalah kendala yang menjabarkan jumlah produk yang dikirimkan dari DC j ke *demand node* i tidak diizinkan melebihi dari jumlah produk yang tersedia di DC j . Fungsi [6] adalah kendala yang menjabarkan jumlah minimal produk yang dikirim harus sama dengan jumlah permintaan yang terdapat pada tiap *demand node*. Fungsi [7] adalah kendala yang dapat digunakan pada saat demand pada node i dipenuhi oleh DC j . Kemudian, fungsi [8] dan [9] adalah kendala biner yaitu fungsi kendala yang menunjukkan DC j dibuka (1) atau kebalikannya tidak dibuka (0) dan produk akan dikirimkan ke *demand node* (1) atau tidak dikirimkan (0). Kendala [10] menjamin bahwa kebutuhan biaya membangun DC memenuhi anggaran yang tersedia dan kendala [11] menjamin paling banyak sebuah tipe DC dibangun pada setiap DC.

2.2.5 Metode Validasi

Terdapat dua validasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Validasi Konseptual/*Face Validation*

Face validation dapat dicapai dengan kehadiran pakar di bidang yang diteliti atau secara psikometrik seseorang yang kurang berpengalaman memberikan tingkat kesesuaian instrumen yang diukur dengan tujuan kuantitatif yang diinginkan. Hal ini merupakan proses penting dalam prosedur pelaporan validitas (Masuwai et al., 2024). Validitas wajah dapat ditentukan menggunakan metode kualitatif atau kuantitatif. Pendekatan kualitatif biasanya melibatkan wawancara tatap muka atau diskusi kelompok terfokus di mana partisipan diberikan item individual dan diminta untuk memberikan pendapat mereka tentang masing-masing item (Allen et al., 2023).

2. Validasi Statistik

Validasi statistik adalah serangkaian pengujian untuk memastikan apakah suatu instrumen atau model memenuhi kriteria validitas, yang dibuktikan melalui uji statistik seperti validitas konstruk, konvergen, dan diskriminan (Joseph F. Hair Jr. et al., 2010).

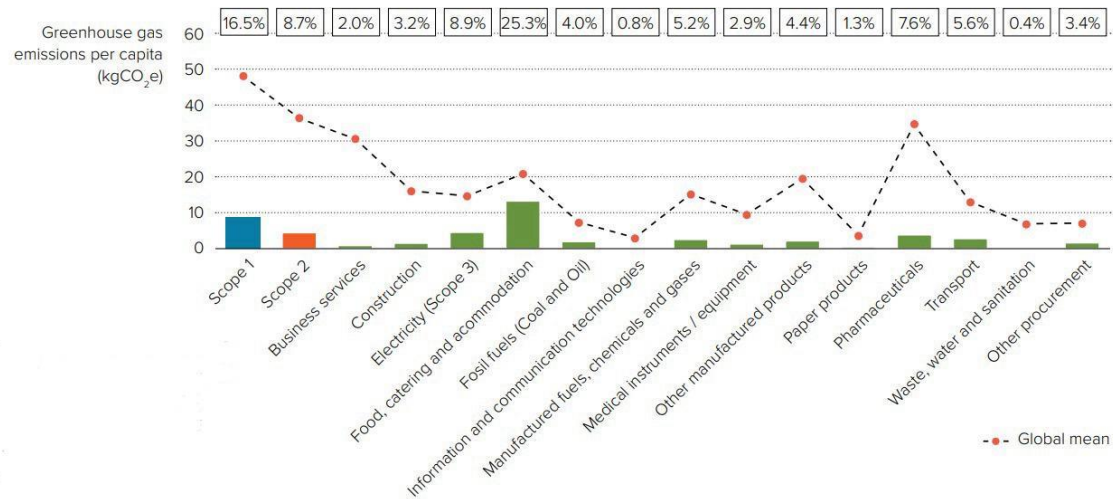
Pada penelitian ini validasi dilakukan sebanyak dua kali, validasi pertama dilakukan untuk memastikan model konseptual yang dikembangkan sesuai dengan kondisi nyata dan dapat menggabungkan dua fungsi objektif yang saling bertolak belakang dengan *face validation* melalui *expert* di bidang pengembangan model MILP dan yang kedua dilakukan untuk memastikan hasil model *software* yang dikembangkan sesuai dengan kondisi nyata dengan validasi statistik menggunakan metode *t-test*.

2.2.6 Emisi Karbon

Emisi karbon adalah gas yang dikeluarkan dari hasil pembakaran senyawa yang mengandung karbon seperti CO₂, solar, *Liquefied Petroleum Gas* (LPG), dan bahan bakar lainnya. Secara sederhana emisi karbon adalah pelepasan karbon ke atmosfer (Nugroho & Rianto, 2022). Emisi karbon merupakan salah satu jenis dari emisi gas rumah kaca. Gas ini banyak dihasilkan dari aktivitas sehari-hari manusia yang utamanya merupakan pembakaran misalnya penggunaan kendaraan bermotor, aktivitas pembangkit listrik, kegiatan industri dan lain-lain. Pada tahun 2019 emisi karbon perkapita di Indonesia adalah sebesar 2,30ton CO₂e. Angka ini terus mengalami kenaikan sejak tahun 2013 (Pusparini et al., 2023).

Indonesia termasuk salah satu negara dengan tingkat emisi karbon terbesar di dunia, menempati posisi keenam secara global dan pertama di Asia Tenggara. Emisi karbon Indonesia mencapai puncaknya pada 2019 sebesar 581 juta ton CO₂ ekuivalen (MtCO₂e), dengan sektor industri memberikan kontribusi terbesar (37%), diikuti oleh transportasi dan pembangkit listrik masing-masing 27%. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, total emisi karbon yang dihasilkan dari transportasi pada tahun 2021 dan 2022 mengalami peningkatan sebanyak 22,31% dari 66.292,3ton menjadi 81.082,4ton. Aktivitas industri yang menggunakan energi fosil menjadi sumber utama emisi karbon, baik secara langsung maupun tidak langsung melalui produksi listrik dan pemanasan industri (Wahyuningsih et al., 2025).

Rumah sakit menghasilkan emisi karbon dioksida dalam jumlah yang lebih besar dan menggunakan lebih banyak energi dibandingkan dengan bangunan komersial (Triwidawati et al., 2024). Mengutip kajian dari WHO di tahun 2020, menyatakan sektor kesehatan berkontribusi sekitar 4,6% dari total emisi global setara dengan 2 gigaton karbon dioksida. Pada tahun 2014 peralatan medis dan sektor farmasi menyumbang masing-masing 2,9% dan 7,6% terhadap emisi karbon per kapita di Indonesia yang di tunjukkan pada Gambar 2. 1



Gambar 2. 1 Grafik Sektor Penyumbang Emisi Karbon per Kapita

Sumber: Healt Care Without Harm

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Subjek Penelitian

Subjek pada penelitian ini adalah vaksin polio di Rumah Sakit Universitas Islam Indonesia.

3.2 Objek Penelitian

Objek pada penelitian ini berfokus pada strategi perencanaan distribusi vaksin polio yang bertujuan untuk memaksimalkan profit dan meminimalkan emisi karbon.

3.3 Data Penelitian

Berikut ini merupakan data penelitian yang digunakan pada penelitian ini:

1. Data Primer

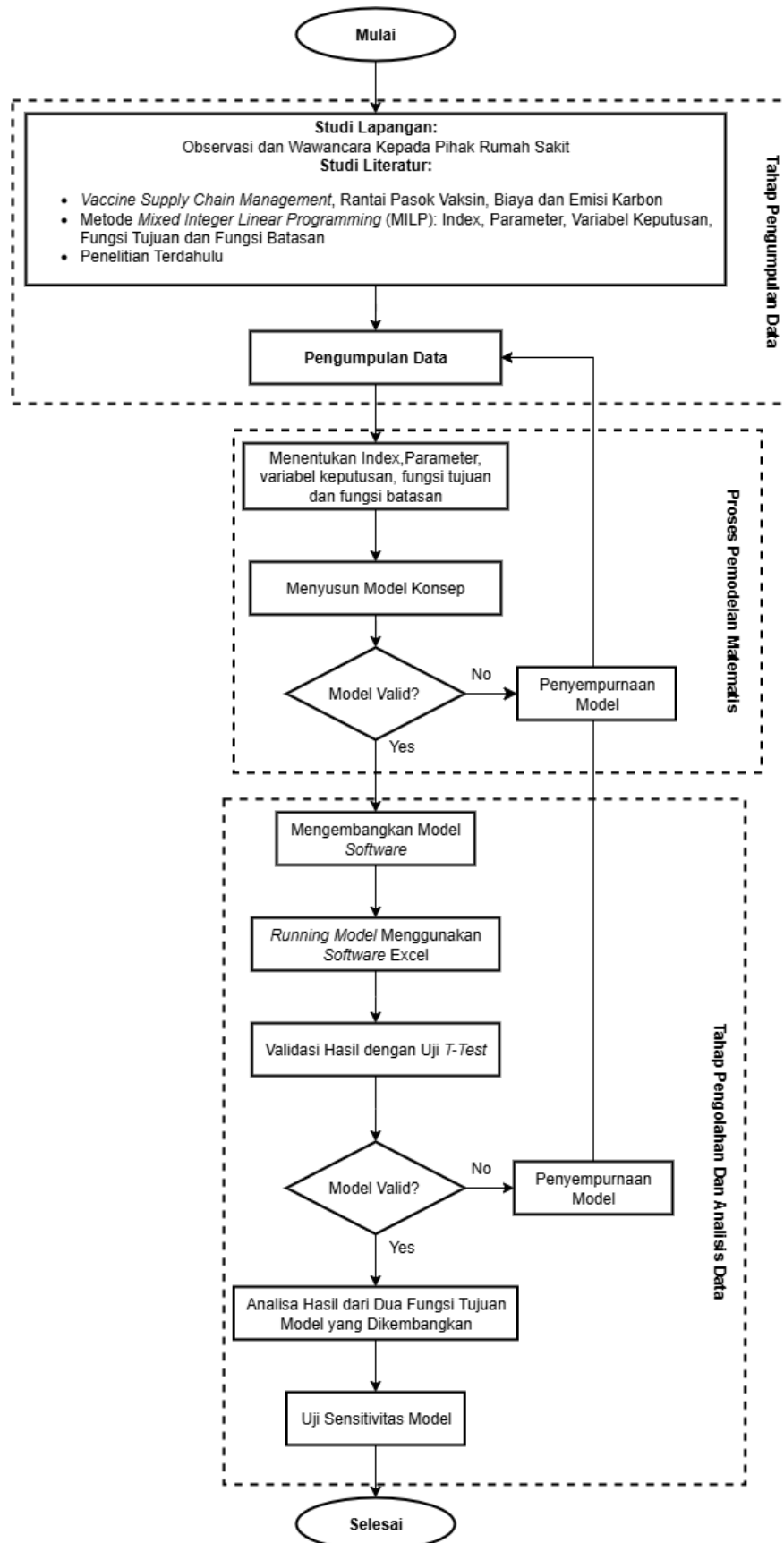
Data primer adalah data yang diperoleh langsung dari sumber utama melalui metode seperti observasi dan wawancara yang dilakukan secara langsung oleh peneliti. Pada penelitian ini, data primer didapatkan dari hasil observasi wawancara bersama penanggung jawab dari pihak rumah sakit yang mencakup data jenis vaksin, kendaraan dan sebagainya.

2. Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang telah dikumpulkan dan dipublikasikan sebelumnya oleh pihak lain, seperti jurnal, buku, laporan atau data dari lembaga resmi. Pada penelitian ini, data sekunder berupa penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini dan juga laporan dari pihak rumah sakit terkait penggunaan vaksin pada tiap bulannya.

3.4 Alur Penelitian

Berikut ini merupakan alur penelitian yang ditunjukkan dengan *flowchart* pada Gambar 3. 1



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

1. Mulai

Proses dimulai dengan menetapkan tujuan peneliti yang berfokus pada strategi perencanaan distribusi vaksin polio. Dalam tahap pertama ini dilakukan diskusi dengan pembimbing untuk memahami lingkup penelitian secara menyeluruh.

2. Studi Lapangan

Studi lapangan mencakup observasi langsung ke rumah sakit UII untuk mengidentifikasi jenis vaksin, juga aktivitas dalam rantai pasok dan wawancara langsung dengan pihak penanggung jawab rumah sakit UII untuk memperoleh pemahaman terkait alur rantai pasok dan mendapatkan data yang diperlukan.

3. Studi Literatur

Penelitian diperkuat dengan kajian pustaka yang mencakup:

- Konsep *Vaccine Supply Chain Management* dan rantai pasok vaksin.
- Biaya distribusi dan perhitungan emisi karbon.
- Metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) meliputi indeks, parameter, variabel keputusan, fungsi tujuan, dan fungsi batasan.
- Referensi dari penelitian terdahulu yang relevan.

4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan informasi yang relevan sebagai dasar analisis, data yang dibutuhkan berupa biaya-biaya yang dibutuhkan pada pengelolaan vaksin polio, kapasitas kendaraan dan estimasi emisi karbon yang dihasilkan dari proses distribusi vaksin polio.

5. Menentukan Indeks, Parameter, Variabel Keputusan, Fungsi Tujuan, dan Fungsi Batasan

Pada tahap ini, elemen-elemen dasar model MILP ditentukan. Index digunakan untuk menunjukkan entitas, parameter sebagai input tetap, variabel keputusan sebagai hasil yang dicari, fungsi tujuan berupa minimasi biaya dan emisi karbon, serta fungsi batasan sebagai kendala operasional rantai pasok vaksin.

6. Menyusun Model Konsep

Berdasarkan index, parameter, variabel keputusan, fungsi tujuan, dan fungsi batasan, disusun model matematis konseptual. Model ini merepresentasikan sistem nyata rantai pasok vaksin ke dalam bentuk formulasi MILP.

7. Validasi Model (Konseptual)

Model konseptual dievaluasi apakah sudah sesuai dengan kondisi nyata.

- Jika belum valid → dilakukan penyempurnaan model.
- Jika valid → penelitian dilanjutkan ke tahap berikutnya.

8. Mengembangkan Model *Software*

Pada tahap ini data model konsep diolah ke dalam model *software* untuk menjalankan skenario strategi produksi dan distribusi untuk melihat hasil dan dampaknya.

9. *Running Model* Menggunakan *Software* Excel

Model dijalankan menggunakan perangkat lunak Excel sebagai alat bantu komputasi untuk menyelesaikan formulasi MILP.

10. Validasi Hasil Uji T-Test

Pada tahap ini dilakukan uji t-test untuk memastikan apakah hasil optimal sudah sesuai dengan data riil

11. Validasi Model (Hasil)

Pada tahap ini dilakukan evaluasi untuk memastikan bahwa model yang dibangun sesuai dengan kondisi nyata dan dapat menjawab permasalahan penelitian.

- Jika model belum valid → dilakukan penyempurnaan model.
- Jika model valid → penelitian dilanjutkan ke tahap berikutnya.

12. Analisa Hasil dari Model yang Dikembangkan

Menganalisis hasil *output* model untuk menilai strategi terbaik dalam hal maksimasi profit dan minimasi emisi karbon.

13. Uji Sensitivitas Model

Melakukan pengujian sensitivitas model untuk melihat seberapa perubahan hasil optimasi jika terjadi adanya perubahan input data seperti data *stock* dan distribusi.

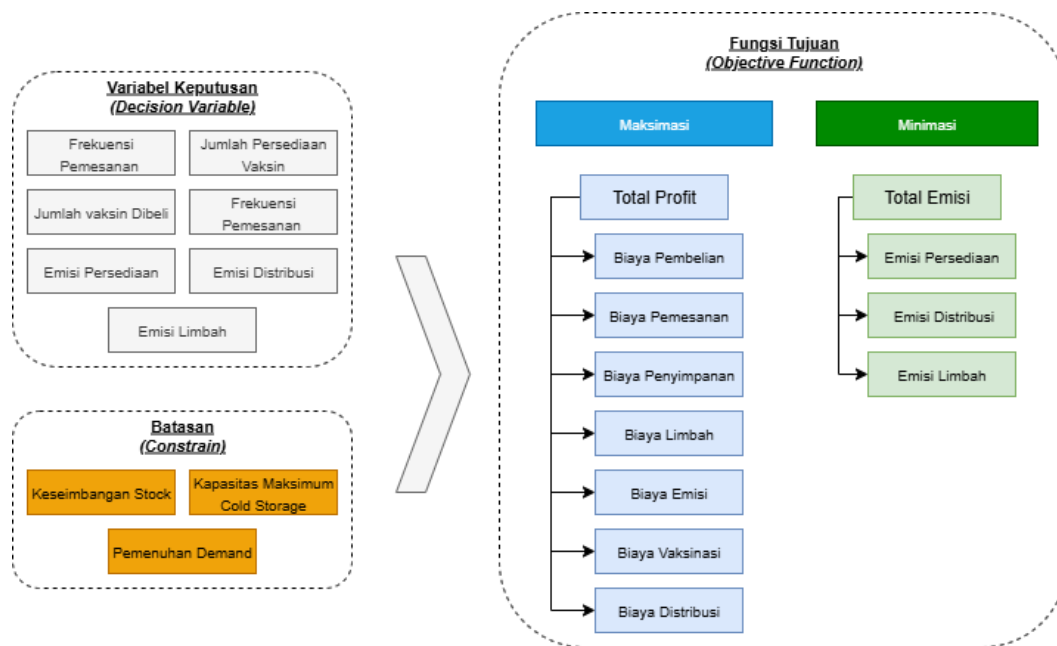
14. Selesai.

BAB IV

PENGEMBANGAN MODEL DAN PENGUMPULAN DATA

4.1 Pengembangan Model Matematis

Pengembangan model yang dilakukan mempertimbangan model dari Georgiadis (2021) dengan memodifikasi pada penambahan fungsi tujuan (*objective function*) emisi karbon dan modifikasi model yang dilakukan oleh Jeremi & Vanany (2023) dengan memodifikasi jenis objek yang diteliti.



Gambar 4. 1 Komponen keputusan, Batasan dan Tujuan Model

Dari modifikasi yang telah dilakukan didapatkan persamaan fungsi model matematis baru dengan gambaran singkat komponen model matematis dapat dilihat pada Gambar 4. 1, dan untuk lebih jelasnya berikut adalah model matematis pada penelitian ini.

Objective 1: Maximize total profit, Z^1

$$\begin{aligned}
z1 = & \sum_{t=1}^T PR_t \cdot us_t \\
& - \left[\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BE_{st} \cdot ue_{st} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T BP_{st} \cdot uvak_{st} + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T [KB \cdot B \cdot (ue_{st} \cdot S_s)] \right. \\
& + \sum_{t=1}^T BN_t \cdot pv_t + \sum_{t=1}^T BS_t \cdot us_t + \sum_{t=1}^T BL_t \cdot PL_t(\%) \cdot us_t \\
& \left. + \sum_{t=1}^T BC_t \cdot \left(es_t + \sum_{s=1}^S ed_t + el_t \right) \right]
\end{aligned}$$

Pada fungsi tujuan pertama adalah memaksimalkan total keuntungan (profit) yang terdiri dari total penjualan dikurangi total biaya pemesanan, biaya pembelian, biaya distribusi vaksin, biaya penyimpanan, biaya operasional penggunaan vaksin, biaya limbah vaksin, dan biaya emisi karbon. Pengembangan model ini telah dimodifikasi sesuai dengan kondisi pada studi kasus pengelolaan vaksin polio di rumah sakit UII dan memfokuskan penelitian pada poses pendistribusiannya.

Objective 2: Minimize total emisi karbon, Z^2

$$z2 = \sum_{t=1}^T EE_t \cdot pv_t + \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T EK_{st} \cdot ue_{st} \cdot S_s + \sum_{t=1}^T EO_t \cdot PL_t(\%) \cdot us_t$$

Pada fungsi tujuan kedua yaitu meminimumkan total emisi karbon pada proses pendistribusian vaksin polio dan juga pendistribusian limbah kesehatan. Dengan model *multi-objective* untuk menyeimbangkan nilai antara dua tujuan tersebut digunakan metode *weighted sum*, dengan fomulasi sebagai berikut:

$$\textbf{Maximize} = (\alpha * Z1) - (\beta * Z2)$$

Pada formulasi tersebut menjelaskan adanya asumsi pembobotan jika dilakukan maksimasi pofit. Besar bobot pada studi kasus ini berdasarkan pendapat dari pihak rumah sakit adalah 80% atau 0,8 untuk maksimasi profit (α) dan 20% atau 0,2 untuk minimasi emisi karbon (β).

Subject to

$$\sum_{s=1}^S uvak_{st} + pv_{t-1} = us_t + pv_t$$

$$\begin{aligned}
us_t &= D_t \\
\left(\frac{uvak_{st}}{KT}\right) &\leq ue_{st} \\
KKI &\leq pv_t \leq KKA
\end{aligned}$$

Pada fungsi pembatas (*constraints*) diatas menunjukkan jumlah pemesanan vaksin i yang terdapat pada kulkas penyimpanan dan tingkat pemesanan vaksin i kepada *supplier* pada periode t , harus kurang dari kapasitas kulkas penyimpanan vaksin yang ada di rumah sakit. Kapasitas kulkas penyimpanan vaksin tidak boleh kurang dari sama dengan kapasitas minimum dan tidak boleh melebihi dari kapasitas maksimum.

Berikut ini merupakan keterangan dari simbol-simbol indeks, parameter dan juga variabel keputusan dari model matematis yang dikembangkan dengan pendefinisian simbol berasal dari peneliti sendiri.

Indeks:

- s : Jumlah pemasok vaksin polio, $s \in S$
 t : Periode waktu, $t \in T$

Parameter:

- D_t : Jumlah permintaan penyuntikan untuk vaksin IPV di RS UII periode t (pcs).
 PR_t : Harga jual produk vaksin IPV pada setiap pasien pada periode t (Rp/pcs).
 BE_{st} : Biaya pemesanan kepada *supplier* s vaksin IPV pada periode t (Rp/pesan).
 BP_{st} : Biaya pembelian kepada *supplier* s vaksin IPV pada periode t (Rp/pcs).
 BN_t : Biaya penyimpanan vaksin IPV pada rumah sakit pada periode t (Rp/pcs).
 BS_t : Biaya alat bantu penggunaan vaksin IPV pada periode t (Rp/pcs).
 BL_t : Biaya limbah vaksin IPV pada periode t (Rp/kg).
 BC_t : Biaya emisi CO₂ untuk setiap vaksin IPV pada periode t (Rp/lit.CO₂-eq).
 PL_t : Tingkat persentase timbulan limbah vaksin IPV pada periode t (%).
 EE_t : Tingkat emisi untuk energi listrik yang digunakan pada proses penyimpanan vaksin IPV di rumah sakit pada periode t (lt.CO₂-eq/pcs).
 EK_{st} : Tingkat emisi untuk distribusi dari *supplier* s ke rumah sakit untuk vaksin IPV pada periode t (lt.CO₂-eq/km).
 EO_t : Tingkat emisi untuk pengolahan limbah vaksin IPV di rumah sakit pada periode t (lt.CO₂-eq/pcs).
 S_s : Jarak dari *supplier* s ke rumah sakit pada periode t (km)

- KT : Kapasitas transportasi kendaraan (pcs).
 B : Biaya bahan bakar kendaraan (Rp/liter).
 KB : Konsumsi bahan bakar kendaraan (liter/km).
 KKI : Kapasitas minimal penyimpanan (pcs)
 KKA : Kapasitas maksimum penyimpanan (pcs)

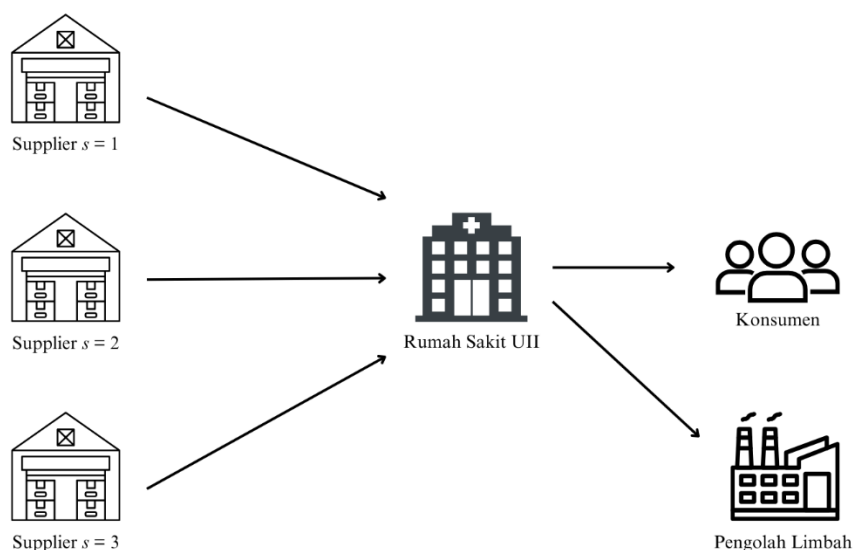
Variabel keputusan:

- us_t : Jumlah penggunaan setiap vaksin IPV pada periode t (pcs).
 ue_{st} : Frekuensi pemesanan kepada *supplier* s untuk vaksin IPV pada periode t (kali).
 $uvak_{st}$: Jumlah yang dibeli kepada *supplier* s untuk vaksin IPV pada periode t (pcs).
 pv_t : Jumlah persediaan vaksin IPV di rumah sakit pada periode t (pcs).
 $es_t = EE_t \cdot pv_t$: Jumlah emisi persediaan vaksin ipv di rumah sakit periode t (lt.CO₂-eq).
 $ed_{st} = EK_{st} \cdot ue_{st} \cdot S_s$: Emisi distribusi dari *supplier* s vaksin IPV periode t (lt.CO₂-eq).
 $el_t = EO_t \cdot PL_t(\%) \cdot us_t$: Emisi limbah vaksin IPV di rumah sakit periode t (lt.CO₂-eq).

4.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan di rumah sakit UII yang berlokasi di Bantul, Yogyakarta. Rangkaian kegiatan yang dilakukan meliputi penerimaan vaksin polio dari *supplier*, penyimpanan di kulkas rumah sakit untuk menjaga kondisi suhu dan kualitas vaksin, penyuntikan vaksin kepada pasien dan pengolahan limbah vaksin yang telah digunakan.

Penelitian ini berfokus pada rumah sakit UII sebagai penyedia layanan vaksinasi ke konsumen, kemudian terdapat tiga *supplier* ($s = 1, 2, 3$) utama yang menyediakan stok vaksin polio di rumah sakit dan terdapat pihak yang bekerja sama dengan rumah sakit untuk menampung dan mengolah limbah yang telah dihasilkan dari rumah sakit.



Gambar 4. 2 Alur Rantai Pasok Penyediaan Vaksin Polio

Dalam kegiatan penyediaan vaksin polio, proses vaksinasi dan pembelian stok vaksin dilakukan hampir pada setiap bulanya dengan jumlah yang berbeda-beda. Produk vaksin polio sendiri membutuhkan mesin pendingin (*cold storage*) dengan suhu $2^{\circ}\text{--}8^{\circ}\text{C}$, dengan kapasitas 211 liter untuk semua jenis vaksin. Jarak antara rumah sakit dan *supplier* ($s = 1, 2, 3$) adalah 26 km, 15 km dan 13 km. Rumah sakit UII bekerja sama dengan pihak ketiga dalam menangani limbah medis yang di hasilkan dari segala aktivitas medis maupun non-medis, pada proses ini pihak ketiga akan mengambil limbah yang telah di kumpulkan rumah sakit dengan waktu 3-4 kali dalam seminggu. Pada proses vaksinasi, pasien akan datang langsung mengunjungi rumah sakit.

Tabel 4. 1 Data Pada Lokasi Studi Kasus

Parameter	Nilai	Satuan
D_t	1263	Pcs
PR_t	45000	Rp/pcs
BE_{st}	25000	Rp/pesan
BP_{st}	U [300,000;355,000]	Rp/pcs
BN_t	6180	Rp/pcs
BS_t	4200	Rp/pcs
BL_t	52	Rp/pcs
BC_t	30	Rp/ lt.CO2-eq
PL_t	92	Persen
EE_t	81,4	lt.CO2-eq/pcs
EK_{st}	3,9	lt.CO2-eq/km
EO_t	6,56	lt.CO2-eq/pcs

Parameter	Nilai	Satuan
S_s	13, 15 dan 26	Km
KT	750 dan 800	Pcs
B	10000	Rp/liter
KB	0,08 dan 0,125	liter/km
KKI	5	Pcs
KKA	4000	Pcs

Tabel 4. 2 Data Permintaan Vaksin Polio Pada Tiap Periode

Periode	Jumlah
Januari 2024	30
Februari 2024	75
Maret 2024	43
April 2024	43
Mei 2024	102
Juni 2024	63
Juli 2024	102
Agustus 2024	77
September 2024	77
Oktober 2024	173
November 2024	72
Desember 2024	66
Januari 2025	70
Februari 2025	57
Maret 2025	64
April 2025	73
Mei 2025	76
Total	1263

Pada Tabel 4. 1 menampilkan data yang diperoleh dari hasil wawancara dengan pihak rumah sakit dan juga asumsi yang realistis, data-data tersebut akan digunakan untuk merancang model matematis menggunakan *solver* dari excel, kemudian pada Tabel 4. 2 menunjukkan data permintaan untuk vaksin polio di rumah sakit.

4.3 Validasi dan Hasil

Tahap validasi dilakukan dengan cara menjalankan model (*running model*) yang telah dikembangkan menggunakan *solver* dari excel, ketika model dijalankan dan tidak terjadi *error* pada proses tersebut maka model dapat dinyatakan benar. Selain itu juga, tahap validasi model dilakukan dengan cara mengkonfirmasi kepada pihak rumah sakit dengan tujuan untuk memastikan kesesuaian data dan hasil penelitian terhadap kondisi yang sebenarnya. Validasi model dilakukan menggunakan *t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances*. Hipotesis yang digunakan menguji model yaitu:

H0: Tidak ada perbedaan rata-rata antara data awal dan data optimal

H1: Ada perbedaan rata-rata antara data awal dan data optimal

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	<i>data awal</i>	<i>data optimal</i>
Mean	157317939,6	163529127,2
Variance	8,72416E+15	7,71018E+14
Observations	11	11
Pooled Variance	4,74759E+15	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	20	
t Stat	-0,211407002	
P(T<=t) one-tail	0,417354513	
t Critical one-tail	1,724718243	
P(T<=t) two-tail	0,834709026	
t Critical two-tail	2,085963447	

Gambar 4. 3 Hasil Validasi dengan *t-Test*

Hasil uji *t* menunjukkan nilai *t Stat* sebesar -0,2114 yang lebih kecil dari *t Critical two-tail* sebesar $\pm 2,0859$, serta nilai *P-value two-tail* sebesar 0,8347 yang jauh lebih besar dari $\alpha = 0,05$. Berdasarkan hasil tersebut, keputusan yang diambil adalah H0 diterima sehingga tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata data awal dan data optimal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model yang digunakan valid karena hasil optimasi tidak berbeda secara signifikan dari data awal. Pada Gambar 4. 4 menampilkan batasan (*constraint*) yang dimasukkan kedalam *solver*, setelah menentukan batasan dan memastikannya sesuai dengan model yang di kembangkan, langkah selanjutnya adalah menjalankan model matematis dengan hasil *running solver* ditunjukkan pada Gambar 4. 5 yang menjelaskan bahwa *solver* telah menemukan solusi optimal berdasarkan model yang dikembangkan.

Solver Parameters

Set Objective:

To: ☒ Max ☐ Min ☐ Value Of:

By Changing Variable Cells:

Subject to the Constraints:

\$AP\$11:\$BF\$11 = \$B\$11:\$BX\$11

\$AP\$15:\$BF\$17 <= \$B\$15:\$BX\$17

\$AP\$21:\$BF\$21 <= \$B\$21:\$BX\$21

\$AP\$7:\$BF\$7 = \$B\$7:\$BX\$7

\$B\$21:\$BX\$21 <= \$B\$21:\$CP\$21

\$W\$12:\$AM\$14 = integer

\$W\$12:\$AM\$14 >= 0

\$W\$19:\$AM\$21 = integer

\$W\$19:\$AM\$21 >= 0

\$W\$26:\$AM\$26 = integer

\$W\$26:\$AM\$26 >= 0

☒ Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method:

Options

Solving Method

Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

[Help](#) [Solve](#) [Close](#)

Gambar 4. 4 Constraint

Result - Optimal solution found			
Objective value:	-156305421.62556899		
Enumerated nodes:	0		
Total iterations:	67		
Time (CPU seconds):	0.02		
Time (Wallclock seconds):	0.02		
Total time (CPU seconds):	0.03	Time (Wallclock seconds):	0.03

Gambar 4. 5 Temuan Hasil Optimal

Tabel 4. 3 Perbandingan Data Riil dan Optimal

Parameter	Data Riil	Data Optimal	Selisih
Pendapatan	Rp.568.350.000,00	Rp.568.350.000,00	0%
Biaya Pemesanan	Rp.1.575.000,00	Rp.300.000,00	-81%
Biaya Pembelian	Rp.389.640.000,00	Rp.391.448.000,00	0,5%
Biaya Penyimpanan	Rp.7.107.000,00	Rp.4.542.300,00	-36%
Biaya Vaksinasi	Rp.5.304.600,00	Rp.5.304.600,00	0%
Biaya Limbah	Rp.60.421,92	Rp.60.421,92	0%
Biaya Emisi	Rp.3.177.490,73	Rp.2.045.773,73	-36%

Parameter	Data Riil	Data Optimal	Selisih
Biaya Distribusi	Rp.1.048.550,00	Rp.187.100,00	-82%
Total Profit	Rp.160.436.937,35	Rp.164.461.804,35	3%
Emisi Persediaan	93610,0	59829,0	-36%
Emisi Kendaraan	4683,9	741	-84%
Emisi Limbah	7622,5	7622,5	0%
Total Emisi	105916,4	68192,5	-36%

Pada Tabel 4. 3 menunjukkan terjadinya perbedaan terhadap beberapa parameter biaya yang akhirnya mempengaruhi fungsi tujuan yang pertama dan kedua yaitu total profit dan total emisi karbon. Dari tabel tersebut terdapat penurunan beberapa parameter biaya yang mempengaruhi fungsi tujuan pertama seperti biaya pemesanan yang turun sebesar -81%, biaya penyimpanan --36%, biaya emisi -36%, biaya distribusi -82% dan terdapat juga peningkatan pada biaya pembelian sebanyak 0,5%. Kemudian juga parameter emisi penyimpanan dan emisi kendaraan mengalami penurunan sebesar -36% dan -84%. Hal tersebut menjadikan adanya peningkatan pada total profit sebesar Rp.4.024.867,00 dan penurunan emisi karbon sebesar 37723,9 lt.CO2-eq/pcs/km sehingga dapat disimpulkan bahwa model matematis pada penelitian ini dinyatakan valid.

Tabel 4. 4 Jumlah Penggunaan Vaksin; us_t

Periode (t)	Sebelum	Sesudah
T1	30	30
T2	75	75
T3	43	43
T4	43	43
T5	102	102
T6	63	63
T7	102	102
T8	77	77
T9	77	77
T10	173	173
T11	72	72
T12	66	66
T13	70	70
T14	57	57
T15	64	64
T16	73	73
T17	76	76
Total	1263	1263

Pada Tabel 4. 4 menunjukkan data jumlah penggunaan dari vaksin polio di rumah sakit setelah dilakukannya *running model*, data tersebut tidak mengalami perubahan dari data awalnya.

Tabel 4. 5 Frekuensi Pemesanan Kepada *Supplier* (Sebelum)

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	2	1	1	4
T2	2	2	0	4
T3	1	1	1	3
T4	2	1	2	5
T5	1	1	1	3
T6	2	1	1	4
T7	2	2	0	4
T8	1	1	1	3
T9	2	1	1	4
T10	1	1	1	3
T11	1	1	1	3
T12	2	2	0	4
T13	1	2	0	3
T14	1	2	1	4
T15	2	1	2	5
T16	2	1	1	4
T17	1	1	1	3
Total	26	22	15	63

Tabel 4. 6 Frekuensi Pemesanan Kepada *Supplier*; ue_{st}

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	0	0	1	1
T2	0	0	1	1
T3	0	1	0	1
T4	0	0	0	0
T5	1	0	0	1
T6	0	1	0	1
T7	0	0	1	1
T8	0	0	1	1
T9	0	0	0	0
T10	0	0	0	0
T11	0	1	0	1
T12	1	0	0	1
T13	0	0	0	0
T14	0	0	0	0
T15	0	1	0	1
T16	0	0	1	1
T17	0	0	1	1

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
Total	2	4	6	12

Pada Tabel 4. 6 menunjukkan hasil optimal frekuensi pemesanan kepada *supplier* dengan total pemesanan berjumlah 12 kali dalam 17 periode dan jumlah frekuensi terbanyak di pesan dari *supplier* 3 dengan jumlah 6 kali, dimana hasil ini mengalami penerunan dari sebelum dilakukannya optimasi yang ditunjukkan pada Tabel 4. 5.

Tabel 4. 7 Jumlah Vaksin Yang Dibeli (Sebelum)

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	40	40	10	90
T2	40	30	0	70
T3	30	10	30	70
T4	30	10	10	50
T5	10	20	10	40
T6	20	20	0	50
T7	10	40	0	50
T8	80	30	0	110
T9	30	10	20	60
T10	30	30	10	70
T11	30	20	20	70
T12	30	30	10	60
T13	30	40	0	70
T14	20	20	20	60
T15	30	20	30	80
T16	40	10	10	60
T17	30	40	20	90
Total	530	420	200	1150

Tabel 4. 8 Jumlah Vaksin yang Dibeli; $uvak_{st}$

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	0	0	35	35
T2	0	0	75	75
T3	0	86	0	86
T4	0	0	0	0
T5	102	0	0	102
T6	0	63	0	63
T7	0	0	102	102
T8	0	0	327	327
T9	0	0	0	0
T10	0	0	0	0
T11	0	72	0	72

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T12	193	0	0	193
T13	0	0	0	0
T14	0	0	0	0
T15	0	64	0	64
T16	0	0	73	73
T17	0	0	76	76
Total	295	285	688	1268

Pada Tabel 4. 8 menunjukkan hasil optimal jumlah vaksin yang dibeli dengan total pembelian berjumlah 1268 buah vaksin dalam 17 periode dan jumlah pembelian terbanyak di pesan dari *supplier* 3 dengan jumlah 688 vaksin, dimana hasil ini mengalami penerunan dari sebelum dilakukannya optimasi yang ditunjukkan pada Tabel 4. 7.

Tabel 4. 9 Jumlah Persediaan Vaksin; pv_t

Periode (t)	Sebelum	Sesudah
T1	90	5
T2	70	5
T3	70	48
T4	50	5
T5	40	5
T6	50	5
T7	50	5
T8	110	255
T9	60	178
T10	70	5
T11	70	5
T12	60	132
T13	70	62
T14	60	5
T15	80	5
T16	60	5
T17	90	5
Total	1150	735

Pada Tabel 4. 9 menunjukkan hasil optimal jumlah persediaan vaksin di rumah sakit dengan total persediaan berjumlah 735 dan jumlah persediaan terbanyak terdapat pada periode 8 dengan jumlah 255. Dari tabel tersebut menunjukkan terjadinya perbedaan jumlah yang cukup signifikan, hal tersebut dipengaruhi oleh jumlah vaksinasi yang berbeda pada tiap periode dan juga perubahan pada frekuensi pembelian yang hanya menjadi 1 kali hampir disetiap periodenya. Pada tabel ini juga menunjukkan adanya perbedaan hasil dari sebelum dan sesudah optimasi.

Tabel 4. 10 Jumlah Emisi Persediaan Vaksin; es_t

Periode (t)	Sebelum	Sesudah
T1	732,6	407
T2	569,8	407
T3	569,8	3907,2
T4	407,0	407
T5	325,6	407
T6	407,0	407
T7	407,0	407
T8	895,4	20757
T9	488,4	14489,2
T10	569,8	407
T11	569,8	407
T12	488,4	10744,8
T13	569,8	5046,8
T14	488,4	407
T15	651,2	407
T16	488,4	407
T17	732,6	407
Total	9361,0	5982,9

Pada

Tabel 4. 10 menunjukkan hasil optimal jumlah emisi persediaan vaksin di rumah sakit dengan total emisi berjumlah 59829 lt.CO2-eq dan jumlah emisi terbanyak terdapat pada periode 8 dengan jumlah emisi 20757 lt.CO2-eq. Dari hasil optimasi ini, berhasil menurunkan total emisi persediaan dengan cukup banyak dari yang awalnya 9361,0 lt.CO2-eq.

Tabel 4. 11 Emisi Distribusi (Sebelum)

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	202,8	58,5	50,7	312
T2	202,8	117	0	319,8
T3	101,4	58,5	50,7	210,6
T4	202,8	58,5	101,4	362,7
T5	101,4	58,5	50,7	210,6
T6	202,8	58,5	50,7	312
T7	202,8	117	0	319,8
T8	101,4	58,5	50,7	210,6
T9	202,8	58,5	50,7	312
T10	101,4	58,5	50,7	210,6
T11	101,4	58,5	50,7	210,6
T12	202,8	117	0	319,8
T13	101,4	117	0	218,4
T14	101,4	117	50,7	269,1

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T15	202,8	58,5	101,4	101,4
T16	202,8	58,5	50,7	312
T17	101,4	58,5	50,7	210,6
Total	2636,4	1287	760,5	4683,9

Tabel 4. 12 Emisi Distribusi; ed_{st}

Periode (t)	Supplier (s)			Total
	1	2	3	
T1	0	0	50,7	50,7
T2	0	0	50,7	50,7
T3	0	58,5	0	58,5
T4	0	0	0	0
T5	101,4	0	0	101,4
T6	0	58,5	0	58,5
T7	0	0	50,7	50,7
T8	0	0	50,7	50,7
T9	0	0	0	0
T10	0	0	0	0
T11	0	58,5	0	58,5
T12	101,4	0	0	101,4
T13	0	0	50,7	50,7
T14	0	0	0	0
T15	0	58,5	0	58,5
T16	0	0	50,7	50,7
T17	0	0	50,7	50,7
Total	202,8	234	304,2	741

Pada Tabel 4. 12 menunjukkan hasil optimal jumlah emisi distribusi vaksin dengan total emisi berjumlah 741 lt.CO2-eq dan jumlah emisi terbanyak dihasilkan dari proses pendistribusian *supplier* 3 dengan jumlah emisi 304,2 lt.CO2-eq, dimana hasil ini mengalami penerunan dari sebelum dilakukannya optimasi yang ditunjukkan pada Tabel 4. 11.

Tabel 4. 13 Emisi Limbah; el_t

Periode (t)	Sebelum	Sesudah
T1	181,1	181,1
T2	452,6	452,6
T3	259,5	259,5
T4	259,5	259,5
T5	615,6	615,6
T6	380,2	380,2
T7	615,6	615,6
T8	464,7	464,7
T9	464,7	464,7

Periode (t)	Sebelum	Sesudah
T10	1044,1	1044,1
T11	434,5	435,5
T12	398,3	398,3
T13	422,5	422,5
T14	344,0	344,0
T15	386,3	386,3
T16	440,6	440,6
T17	458,7	458,7
Total	7622,5	7622,5

Pada Tabel 4. 13 menunjukkan hasil optimal jumlah emisi limbah vaksin dengan total emisi berjumlah 7622,5 lt.CO₂-eq dan jumlah emisi terbanyak terdapat pada periode 10 dengan jumlah emisi 1044,1 lt.CO₂-eq.

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Sensitivitas Model Optimasi

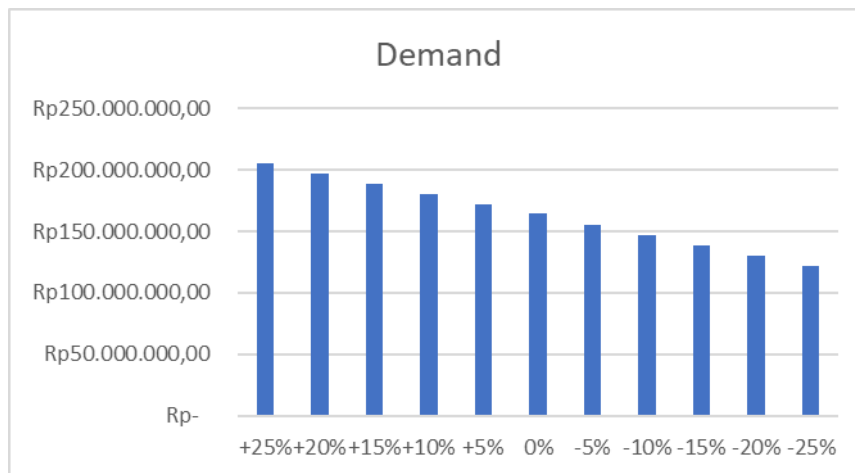
Pada sub bab ini akan dilakukan uji sensitivitas terhadap model optimasi dengan melihat perubahan terhadap hasil dari dua fungsi tujuan yaitu total profit dan total emisi karbon. Uji sensitivitas dilakukan dengan tujuan untuk mencari ambang batas dari variansi permintaan (*demand*), biaya pembelian dan biaya emisi yang menunjukkan seberapa sensitif model terhadap parameter tersebut.

Tabel 5. 1 Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Permintaan (*Demand*)

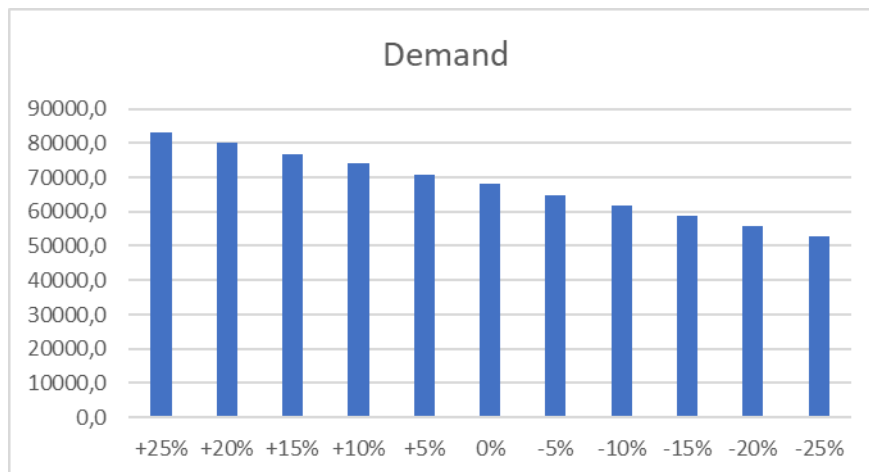
Kondisi Variansi Demand	Komponen Keputusan dan Tujuan			
	Total Profit (Rp)	Selisih Profit	Total Emisi (liter)	Selisih Emisi
25%	Rp.205.398.755,49	25%	83081,3	22%
20%	Rp.197.035.301,94	20%	80014,9	17%
15%	Rp.188.289.757,07	14%	76849,0	13%
10%	Rp.180.351.772,83	10%	73963,5	8%
5%	Rp.171.748.799,07	4%	70803,6	4%
0%	Rp.164.461.804,35	0%	68192,5	0%
-5%	Rp.154.909.454,86	-6%	64908,9	-5%
-10%	Rp.146.566.001,31	-11%	61842,5	-9%
-15%	Rp.138.368.496,86	-16%	58863,5	-14%
-20%	Rp.130.008.043,31	-21%	55797,1	-18%
-25%	Rp.121.682.211,76	-26%	52649,3	-23%

Dari hasil *running solver* uji sensitivitas variansi permintaan (*demand*) pada Tabel 5. 1, dimana pada tabel tersebut memperlihatkan bahwa variabel *demand* mempengaruhi fungsi tujuan secara linear, semakin meningkatnya *demand* maka semakin tinggi total profit yang didapatkan dan juga semakin tinggi emisi karbon yang dihasilkan, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5. 1 dan Gambar 5. 2. Kemudian pada kolom selisih profit dan selisih emisi menjelaskan persentase perubahan total profit dan juga total emisi karbon antara kondisi variansi *demand* (5%, 10%, ..., -25%) dengan kondisi eksisting (0%). Pada kolom selisih profit, perubahan terbesar mencapai -26% dengan selisih harga Rp.42.779.592,59 dan pada total emisi

karbon terdapat perubahan terbesar mencapai 22% dengan selisih emisi karbon 14888,9 lt.CO₂-eq.



Gambar 5. 1 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi *Demand*



Gambar 5. 2 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi *Demand*

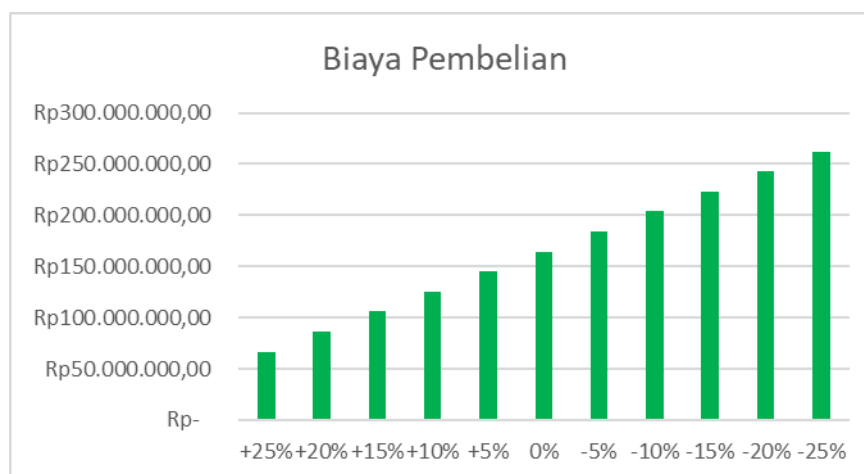
Dari grafik sensitivitas yang ditunjukkan Gambar 5. 1 dan Gambar 5. 2 menjelaskan bahwa kenaikan dan penurunan dari variansi *demand* juga mempengaruhi fungsi tujuan pertama dan kedua secara *linear*.

Tabel 5. 2 Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Pembelian

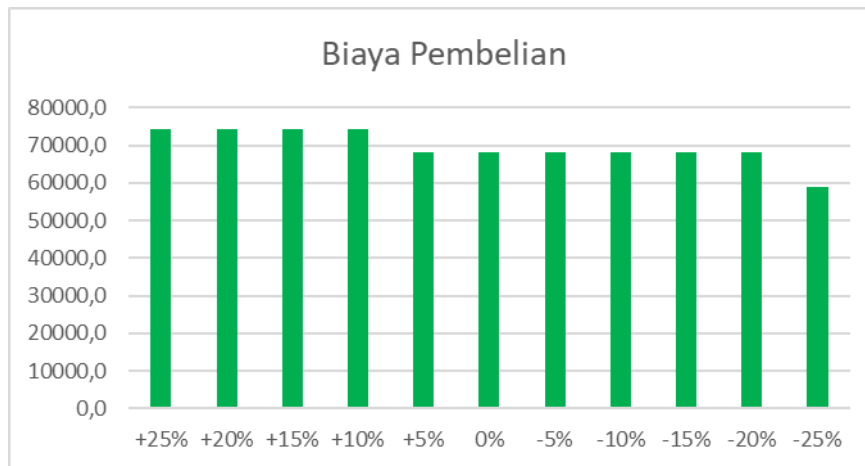
Kondisi Variansi Biaya Pembelian	Komponen Keputusan dan Tujuan			
	Total Profit (Rp)	Selisih Profit	Total Emisi (liter)	Selisih Emisi
25%	Rp.66.747.303,35	-59%	74328,2	9%
20%	Rp.86.289.303,35	-48%	74328,2	9%
15%	Rp.105.831.303,35	-36%	74328,2	9%
10%	Rp.125.373.303,35	-24%	74328,2	9%
5%	Rp.144.889.404,35	-12%	68192,5	0%

Kondisi Variansi Biaya Pembelian	Komponen Keputusan dan Tujuan			
	Total Profit (Rp)	Selisih Profit	Total Emisi (liter)	Selisih Emisi
0%	Rp.164.461.804,35	0%	68192,5	0%
-5%	Rp.184.034.204,35	12%	68192,5	0%
-10%	Rp.203.606.604,35	24%	68192,5	0%
-15%	Rp.223.179.004,35	36%	68192,5	0%
-20%	Rp.242.751.404,35	48%	68192,5	0%
-25%	Rp.262.284.707,35	59%	58971,4	-14%

Dari hasil *running solver* uji sensitivitas variansi biaya pembelian pada Tabel 5. 2, dimana pada tabel tersebut memperlihatkan bahwa variabel biaya pembelian mempengaruhi fungsi tujuan pertama secara *linear*, dimana semakin menurunnya biaya pembelian maka semakin tinggi total profit yang didapatkan. Variabel biaya pembelian juga mempengaruhi fungsi tujuan kedua tetapi berbeda dengan yang pertama, dimana semakin tinggi biaya pembelian maka total emisi karbon akan meningkat, hal ini disebabkan oleh stok vaksin yang disimpan di dalam kulkas meningkat, sehingga emisi yang dihasilkan juga akan meningkat. Pada selisih profit, perubahan terbesar mencapai 59% dengan selisih harga sebesar Rp.97.822.903,00 dan pada total emisi karbon terdapat perubahan terbesar mencapai -14% dengan selisih emisi karbon 9221,1 lt.CO2-eq.



Gambar 5. 3 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Pembelian



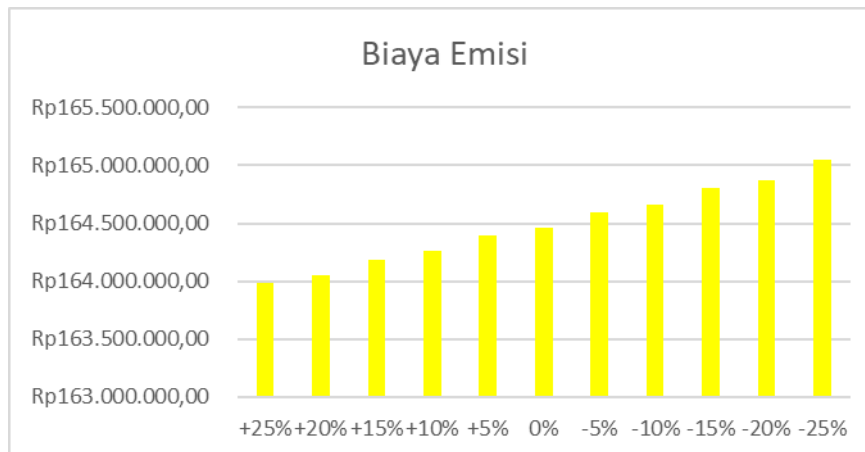
Gambar 5. 4 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Pembelian

Dari grafik sensitivitas yang ditunjukkan Gambar 5. 3 dan Gambar 5. 4 menjelaskan bahwa kenaikan dan penurunan dari variansi biaya pembelian juga mempengaruhi fungsi tujuan pertama dan kedua namun dengan pola grafik yang berbeda.

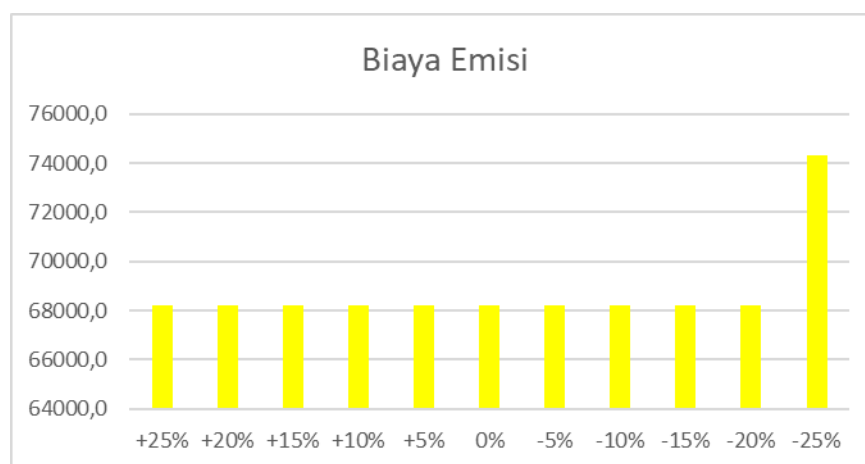
Tabel 5. 3 Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi

Kondisi Variansi Biaya Emisi	Komponen Keputusan dan Tujuan			
	Total Profit (Rp)	Selisih Profit	Total Emisi (liter)	Selisih Emisi
25%	Rp.163.984.457,15	-0,3%	68192,5	0%
20%	Rp.164.052.649,61	-0,2%	68192,5	0%
15%	Rp.164.189.034,52	-0,2%	68192,5	0%
10%	Rp.164.257.226,98	-0,1%	68192,5	0%
5%	Rp.164.393.611,89	0,0%	68192,5	0%
0%	Rp.164.461.804,35	0,0%	68192,5	0%
-5%	Rp.164.598.189,27	0,1%	68192,5	0%
-10%	Rp.164.666.381,72	0,1%	68192,5	0%
-15%	Rp.164.802.766,64	0,2%	68192,5	0%
-20%	Rp.164.870.959,10	0,2%	68192,5	0%
-25%	Rp.165.051.928,61	0,4%	74328,2	9%

Dari hasil *running solver* uji sensitivitas variansi biaya emisi pada Tabel 5. 3, dimana pada tabel tersebut memperlihatkan bahwa variabel biaya emisi mempengaruhi fungsi tujuan, semakin rendah biaya emisi maka semakin tinggi total profit yang didapatkan dan juga semakin tinggi emisi karbon yang dihasilkan. Berbeda dengan dua variansi sebelumnya, variansi biaya emisi tidak mempengaruhi fungsi tujuan pertama secara signifikan, dimana perubahan terbesarnya hanya meningkat sebesar 0,4% dengan selisih Rp.590.124,26. Kemudian pada kolom emisi terdapat perubahan sebesar 9% dengan selisihnya mencapai 6135,7 lt.CO2-eq



Gambar 5. 5 Grafik Total Profit Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi



Gambar 5. 6 Grafik Total Emisi Uji Sensitivitas Terhadap Variansi Biaya Emisi

Dari grafik sensitivitas yang ditunjukkan Gambar 5. 5 dan Gambar 5. 6 menjelaskan bahwa kenaikan dan penurunan dari variansi biaya emisi juga mempengaruhi fungsi tujuan pertama dan kedua namun dengan bentuk grafik yang berbeda. Pada kondisi -25% terjadi peningkatan pada stok vaksin di rumah sakit yang menyebabkan meningkatnya emisi listrik dari penyimpanan dan juga mempengaruhi dari fungsi tujuan kedua.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada penelitian ini, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Model MILP dikembangkan mempertimbangan model dari penelitian-penelitian sebelumnya dengan memodifikasi pada penambahan fungsi tujuan (*objective function*) dan memodifikasi jenis objek yang diteliti. Model MILP yang dikembangkan pada penelitian ini menggunakan *open solver* dari *software* microsoft excel untuk menemukan hasil optimal dari kedua fungsi tujuan.
2. Dari hasil optimasi model yang dikembangkan, menghasilkan nilai total profit sebesar Rp.164.461.804,35 dan 68.192,5 lt.CO2-eq untuk total emisi karbon, dimana pada fungsi tujuan pertama terjadi kenaikan sebesar 3% dan penurunan pada fungsi tujuan kedua sebesar -36%.
3. Uji sensitivitas pada model dilakukan terhadap beberapa parameter yaitu variabel *demand*, biaya pembelian dan biaya emisi. Hasil uji sensitivitas terhadap parameter tersebut sebagai berikut.
 - a. Pada uji sensitivitas *demand*, perubahan terbesar terdapat pada saat kondisi demand -25% yang mempengaruhi total profit dan total emisi mengalami penurunan menjadi Rp.121.682.211,76 dan 52649,3 lt.CO2-eq.
 - b. Pada uji sensitivitas biaya pembelian, perubahan terbesar terdapat pada kondisi biaya pembelian -25% yang mempengaruhi total profit mengalami kenaikan menjadi Rp.262.284.707,35 dan total emisi mengalami penurunan menjadi 58971,4 lt.CO2-eq.
 - c. Pada uji sensitivitas biaya emisi, perubahan terbesar terdapat pada saat kondisi biaya emisi -25% yang mempengaruhi total profit dan total emisi mengalami kenaikan menjadi Rp.165.051.928,61 dan total emisi mengalami penurunan menjadi 74328,2 lt.CO2-eq.

Berdasarkan hasil uji sensitivitas terhadap parameter *demand*, biaya pembelian dan biaya emisi, ketiga parameter tersebut mempengaruhi hasil fungsi tujuan pertama dan kedua. Dengan kesimpulan semakin tinggi demand maka semakin tinggi total profit dan total emisi, semakin tinggi biaya pembelian maka semakin rendah total pendapatan dan

semakin tinggi total emisi, semakin tinggi biaya emisi maka semakin rendah total profit dan total emisi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, berikut ini merupakan saran yang dapat peneliti berikan:

1. Komponen pada penelitian ini dapat dikembangkan kembali dengan mempertimbangkan biaya-biaya yang berkaitan dengan proses produksi vaksin polio pada pabrik produksi.
2. Pengembangan model MILP kedepannya diharapkan dapat menggunakan *software* lain seperti LINGO ataupun Phyton.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, M. S., Robson, D. A., & Iliescu, D. (2023). Face Validity: A Critical but Ignored Component of Scale Construction in Psychological Assessment. In *European Journal of Psychological Assessment* (Vol. 39, Issue 3, pp. 153–156). Hogrefe Publishing GmbH. <https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000777>
- Charlie, V., Sriwidodo, S., Roestan, M. R., Nurrajsid, E. S., & Kustiyawan, I. (2024). Analisa Kinerja Rantai Pasok: Studi Kasus Keberhasilan Pemenuhan Kebutuhan Vaksin di Industri Farmasi XYZ. *Majalah Farmasetika*, 9(3), 255. <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v9i3.53408>
- Ensar Işık, E., & Topaloglu Yildiz, S. (2023). Optimizing the Covid-19 Cold Chain Vaccine Distribution Network With Medical Waste Management: A Robust Optimization Approach. *Expert Systems with Applications*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120510>
- Fahra Ningrum, K., & Kartika Untari, M. (2022). Evaluasi Penyaluran Vaksin Sesuai Standar CDOB (Cara Distribusi Obat yang Baik). *Journal Syifa Sciences and Clinical Research (JSSCR)*, 4. <https://doi.org/10.37311/jsscr.v4i3.15644>
- Georgiadis, G. P., & Georgiadis, M. C. (2021). Optimal planning of the covid-19 vaccine supply chain. *Vaccine*, 39(37), 5302–5312. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.07.068>
- Gnegel, F., Fügenschuh, A., Hagel, M., Leyffer, S., & Stiemer, M. (2021). A Solution Framework for Linear PDE-Constrained Mixed-Integer Problems. *Mathematical Programming*, 188(2), 695–728. <https://doi.org/10.1007/s10107-021-01626-1>
- Gomes, K. R. R., Perera, H. N., Thibbotuwawa, A., & Sunil-Chandra, N. P. (2023). Comparative Analysis of Lean and Agile Supply Chain Strategies for Effective Vaccine Distribution in Pandemics: A Case Study of Covid-19 in a Densely Populated Developing Region. *Supply Chain Analytics*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100022>
- Hindra, I. S., Laila, F. I., & Sidik, U. (2016). Eradikasi Polio. *Jurnal Sari Pediatri*, 18(3), 245–250. <https://doi.org/10.14238/sp18.3.2016.245-50>
- Imam, F., & Masruroh, F. (2020). *Imunisasi Menurut Hukum Islam Kontroversi Imunisasi Vaksin Polio IPV Injeksi yang Mengandung Enzim Babi* (Vol. 1, Issue 1). JURNAL AL-HUKMI.
- Irvai, M., & Herdiansyah, M. I. (2021). Model Optimasi Jaringan Rantai Pasok Pada Sistem Informasi Harga Karet Rakyat Berbasis Web. *JURNAL MEDIA INFORMATIKA BUDIDARMA*, 5(2), 600. <https://doi.org/10.30865/mib.v5i2.2928>
- 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>
- Joseph F. Hair Jr., William C. Black, Barry J. Babin, & Rolph E. Anderson. (2010). *Multivariate Data Analysis (7th Edition)* (7th ed.). Pearson Education Limited.

- Karingga, D. D., & Hikmah, A. N. (2024). Pemberian Edukasi Tentang Pentingnya Imunisasi Lengkap dan Vaksinasi Polio. *LENTERA*, 2(4), 174–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.57267/lentera.v4i2.377>
- Lhamo, R., & Chiadamrong, N. (2017). Inventory Management of Perishable Products in a Retail Business: A Comparison With and Without In-Store Replenishment Policies Under Different Purchasing Batch Sizes. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 26(2), 224. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2017.10001959>
- 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>
- Mansur, A., Handayani, D. I., Wangsa, I. D., Utama, D. M., & Jauhari, W. A. (2023). A Mixed-Integer Linear Programming Model for Sustainable Blood Supply Chain Problems with Shelf-Life Time and Multiple Blood Types. *Decision Analytics Journal*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100279>
- 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>
- Masuwai, A., Zulkifli, H., & Hamzah, M. I. (2024). Evaluation of Content Validity and Face Validity of Secondary School Islamic Education Teacher Self-Assessment Instrument. *Cogent Education*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2308410>
- Mehravar, M., & Nemati, A. (2025). A Resilient Poultry Vaccine Supply Chain Network Design Considering Perishability and Stress Test. *Supply Chain Analytics*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100098>
- Mohammadi, M., Asgari, E., Mamaghan, M. K., Pirayesh, A., & van Woensel, T. (2024). Heterogeneous Joint Vaccine Allocation and Quarantine Restriction Planning Under Uncertainty: The Covid-19 Pandemic. *Omega (United Kingdom)*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103133>
- Nugroho, D., & Rianto, A. (2022). Strategi Indonesia Dalam Mengurangi Emisi Karbon Dioksida (co2) di Masa New Normal. <https://doi.org/10.31092/jpi.v7i1.2172>
- Pramudyo, C. S., Tanggono, H. A., & Asy'ari, M. H. (2021). Penentuan Rute Pengiriman Beras Menggunakan Metode Nearest Neighbour dan Mixed Integer Linear Programming. *Transportasi Multimoda*, 19(2), 1–6.
- Pusparini, P. D., Widyana, I. G., Pharresia, S. Z., & Fawlung, M. H. (2023). Analisis Penerapan Pajak Karbon dan ULEZ terhadap Penurunan Emisi Karbon di Indonesia. *Jurnal Pajak Indonesia*, 7(1), 57–66. <https://doi.org/10.31092/jpi.v7i1.2172>
- Putri, A. M., Ardiansyah, M. N., & Chulasoh, B. S. (2023). Perancangan Rute Pengiriman pada PT. ABC untuk Meminimasi Tingkat Keterlambatan Pengiriman dan Biaya Transportasi Menggunakan Model Mixed Integer Linear Programming. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 6(4), 1387–1395. <https://doi.org/10.31004/jutin.v6i4.21022>

- Rachman, H., & Mawengkang, H. (2023). Perencanaan Produksi Makanan Laut dengan Pertimbangan Permintaan dan Kapasitas. *Journal of Mathematics: Theory and Applications*, 34–38. <https://doi.org/10.31605/jomta.v5i1.2309>
- 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>
- Rosyidi, C. N., Sulistiani, N. S., & Laksono, P. W. (2022). A Mixed Integer Linear Programming Model of Order Allocation Involving Mass Customization Logistic Service (MCLS). *CAUCHY: Jurnal Matematika Murni Dan Aplikasi*, 7(3), 474–482. <https://doi.org/10.18860/ca.v7i3.15398>
- Santoso, S., & Heryanto, R. M. (2022). Pengembangan Model Capacitated Maximal Covering Location Problem (CMCLP) untuk Penentuan Lokasi dan Tipe Distribution Center. *OPSI*, 15(1), 34. <https://doi.org/10.31315/opsi.v15i1.6431>
- Sengul Orgut, I., Freeman, N., Lewis, D., & Parton, J. (2023). Equitable and Effective Vaccine Access Considering Vaccine Hesitancy and Capacity Constraints. *Omega (United Kingdom)*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102898>
- Taula, J. I., Palendeng, I. D., & Sumarauw, J. S. B. (2022). Analisis Rantai Pasokan Daging Babi pada UD. Unggas Jaya Kalasey Analysis of Pork Supply Chain on UD. Unggas Jaya Kalsey. *1336 Jurnal EMBA*, 10(1), 1336–1344.
- Triwidawati, C., Puspa, H., Yuliaty, F., Manajaemen, M., & Sangga Buana, U. (2024). Tinjauan Pengelolaan Emisi Karbon Rumah Sakit untuk Menciptakan Ekosistem Netral Karbon. *SoBAT*, 6, 278–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.32897/sobat.2024.6.1.4192>
- Wahyuningsih, I., Anggraeni, E., & Susanto, I. (2025). Determinasi Emisi Karbon di Indonesia Tahun 2004-2023: Tinjauan Ekonomi Industri. *EKOMA : Jurnal Ekonomi*, 4(3).
- Zarlis, M., & Efendi, S. (2020). Mixed Integer Linear Programming Model for Integrated Fish Supply Chain Planning. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 30, 12. www.jatit.org
- Zhagi, A., Agustina, F., Bambang, D., & Priatna, A. (2022). Perencanaan Produksi dan Pengendalian pada Kombinasi Metode MRP dan MILP. <https://ejournal.upi.edu/index.php/JEM>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengambilan Data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
	RUMAH SAKIT UNIVERSITAS PADJARAN INDONESIA YOGYAKARTA																											
	LAPORAN IMUNISASI																											
	BULAN : JANUARI																											
	TAHUN :2024																											
	NO	TANGGAL (IMUNISASI)	L/P	POLO			BB (GRAM)	TB (CM)																				
				1	2	3																						
1	1	04/01/2024	P	1			5925	60																				
2	2	05/01/2024	L	1			7010	62																				
3	3	05/01/2024	L		1		6315	64																				
4	4	08/01/2024	L	1			5270	58																				
5	5	09/01/2024	L		1		5820	65																				
6	6	10/01/2024	L		1		0	0																				
7	7	11/01/2024	L	1			4625	56																				
8	8	11/01/2024	L	1			6075	61																				
9	9	11/01/2024	L	1			5325	59																				
10	10	13/01/2024	L	1			3820	50,5																				
11	11	13/01/2024	L		1		8115	71,5																				
12	12	13/01/2024	L	1			5175	58																				
13	13	13/01/2024	L				5635	57,5																				
14	14	13/01/2024	P	1			6151	61																				
15	15	13/01/2024	L	1			6430	64																				
16	16	13/01/2024	P	1			5675	59																				
17	17	13/01/2024	L	1			5030	59																				
18	18	15/01/2024	L		1		8490	68																				
19	19	15/01/2024	L		1		7515	66																				
20	20	15/01/2024	P		1		6500	64,2																				
21	21	15/01/2024	P		1		6070	63																				
22	Januari 2024 Feb 2024 Maret 2024 April 2024 Mei 2024 Jun 2024 Jul 2024 Agustus 2024 Septembe ...																											

Lampiran 2. Pengolahan Data

The screenshot displays a detailed Excel model for a business simulation. The main components are:

- VARIABEL KEPUTUSAN (Decision Variables):** A grid of cells containing numerical values, likely representing decision variables like production quantities or resource allocations.
- CONSTRAINTS:** A section on the right side of the spreadsheet, likely defining the constraints for the optimization model.
- FUNGSI TUJUAN (Objective Function):** A section at the bottom left, likely defining the objective function to be optimized.
- Data Table:** A large table at the bottom right, organized into columns for 'Demand', 'Bilaya Pembelian' (Purchase Costs), 'Bilaya Emisi' (Emission Costs), and 'Total Emisi' (Total Emissions). It includes various sub-totals and percentages.
- Charts:** Several bar charts are present, visualizing data across different categories and scenarios.
- Sensitivity Analysis:** A section at the bottom, likely showing the impact of changes in input parameters on the output.
- Formulas and Functions:** The spreadsheet includes various Excel formulas and functions, such as SUM, AVERAGE, and IF, used for calculations.

FUNGSI TUJUAN

Z1	
Rp 568.350.000,00	Pendapatan
Rp 300.000,00	Biaya Pemesanan
Rp 391.448.000,00	Biaya Pembelian
Rp 187.100,00	Biaya Distribusi
Rp 4.542.300,00	Biaya Penyimpanan
Rp 5.304.600,00	Biaya Penggunaan Alat
Rp 60.421,92	Biaya Limbah Vaksin
Rp 2.045.773,73	Biaya Emisi CO2
Rp 164.461.804,35	

Z2	
59.829,0	Emisi Karbon Energi Listrik
741,0	Emisi Karbon Distribusi
7.622,5	Emisi Karbon Limbah Vaksin
68.192,5	