TUGAS AKHIR – TI 184833

PENGEMBANGAN MODEL *MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM* UNTUK PRODUK HORTIKULTURA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION*

BINTANG BAGAS RAHARDINTO
NRP. 02411640000211

DOSEN PEMBIMBING:
Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD
NIP 196811091995031003

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PROJECT – TI 184833

DEVELOPING MODEL OF MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM FOR HORTICULTURAL PRODUCTS CONSIDERING INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION

BINTANG BAGAS RAHARDINTO
NRP 02411640000211

SUPERVISOR:
Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD
NIP 196811091995031003

INDUSTRIAL AND SYSTEMS ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TI 184833

PENGEMBANGAN MODEL *MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM* UNTUK PRODUK HORTIKULTURA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION*

BINTANG BAGAS RAHARDINTO
NRP 02411640000211

DOSEN PEMBIMBING:
Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD
NIP 196811091995031003

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

LEMBAR PENGESAHAN

PENGEMBANGAN MODEL *MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM* UNTUK PRODUK HORTIKULTURA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program S-1 Departemen Teknik Sistem dan Industri
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia

Penulis:

BINTANG BAGAS RAHARDINTO

NRP 02411640000211

Mengetahui dan menyetujui,
Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD
NIP 196811091995031003

SURABAYA, AGUSTUS 2020

DISCLAMER

This research with a title of "Developing Model of Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem for Horticultural Products Considering Internal Temperature Distribution" is an unpublished research document. Any kinds of referencing activities involving this research must not be done before permissions from corresponding researcher and research's supervissor are granted. Permission proposol is able to be sent via e-mail to arusdian@ie.its.ac.id. If any publication (seminar, national, or international journal) uses this research, thus a reference should be properly shown in the publication.

DEVELOPING MODEL OF MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM FOR HORTICULTURAL PRODUCTS CONSIDERING INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION

Name : Bintang Bagas Rahardinto
Student ID : 02411640000211
Supervisor : Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD

ABSTRACT

Horticultural products, such as fruits and vegetables, are perishable products so that storage with regard to the optimal temperature of the product is needed, especially in the distribution process. This is done so that product quality is maintained until it reaches consumers. A model called refrigerated-container loading problem is developed to answer this challenge. This model is about how to load cargo of fruit and vegetable products in refrigerated containers in a multi-drop case so that the total cost, consisting of penalty costs, quality loss costs, refrigeration costs, shipping costs, unnecessary moving costs and vehicle costs, can be minimized. The model uses a heuristic approach with a wall-building by considering several constraints, i.e. weight limit, stacking, multi-drop, internal temperature distribution and stability. Computational fluid dynamics (CFD) is used to visualize the temperature distribution inside refrigerated containers. Model validity is examined by comparing results in Microsoft Excel VBA with manual calculations and model's logic. The numerical experiments result of this research show that the minimum total cost will be achieved if the cargo loading plan uses low storage temperatures with high air velocity, uses a homogeneous cargo type, and the total delivery time is less than 10.84 hours. The experimental result also shows that the number of delivery locations and the number of fruit types are the basis for determining a strategy between specific reefer loading or multi reefer loading.

Key Words: container loading, computational fluid dynamics, heuristics, multi-drop, perishable product, refrigerated container

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

PENGEMBANGAN MODEL *MULTI-DROP REFRIGERATED-CONTAINER LOADING PROBLEM* UNTUK PRODUK HORTIKULTURA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *INTERNAL TEMPERATURE DISTRIBUTION*

Nama : Bintang Bagas Rahardinto
NRP : 02411640000211
Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M. Eng., CSCP, CLTD

ABSTRAK

Produk hortikultura seperti buah-buahan dan sayuran merupakan produk yang bersifat *perishable* sehingga penyimpanan dengan memerhatikan suhu optimal produk sangat dibutuhkan terutama pada proses distribusi. Hal tersebut dilakukan agar kualitas produk tetap terjaga hingga ke konsumen. Sebuah model *regrigerated-container loading problem* dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut. Model ini tentang bagaimana menyusun kargo produk buah-buahan dan sayuran pada kontainer berpendingin pada kasus *multi-drop* sehingga total biaya, terdiri dari *penalty cost*, *quality loss cost*, *refrigeration cost*, *shipping cost, unnecessary moving cost* dan *vehicle cost,* dapat diminimumkan. Model tersebut menggunakan pendekatan heuristik dengan menggunakan *wall-building* dengan mempertimbangkan beberapa pembatas, yaitu *weight limit, stacking, multi-drop, internal temperature distribution* dan *stability. Computational fluid dynamics* (CFD) digunakan untuk memvisualisasikan distribusi suhu pada kontainer berpendingin. Validitas model diperiksa dengan cara membandingkan hasil di VBA Microsoft Excel dengan penghitungan secara manual dan logika model. Hasil eksperimen numerik menunjukkan bahwa total biaya minimum akan tercapai jika penyusunan kargo menggunakan suhu penyimpanan rendah dengan kecepatan udara yang tinggi, menggunakan tipe kargo yang homogen, dan total waktu pengiriman kurang dari 10.84 jam. Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa jumlah lokasi pengiriman dan jumlah jenis buah menjadi dasar penentuan strategi antara *dedicated reefer loading* dengan *multi-reefer loading.*

Kata Kunci: container loading, computational fluid dynamics, heuristik, multi-drop, produk perishable, kontainer berpendingin

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas karunia-Nya dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Pengembangan Model *Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem* Untuk Produk Hortikultura Dengan Mempertimbangkan *Internal Temperature Distribution*." Tugas akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik. Selain itu, tugas akhir ini juga disusun sebagai sarana penerapan ilmu dan pengalaman yang telah penulis dapatkan selama menjalani perkuliahan di Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Ir. Ahmad Rusdiansyah, M.Eng., CSCP, CLTD, sebagai dosen wali dan dosen pembimbing penulis, atas segala arahan, saran, dukungan, dan waktu yang telah beliau luangkan dalam membimbing penulis dalam menjalani perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir di ITS.
2. Prof. Dr. Ir. Suparno, MSIE., Ph.D., Prof. Ir. I Nyoman Pujawan, M.Eng., Ph.D., dan Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T., sebagai dosen penguji seminar proposal dan sidang tugas akhir, atas segala saran dan kritik yang membangun dalam membantu penulis menyempurnakan tugas akhir ini.
3. Nurhadi Siswanto, S.T., MSIE., Ph.D. sebagai Kepala Departemen Teknik Sistem dan Industri.
4. Bambang Raharjo dan Dyne Meirianti Sugiharto sebagai orang tua penulis, atas segala doa, kasih sayang, pengorbanan, dan dukungan moral serta material untuk penulis.
5. Seluruh teman-teman dari Departemen Teknik Sistem dan Industri angkatan 2016 (Adhigana), atas bantuan, dukungan, dan semangat yang untuk penulis selama menjalani perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan seluruh pihak yang telah membantu penulis. Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk berbagai pihak.

Tangerang Selatan, 15 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRACT i
ABSTRAK iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xiii
BAB 1 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 5
1.5 Ruang Lingkup Penelitian 5
1.5.1 Batasan 5
1.5.2 Asumsi 5
1.6 Sistematika Laporan 6
BAB 2 9
TINJAUAN PUSTAKA 9
2.1 Hortikultura 9
2.2 *Perishable Product* 9
2.3 *Cold Chain* 10
2.4 Suhu Optimal untuk Buah-Buahan dan Sayuran 12
2.5 *Refrigerated Container* 13
2.5.1 Pengaturan Suhu 14
2.5.2 Penentuan Suhu Produk 15
2.5.3 Konsumsi Energi *Reefer* 16
2.6 *Computational Fluid Dynamics* 17
2.7 Penurunan Kualitas Produk 18
2.8 *Container Loading Problem* 20
2.9 Metode Heuristik untuk *Container Loading Problem* 27
2.10 Posisi Penelitian 31

BAB 3 35
METODOLOGI PENELITIAN 35
3.1 Pengembangan Model 36
3.2 Eksperimen Numerik dan Analisis 37
3.3 Kesimpulan dan Saran 37
BAB 4 39
PENGEMBANGAN MODEL 39
4.1 Deskripsi Model 39
4.2 Perumusan Model 46
4.2.1 Parameter 46
4.2.2 Model Matematis *Single Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem* 50
4.2.3 Model Matematis *Multi Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem* 53
4.3 Algoritma Heuristik 57
4.4 Validasi Model 63
4.4.1 Data Validasi Model 63
4.4.2 Uji Validasi Model 71
BAB 5 77
EKSPERIMEN NUMERIK DAN ANALISIS 77
5.1 Eksperimen Numerik 1 : Pengaruh Suhu Penyimpanan dan Kecepatan Udara Terhadap Penyusunan Kargo 77
5.2 Eksperimen Numerik 2 : Pengaruh Dimensi Kargo Terhadap Penyusunan Kargo 85
5.3 Eksperimen Numerik 3 : Perbandingan *Dedicated Reefer Loading* Berdasarkan Produk, *Dedicated Reefer Loading* Berdasarkan Tujuan, dan *Multi Reefer Loading* 89
5.4 Eksperimen Numerik 4 : Pengaruh Waktu Tempuh Terhadap Penyusunan Kargo 93
BAB 6 99
KESIMPULAN DAN SARAN 99
6.1 Kesimpulan 99

6.2 Saran 100
DAFTAR PUSTAKA 101
LAMPIRAN 105
BIOGRAFI PENULIS 109

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Laju Pertumbuhan Produksi Komoditi Hortikultura pada Tahun 2018 - 2020 (Q on Q) 1
Gambar 1.2 *Food Loss* pada *Food Supply Chain* untuk Komoditi Buah-Buahan dan Sayuran 2
Gambar 2. 1 Infrastruktur pada Rantai Dingin 11
Gambar 2. 2 Ruang Lingkup Rantai Dingin 12
Gambar 2. 3 Sirkulasi Udara di Dalam *Reefer* 14
Gambar 2. 4 Distribusi Suhu pada *Reefer* 15
Gambar 2. 5 Simulasi CFD pada *Reefer* 18
Gambar 2. 6 Contoh dari *Container Loading Problem* 20
Gambar 2. 7 Pendekatan *Wall-Building* (Tampak Atas) 27
Gambar 2. 8 Proses Pencarian Tipe Kargo untuk Lapisan Baru 28
Gambar 2. 9 Proses Pencarian Tipe Kargo untuk Ruang Selain Lapisan Baru 28
Gambar 2. 10 Proses Pemilihan Dimensi Lebar dan Tinggi dan Kuantitas Kargo29
Gambar 2. 11 Skema Pembentukan Ruang Baru 30
Gambar 2. 12 Proses Pembentukan Ruang Baru (*New Spaces*) 30
Gambar 2. 13 Proses Pemilihan Ruang Baru 31
Gambar 3. 1 *Flowchart* Metodologi Penelitian 35
Gambar 4. 1 Orientasi A atau Orientasi Standar 40
Gambar 4. 2 Penyusunan Kargo Berdasarkan LIFO 42
Gambar 4. 3 Pembagian Ruang pada *Reefer* 43
Gambar 4. 4 Ruang Kosong di Dalam *Reefer* 57
Gambar 4. 5 Proses Pemilihan dan Penyusunan Tipe Kargo (Bagian Bawah Lapisan) 59
Gambar 4. 6 Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo (Ruang Kosong) 61
Gambar 4. 7 Proses Pembentukan Ruang Kosong 62
Gambar 4. 8 Proses Pemilihan Ruang Kosong pada Single MR-CLP 63
Gambar 4. 9 Proses Pemilihan Ruang Kosong pada Multi MR-CLP 63
Gambar 4. 10 Ilustrasi Bentuk Kargo Buah-Buahan dan Sayuran 64
Gambar 4. 11 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Uji Validasi 76

Gambar 5. 1 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 78
Gambar 5. 2 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 78
Gambar 5. 3 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 78
Gambar 5. 4 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 79
Gambar 5. 5 Hasil Simulasi Udara di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 79
Gambar 5. 6 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 79
Gambar 5. 7 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 1..... 83
Gambar 5. 8 Perbandingan *Quality Loss Cost* dan *Refrigeration Cost* pada Eksperimen Numerik 1 83
Gambar 5. 9 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 2..... 88
Gambar 5. 10 Visualisasi Pemuatan Kargo *Dedicated Reefer Loading* (Lokasi) . 92
Gambar 5. 11 Visualisasi Pemuatan Kargo *Dedicated Reefer Loading* (Produk). 92
Gambar 5. 12 Visualisasi Pemuatan Kargo Multi MR-CLP 92
Gambar 5. 13 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 4..... 96

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Suhu dan Waktu Penyimpanan yang Ideal untuk Sayuran dan Buah-Buahan 13
Tabel 2. 2 Tipe *Container Loading Problem* 21
Tabel 2. 3 Pembatas-Pembatas pada *Container Loading Problem* 22
Tabel 2. 4 Posisi Penelitian Terhadap Penelitian Terdahulu 31
Tabel 4. 1 Pembatas pada *Multi-drop Refrigerated-Container Loading Problem* 39
Tabel 4. 2 Jenis Orientasi Kargo 41
Tabel 4. 3 Parameter Tetap Model 65
Tabel 4. 4 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 66
Tabel 4. 5 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 66
Tabel 4. 6 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 67
Tabel 4. 7 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 68
Tabel 4. 8 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s 69
Tabel 4. 9 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s 70
Tabel 4. 10 Data Lokasi Pelanggan untuk Uji Validasi 71
Tabel 4. 11 Data Pesanan Pelanggan untuk Uji Validasi 71
Tabel 4. 12 Data Pesanan Pelanggan untuk Uji Validasi (Lanjutan) 71
Tabel 4. 13 Data Uji Validasi Proses Penyusunan Kargo pada Bagian Bawah Lapisan 73
Tabel 4. 14 Data Uji Validasi Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo pada Ruang Kosong 74
Tabel 4. 15 Data Uji Validasi Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo pada Ruang *Widthwise* 75
Tabel 4. 16 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Uji Validasi 75
Tabel 4. 17 Rekapitulasi Biaya untuk Uji Validasi 76

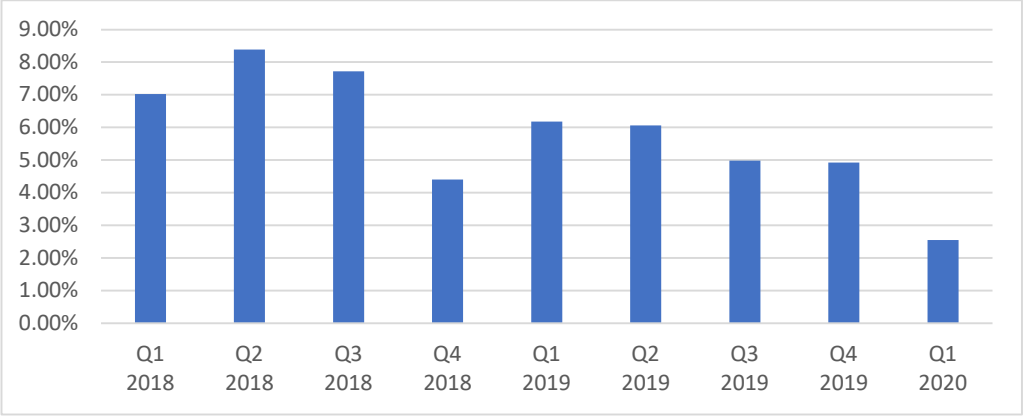
Tabel 5. 1 Data Lokasi Pengiriman untuk Eksperimen Numerik 1 80
Tabel 5. 2 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 1 80
Tabel 5. 3 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 1 (Lanjutan) 81
Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 1 82
Tabel 5. 5 Data Lokasi Pengiriman untuk Eksperimen Numerik 2 85
Tabel 5. 6 Rancangan Skenario untuk Eksperimen Numerik 2 86
Tabel 5. 7 Data Pesanan Pelanggan Skenario 1 untuk Eksperimen Numerik 2 86
Tabel 5. 8 Data Pesanan Pelanggan Skenario 2 untuk Eksperimen Numerik 2 86
Tabel 5. 9 Data Pesanan Pelanggan Skenario 3 untuk Eksperimen Numerik 2 87
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 2 .. 88
Tabel 5. 11 Data Lokasi Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 3 90
Tabel 5. 12 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 3 90
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 3 .. 91
Tabel 5. 14 Data Lokasi Pelanggan Skenario 1 untuk Eksperimen Numerik 4 93
Tabel 5. 15 Data Lokasi Pelanggan Skenario 2 untuk Eksperimen Numerik 4 94
Tabel 5. 16 Data Lokasi Pelanggan Skenario 3 untuk Eksperimen Numerik 4 94
Tabel 5. 17 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 4 95
Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 4 .. 95

BAB 1
PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian yang mencakup batasan dan asumsi, dan struktur penulisan laporan.

1.1 Latar Belakang

Hortikultura merupakan kegiatan yang berkaitan dengan tanaman buah-buahan, sayuran, tanaman hias, dan tanaman biofarmaka (Badan Pusat Statistik, 2019). Hortikultura merupakan salah satu subsektor pertanian yang sedang tumbuh di Indonesia.

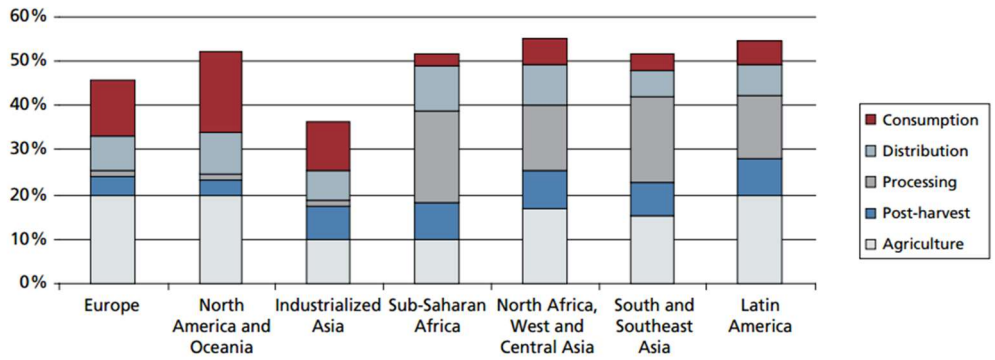


Gambar 1.1 Laju Pertumbuhan Produksi Komoditi Hortikultura pada Tahun 2018 - 2020 (Q on Q) (Badan Pusat Statistik, 2020)

Berdasarkan Gambar 1.1, produksi komoditi hortikultura selalu meningkat setiap triwulan sepanjang tahun 2018 hingga 2020 dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 5,023%. Menurut Badan Statistik Pusat (BPS) dalam (Kementerian Pertanian, 2019), pada tahun 2018, jumlah produksi buah-buahan mencapai 21,5 juta ton, sayuran 13 juta ton, tanaman biofarmaka 676 ribu ton, dan tanaman hias 870 juta tangkai. Namun, seiring peningkatan produksi komoditi hortikultura, rantai pasok komoditi hortikultura terutama buah-buahan dan sayuran semakin menjadi kompleks dan menantang karena kedua komoditi tersebut termasuk ke dalam kategori *perishable products.* Menurut (U.S Departement of Agriculture, 2019),

perishable products memiliki beberapa karakteristik, yaitu berumur pendek, mudah membusuk, dan tidak aman untuk dikonsumsi jika tidak disimpan pada suhu optimal. Oleh karena itu, buah-buahan dan sayuran perlu disimpan pada suhu yang optimal agar kualitas dan keamanannya dapat terjaga dengan baik serta tidak menyebabkan *food loss* yang dapat merugikan perusahaan. *Food loss* adalah penurunan kualitas dan kuantitas makanan yang diakibatkan oleh keputusan dan tindakan pemain pada rantai pasok. *Food loss* dapat terjadi di sepanjang rantai pasok karena beberapa faktor, seperti perubahan warna, rasa, dan bentuk, dan umur yang sudah mendekati atau melebihi tanggal kadaluarsa. Setiap tahunnya terdapat 1,3 miliar ton makanan yang menjadi *food loss*, angka tersebut setara dengan 1 triliun dolar Amerika. Indonesia sendiri berkontribusi sebesar 300 makanan per kapita setiap tahunnya (Food And Agriculture Organization , 2019)

Pada tahun 2016, komoditi buah-buahan dan sayuran berkontribusi sebesar 21% terhadap *food loss* di dunia atau kedua terbesar setelah umbi-umbian (Food And Agriculture Organization , 2019). Berdasarkan Gambar 1.2, Food and Agriculture Organization (FAO) membagi *food supply chain* menjadi 5 proses, yaitu *agriculture, post-harvest, processing, distribution,* dan *consumption.* Pada kawasan Asia Tenggara, *food loss* paling banyak terjadi pada proses distribusi. Sehingga, distribusi menjadi salah satu proses yang sangat perlu diperhatikan agar kualitas dan keamanan komoditi buah-buahan dan sayuran dapat terjaga dengan baik atau tidak menjadi *food loss.*



Gambar 1.2 *Food Loss* pada *Food Supply Chain* untuk Komoditi Buah-Buahan dan Sayuran (Food And Agriculture Organization , 2011)

Salah satu solusi untuk mengoptimalkan kualitas dan keamanan komoditi buah-buahan dan sayuran adalah mengimplementasikan *cold chain management. Cold chain* adalah cara pendistribusian barang dalam kisaran suhu tertentu dari *supplier* hingga *end customer* (Brzozowska, et al., 2016). Buah-buahan dan sayuran yang termasuk *perishable product* membutuhkan transportasi dan penyimpanan dengan pengaturan suhu yang tepat. Sebagai contoh, buah-buahan seperti plum, stroberi, kiwi dan pir memerlukan suhu yang sangat rendah, mendekati 0° C. Mempertahankan suhu buah-buahan dan sayuran agar tetap optimal dalam *cold chain* adalah faktor paling penting dalam menghambat pembusukan dan mencapai umur simpan (*shelf life*) optimal karena hal tersebut dapat memperlambat proses pematangan serta merusak mikroba (Berry, et al., 2015). Dalam *cold chain management*, terdapat beberapa infrastruktur yang dibutuhkan untuk menjaga suhu komoditi tetap berada pada suhu optimal, yaitu *cold storage, precooling system, refrigerated truck,* dan *refrigerated cargo container.*

Refrigerated cargo container (*reefer*) menjadi unit transportasi *temperature-controlled* yang paling umum digunakan karena kompatibel dengan sistem transportasi antarmoda (Goedhals-Gerber, et al., 2017). *Reefer* dapat mengakomodasi berbagai produk yang mudah rusak dengan cara mengatur suhu *reefer* sesuai dengan suhu optimal produk. Namun, distribusi suhu di dalam *reefer* dapat menjadi tidak seragam karena beberapa faktor, seperti kecepatan dan sirkulasi udara, posisi mesin pendingin, dan perpindahan panas (Umeno, et al., 2015). Sehingga, produk yang ditempatkan mendekati mesin pendingin memiliki suhu yang sama dengan suhu yang diatur pada mesin pendingin, sedangkan produk yang ditempatkan menjauhi mesin pendingin memiliki suhu yang lebih tinggi. Hal ini menjadi kompleks karena setiap titik di dalam *reefer* memiliki suhu yang berbeda-beda sehingga setiap buah-buahan dan sayuran memiliki tingkat pembusukan yang berbeda-beda pula dan akan menjadi lebih kompleks jika *reefer* mengangkut berbagai macam komoditi yang memiliki suhu optimal yang berbeda-beda. Oleh karena itu, pengaturan suhu internal *reefer* dan penempatan produk di dalam *reefer* harus memerhatikan kisaran suhu optimal produk agar tidak terjadi penurunan kualitas pada produk.

Sebagai solusi untuk permasalahan di atas, penulis mengembangkan model *multi-drop refrigerated container loading problem* dengan mempertimbangkan *internal temperature distribution* untuk kargo komoditi hortikultura yaitu buah-buahan dan sayuran. Model ini memiliki tujuan yaitu untuk meminimasi total biaya dan divisualisasikan menggunakan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel. Kargo yang berisi buah-buahan dan sayuran ditempatkan dalam *reefer* yang identik dengan mempertimbangkan suhu optimal produk dan suhu internal *reefer*, di mana kargo-kargo tersebut akan dikirimkan ke beberapa tujuan untuk memenuhi permintaan pelanggan. Selain itu, kargo untuk pelanggan yang terakhir dikunjungi harus ditempatkan lebih dulu daripada kargo untuk pelanggan yang lebih awal atau dapat disebut *last-in first-out* (LIFO) agar meminimasi proses *loading* dan *unloading* di setiap titik pengiriman. Pada penelitian ini, total biaya terdiri dari *penalty cost* untuk kargo yang tidak dimuat, *quality loss cost* akibat kargo ditempatkan di atas suhu optimal, *unnecessary moving cost* akibat kargo dimuat tidak berdasarkan urutan pengiriman, *refrigeration cost*, *shipping cost,* dan *vehicle cost.* Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai *tools* bagi para pelaku usaha terutama pada rantai pasok buah-buahan dan sayuran untuk menentukan strategi penempatan kargo yang sesuai dengan karakteristik produk sehingga kualitas produk tetap terjaga hingga ke tangan pelanggan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana susunan penempatan kargo produk buah-buahan dan sayuran di *refrigerated container* untuk kasus *multi-drop* sehingga total biaya dapat diminimumkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan model *container loading problem* dengan mempertimbangkan *multi-drop* dan *internal temperature distribution* untuk produk buah-buahan dan sayuran.
2. Melakukan ekperimen numerik terhadap model dan menganalisis hasil eksperimen tersebut terhadap total biaya.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan rekomendasi untuk pelaku usaha buah-buahan dan sayuran berupa penempatan kargo dan pengaturan suhu pada *refrigerated container.*
2. Meningkatkan pemahaman penulis mengenai model *multi-drop refrigerated container loading problem* untuk produk buah-buahan dan sayuran.
3. Meningkatkan pemahaman penulis dalam mengembangkan model menggunakan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Batasan dan asumsi yang digunakan dalam melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1.5.1 Batasan

Batasan yang digunakan selama melakukan penelitian adalah sebagai berikut:

1. *Loading plan* ditetapkan untuk beberapa destinasi (*multi-drop*).
2. Produk hortikultura yang diamati adalah buah-buahan dan sayuran.
3. *Refrigerated container* (*reefer*) yang digunakan homogen.

1.5.2 Asumsi

Asumsi yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bentuk kargo dan *refrigerated container* (*reefer*) adalah balok.
2. Menggunakan sistem *last-in first-out* (LIFO).
3. Tidak ada perbedaan antara suhu di dalam dengan di luar kargo.
4. Jarak, lokasi, waktu tempuh pengiriman, permintaan pelanggan, dan karakteristik produk (berat dan dimensi) sudah diketahui sebelum proses *loading* ke dalam *reefer*.

5. Penataan kargo terhadap *reefer* harus tegak lurus.
6. Distribusi suhu di dalam *reefer* bersifat konstan.
7. Tidak ada batasan *time-window* pada pelanggan maupun kendaraan yang digunakan.
8. Produk di dalam *reefer* tidak dapat mengkontaminasi satu sama lainnya.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari enam bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah yang akan diselesaikan, tujuan dan manfaat penelitian, batasan dan asumsi yang digunakan, serta sistematika penulisan yang digunakan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini terdiri teori-teori yang digunakan sebagai dasar dalam melakukan penelitian. Sumber yang digunakan antara lain adalah buku, jurnal ilmiah, dan penelitian sebelumnya sesuai dengan masalah yang diangkat. Teori-teori yang digunakan pada penelitian ini adalah hortikultura, *perishable product, cold chain,* suhu optimal untuk buah-buahan dan sayuran, *refrigerated container*, *computational fluid dynamics,* penurunan kualitas produk, *container loading problem*, metode heuristik untuk *container loading* problem, dan posisi penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian serta metode dan pendekatan yang digunakan agar penelitian dapat dilakukan dengan sistematis. Secara umum metodologi pada penelitian ini adalah pengembangan model, eksperimen numerik dan analisis, dan kesimpulan serta saran.

BAB 4 PENGEMBANGAN MODEL

Bab ini akan membahas mengenai proses pengembangan model yang digunakan pada penelitian ini. Model yang digunakan adalah *multi-drop refrigerated container loading problem* untuk produk hortikultura dengan mempertimbangkan *internal temperature distribution.* Model ini akan ditunjukkan dalam model matematis, langkah algoritma, dan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel.

BAB 5 EKPERIMEN NUMERIK DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dilakukan eksperimen numerik terhadap model yang sudah dikembangkan pada bab sebelumnya. Beberapa skenario akan digunakan untuk melihat dampaknya terhadap tujuan penelitian. Selanjutnya, dilakukan interpretasi dan analisis terhadap hasil ekperimen tersebut.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi mengenai kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini dan saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang digunakan sebagai dasar landasan dalam melakukan penelitian.

2.1 Hortikultura

Hortikultura adalah cabang industri pertanian, di mana perusahaan terlibat dalam budidaya, proses, perdagangan, logistik, dan penjualan produk tanaman (Seifi, 2017). Tanaman hortikultura berbeda dengan tanaman lainnya seperti padi dan palawija. Menurut (Winarni, 2008), tanaman hortikultura memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

1. Membutuhkan modal yang besar
2. Hasilnya melimpah atau banyak
3. Sifatnya mudah rusak (*perishable*)
4. Sangat dipengaruhi lingkungan
5. Harga fluktuatif sesuai dengan perubahan gaya hidup masyarakat

Berdasarkan (Badan Pusat Statistik, 2019), tanaman hortikultura dapat dibagi menjadi empat golongan, yaitu buah-buahan, sayuran, tanaman biofarmaka, dan tanaman hias. Keberadaan tanaman hortikultura sangat dibutuhkan oleh masyarakat karena memiliki banyak fungsi, seperti penyedia nutrisi dan gizi (contohnya, vitamin dari buah-buahan), penyedap makanan (contohnya, rasa pedas dari cabai), dan penyedia estetika (contonya, bunga anggrek).

2.2 *Perishable Product*

Perishable product memiliki umur yang pendek, mudah membusuk, dan tidak aman untuk dikonsumsi jika tidak disimpan pada suhu optimal (U.S Departement of Agriculture, 2019). Contoh produk yang memiliki sifat *perishable* adalah buah-buahan, sayuran, roti, *dairy product,* daging, dan ikan. Selain produk makanan, produk farmasi, kimia dan bunga juga termasuk ke dalam *perishable product.* Menurut (Silver, et al., 2017), *perishable product* memiliki umur yang terbatas karena kualitas produk akan terus menerus sepanjang waktu hingga produk

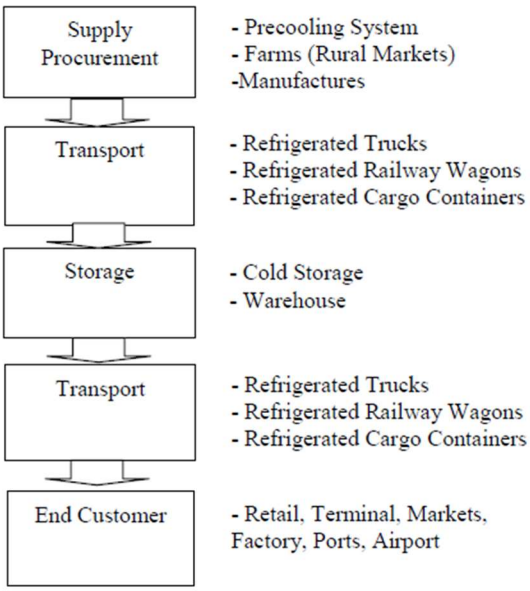
tidak layak dikonsumsi. Berdasarkan umur produk, *perishable product* dapat dibagi ke dalam dua kategori, yaitu *fixed* dan *random.* Untuk produk yang memiliki *fixed lifetime*, umur produk sudah ditentukan sebelumnya, namun pada kenyataannya utilitas produk akan menurun sepanjang waktu sampai produk tersebut tidak memiliki nilai bagi pelanggan. Contohnya adalah darah yang disimpan di bank darah. Untuk produk yang memiliki *random lifetime,* umur produk tidak ditentukan secara spesifik. Oleh karena itu, masa pakai produk tersebut dianggap sebagai variabel *random*, dan mengikuti distribusi probabilitas. Contohnya adalah *fresh product* seperti daging, buah-buahan, dan sayuran.

Menurut (Raafat, 1991), kerusakan atau pembusukan didefinisikan sebagai proses apa pun yang mencegah suatu produk untuk digunakan sesuai dengan kegunaannya. *Perishable product* dapat dibagi sesuai dengan tipe kerusakannya, yaitu pembusukan akibat adanya proses kimiawi dan biologis (contohnya, sayuran dan buah-buahan), penipisan fisik (contohnya, penguapan cairan pada produk yang mudah menguap), dan *decay* (zat radioaktif). Untuk buah-buahan dan sayuran, faktor yang menyebabkan terjadi pembusukan sehingga tidak layak dikonsumsi adalah laju pematangan dan mikroba (Berry, et al., 2015). Buah-buahan dan sayuran akan mulai busuk setelah dipetik dari pohonnya, sehingga penyimpanan yang baik dengan menjaga suhu yang rendah (optimal) dapat menjaga kualitas dan keamanannya sampai ke tangan pelanggan.

2.3 *Cold Chain*

Cold chain atau rantau dingin adalah rantai pasokan yang dikendalikan oleh suhu untuk produk *perishable,* seperti buah-buahan dan sayuran segar. Menurut (Rodrigue & Notteboom, 2017), manajemen rantai dingin bertujuan untuk menjaga keutuhan rantai dingin dengan memerhatikan suhu optimal produk selama kegiatan penyimpanan dan distribusi. Menjaga suhu agar tetap optimal merupakan hal yang terpenting dalam rantai dingin ini guna menghambat pembusukan pada buah-buahan dan sayuran sehingga umur simpan produk menjadi optimal. Dalam rantai dingin, beberapa infrastruktur sepanjang rantai pasok, mulai dari pengadaan hingga konsumen, dibutuhkan guna menjaga produk agar tetap berada pada suhu yang

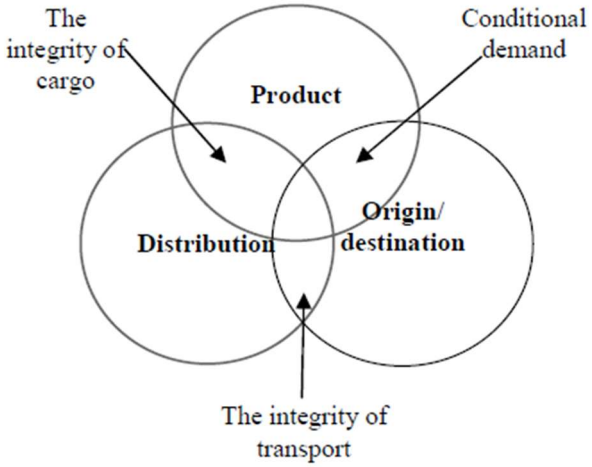
optimal. Pada Gambar 2.1 di bawah ini merupakan infrastruktur yang dibutuhkan pada rantai dingin.



Gambar 2. 1 Infrastruktur pada Rantai Dingin
(Brzozowska, et al., 2016)

Menurut (Brzozowska, et al., 2016), terdapat tiga faktor utama dalam menjalankan rantai dingin yang optimal, yaitu *product properties, distribution channels,* dan *places of origin and destination.* Hubungan antar ketiga faktor tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.2. Sifat produk sangat berkaitan dengan karakterstik fisik dan penanganan khusus yang berkaitan dengan suhu dan kelembaban. *Place of origin and destination* berkaitan dengan area produk yang sensitif oleh perubahan suhu. *Distribution channel* berkaitan dengan metode dalam pemilihan moda transportasi yang akan digunakan. Interaksi antara *product properties* dengan *distribution channel* adalah *the integrity of cargo*, di mana proses *loading* dan *unloading* barang harus meminimalkan risiko penurunan kualitas produk selama pengangkutan. Interaksi antara *places of origin and destination* dengan *distribution channel* adalah *the integrity of tranport*, yaitu tindakan dan penanganan untuk menyediakan suhu yang ideal bagi produk selama proses pengangkutan berlangsung. Interaksi antara *places of origin and destination* dengan *product properties* adalah *conditional demand*, di mana pihak manufaktur harus

mengetahui proses distribusi, seperti kapan produk dikeluarkan dari *reefer* dan suhu yang dibutuhkan saat di dalam *reefer*, sehingga sifat dan karaketeristik produk serta bagaimana cara menjaganya dapat diketahui.



Gambar 2. 2 Ruang Lingkup Rantai Dingin
(Brzozowska, et al., 2016)

2.4 Suhu Optimal untuk Buah-Buahan dan Sayuran

Dalam menyimpan buah-buahan dan sayuran di dalam gudang atau *reefer*, pengaturan suhu merupakan hal yang paling penting guna menjaga kualitasnya. Buah-buahan dan sayuran sangat sensitif terhadap perubahan suhu, sehingga komoditi perlu disimpan sesuai pada suhu optimalnya. Dalam kondisi penyimpanan yang buruk, buah-buahan dan sayuran yang disimpan terlalu lama dapat membusuk dan berbahaya bagi kesehatan jika dikonsumsi. Pada umumnya, indikator buah-buahan dan sayuran tak layak dikonsumsi, yaitu kulit keriput dan layu, terjadi perubahan warna (kusam), timbul bercak, bau busuk, terdapat jamur dan lendir pada permukaan kulit (U.S Departement of Agriculture, 1977). Suhu yang rendah diperlukan dalam penyimpanan buah-buahan dan sayuran yang bersifat *perishable.* Suhu yang rendah dapat memperlambat pembusukan karena tingkat respirasi menurun, kelembaban stabil, produksi zat etilen diperlambat, serta menghambat pertumbuhan organisme pembusuk. Menurut (Goverment of Western Australia, 2016), sebagian besar buah-buahan dan sayuran disimpan pada suhu 0° C – 2° C

untuk waktu yang cukup lama. Namun, beberapa buah-buahan tropis disimpan pada suhu 5º C – 13º C.

Pengaturan suhu saat menyimpan produk yang bersifat *perishable* perlu memerhatikan karakteristik produk tersebut. Suhu optimal setiap buah-buahan dan sayuran bervariasi sesuai dengan kandungan air dan zat etilen yang terdapat di dalam buah-buahan dan sayuran. Berikut ini adalah suhu optimal dan waktu penyimpanan ideal setiap jenis sayuran dan buah-buahan.

Tabel 2. 1 Suhu dan Waktu Penyimpanan yang Ideal untuk Sayuran dan Buah-Buahan

Jenis	Nama	Suhu Optimal	Waktu Penyimpanan
Buah-Buahan	Ceri	-1º - 0ºC	2 - 3 minggu
	Pir	-1º - 0ºC	2 - 6 bulan
	Plum	-1º - 0ºC	1 - 4 minggu
	Apel	-1º - 4ºC	1 - 12 bulan
	Leci	2º - 5ºC	3 - 5 minggu
	Jeruk	3º - 8ºC	1 - 3 minggu
	Pepaya	7º - 13ºC	1 - 3 minggu
Sayuran	Brokoli	0ºC	3 - 4 minggu
	Kol	0ºC	1 - 6 bulan
	Wortel	0ºC	7 - 9 bulan
	Pakcoy	0ºC - 5º	2 - 4 minggu
	Cabai	7.5ºC	3 - 5 minggu
	Mentimum	10º - 12.5ºC	< 14 hari
	Terong	10º - 12ºC	< 14 hari

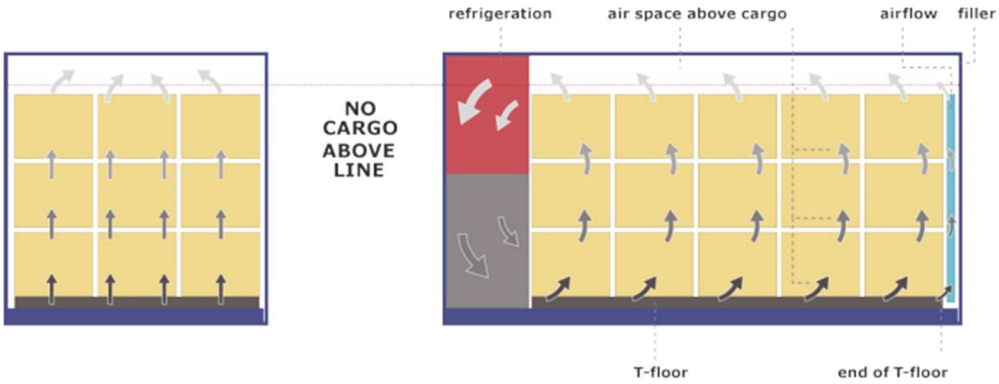
Sumber : (Queensland's Departement of Agriculture and Fisheries, 2017)

2.5 *Refrigerated Container*

Refrigerated container atau *reefer* adalah unit transportasi *temperature-controlled* yang paling umum digunakan karena kompatibel dengan sistem transportasi antarmoda (Goedhals-Gerber, et al., 2017). Pada umumnya, produk-produk yang diangkut oleh unit transportasi ini adalah produk-produk yang sensitif terhadap suhu atau *perishable product.* Kontainer ini memiliki sistem pendingin (*refrigerator*) yang berfungsi untuk menjaga suhu di dalam kontainer dan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan pengguna. Berdasarkan (American President Lines , 2018), sistem sirkulasi udara di dalam *reefer* adalah sebagai berikut:

1. Udara dingin dari mesin pengingin (*refrigerator*) dihembuskan ke arah bawah melintasi *t-floor* (di bawah kargo)
2. Udara dingin bersirkulasi melalui dan mengelilingi kargo serta menyerap panas yang dikeluarkan oleh kargo
3. Udara hangat akan dikeluarkan melalui evaporator yang terletak di bagian atas *reefer*. Kemudian, udara tersebut diarahkan melalui lilitan evaporator, di mana udara tersebut didinginkan dan dikeluarkan kembali melalui mesin pendingin.

Berikut adalah ilustrasi sistem sirkulasi udara di dalam *reefer*.



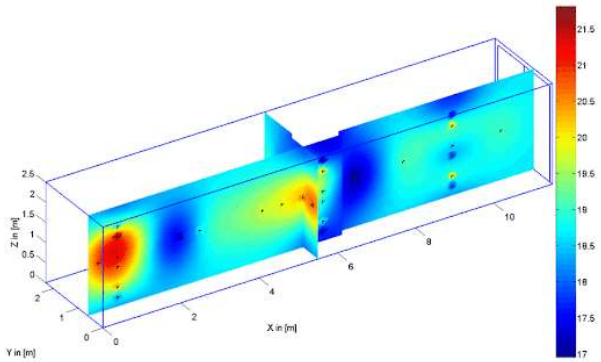
Gambar 2. 3 Sirkulasi Udara di Dalam *Reefer*
(American President Lines , 2018)

2.5.1 Pengaturan Suhu

Suhu merupakan variabel yang sangat penting dan perlu dikontrol dengan baik selama *perishable product* disimpan di dalam *reefer*, terutama untuk buah-buahan dan sayuran karena dapat menghambat pembusukan dan mengoptimalkan umur simpan (*shelf life*) serta memperlambat proses pematangan serta merusak mikroba (Berry, et al., 2015). Sehingga, pengaturan serta pemantauan suhu *reefer* merupakan hal yang penting guna menjaga kualitas dan keamanan produk. Pengaturan suhu untuk satu komiditi lebih mudah daripada multi-komoditi karena setiap komoditi memiliki kisaran suhu optimal yang berbeda-beda. Sehingga, pengaturan suhu *reefer* tidak hanya mengacu pada salah satu suhu optimal produk.

Menurut (Smale, et al., 2016), menjaga suhu dalam *reefer* agar tetap homogen merupakan hal yang kompleks karena penyebaran suhu dipengaruhi oleh

beberapa faktor, seperti aktivitas *loading* dan *unloading* dan karakteristik produk. Selain itu, terdapat perpindahan panas yang terjadi, baik dari luar *reefer* maupun dari produk yang dimuat. Distribusi udara yang homogen dapat menyebabkan produk memiliki suhu yang berbeda walaupun pada *reefer* yang sama. Perbedaan tersebut dapat mematangkan buah lebih cepat jika ditempatkan pada area dengan suhu lebih tinggi dari suhu optimal dan menjadi beku jika ditempatkan pada area dengan suhu di bawah suhu optimal (Saffir & Lang, 2016). Berdasarkan hasil penelitian (Nunes, et al., 2014), terdapat perbedaan sebesar 5° C antara buah *blackberry* yang ditempatkan pada area yang berbeda saat buah tersebut diangkut dari Mexico ke California. Gambar 2.4 di bawah mengilustrasikan distribusi suhu pada *reefer.* Titik merah atau dikenal *hot spot* menandakan adanya distribusi yang tidak merata. Produk yang ditempatkan pada titik tersebut akan mengalami penurunan kualitas lebih cepat akibat terdapat perbedaan antara suhu optimal produk dengan suhu di titik tersebut. Oleh karena itu, pendekatan menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) diperlukan untuk mengetahui distribusi suhu pada *reefer.*



Gambar 2. 4 Distribusi Suhu pada *Reefer*
(www.intelligentcontainer.com)

2.5.2 Penentuan Suhu Produk

Distribusi suhu di dalam *reefer* dapat menjadi tidak seragam karena beberapa faktor, seperti kecepatan dan sirkulasi udara, posisi mesin pendingin, dan perpindahan panas (Umeno, et al., 2015). Setiap produk yang dimuat di dalam *reefer* akan mendapatkan suhu yang berbeda-beda. Sehingga, produk yang ditempatkan pada bagian sudut palet memiliki umur simpan lebih cepat 15% daripada produk yang ditempatkan di bagian tengah palet (Nunes, et al., 2014).

Oleh karena itu, (Adetio, 2019) mengembangkan sebuah rumus *weighted-average method* dari (Aung & Chang, 2014) untuk menentukan rata-rata suhu yang diterima oleh kargo di dalam *reefer* sebagai berikut.

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^{n} wd_i T_i}{\sum_{i=1}^{n} wd} \tag{2.1}$$

Keterangan:

TR = suhu rata-rata yang diterima kargo di dalam *reefer* (K)

T_i = suhu i yang diterima oleh kargo (K)

Wd_i = volume kargo yang menerima suhu T_i (m^2)

Wd = volume kargo (m^2)

2.5.3 Konsumsi Energi *Reefer*

Sebuah *reefer* membutuhkan energi untuk mendinginkan produk-produk yang dimuat. Penelitian ini menggunakan pendekatan dari (Akdemir, 2008) dalam menentukan total konsumsi energi pada *reefer.* Terdapat dua aspek yang diperhitungkan, yaitu *heat load* dan *product load. Heat load* adalah energi panas yang masuk ke dalam *reefer* melalui atap, dinding, dan lantai. Berikut adalah rumus penghitungan *heat load.*

$$Q_1 = \frac{\lambda}{x} \times A \times (T_0 - T_i) \tag{2.2}$$

Keterangan :

Q_1 = *heat load* (W)

λ = konduktivitas termal ($\lambda = 0.25\ Wm^{-1}K$)

x = ketebalan material (m)

A = luas area material (m^2)

T_0 = suhu di luar *reefer* ($T_0 = 305.5\ K$)

T_i = suhu di dalam *reefer* (K)

Product load adalah energi panas yang dikeluarkan oleh kargo selama berada di dalam *reefer.* Berikut adalah rumus penghitungan *product load.*

$$Q_2 = m \times c_p \times (T_0 - T_i) \times \frac{1}{t} \tag{2.3}$$

Keterangan:

Q_2 = *product load* (W)

m = massa produk yang disimpan (kg)

c_p = kapasitas panas spesifik produk ($c_p = 3.85\ J\ kg^{-1}\ K$)

T_0 = suhu di luar *reefer* ($T_0 = 305.5\ K$)

T_i = suhu di dalam *reefer* (K)

t = waktu yang dibutuhkan selama pendinginan (s)

Total energi yang dibutuhkan *reefer* adalah hasil penambahan dari *heat load* dan *product load.* Berikut adalah rumus penghitungan total energi pada *reefer.*

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{2.4}$$

Keterangan:

Q = total konsumsi energi *reefer* (W)

Q_1 = *heat load* (W)

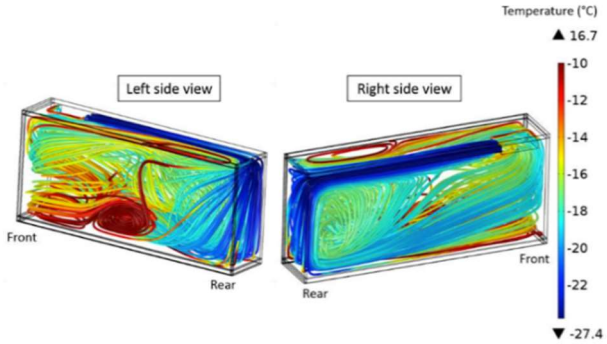
Q_2 = *product load* (W)

2.6 *Computational Fluid Dynamics*

Computational fluid dynamics (CFD) adalah sebuah ilmu yang, dengan bantuan simulasi komputer, menghasilkan prediksi kuantitatif terhadap sebuah aliran fluida berdasarkan hukum kekekalan (massa, momentum, dan energi) yang mengatur gerak fluida (Hu, 2012). Prediksi kuantitatif biasanya berhubungan dengan variabel aliran seperti kecepatan, tekanan, dan suhu serta perilaku aliran seperti laju aliran dan hidrodinamik. Alat ini sering digunakan karena mempunyai beberapa keuntungan, yaitu :

1. Dapat dilakukan dengan mudah dan tidak mahal, tanpa memerlukan pelatihan dalam jumlah yang teralu berat.
2. Menghasilkan informasi yang lengkap terkait variabel dan perilaku fluida.
3. Dapat mengubah parameter dengan mudah.
4. Memiliki kemampuan untuk menyimulasikan kondisi sebenarnya (*real*).
5. Mampu melakukan penyelidikan situasi yang tidak wajar atau tidak diinginkan, seperti ledakan, dan kebakaran.

CFD ini sudah digunakan dalam beberapa penelitian aliran fluida, seperti memprediksi cuaca, mengidentifikasi pola aliran sungai, dan menganilisis laju udara dan distribusi suhu pada suatu *refrigerated container.* Dengan menggunakan CFD, penulis dapat mengetahui area mana saja di dalam *reefer* yang memiliki titik panas (*hot spot*) sehingga produk-produk yang ditempatkan pada area tersebut dapat diketahui laju penurunan kualitasnya. Beberapa *software* yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan CFD, antara lain ANSYS, Open Foam, PowerFLOW, SimScale, COMSOL, dan Autodesk CFD.



Gambar 2. 5 Simulasi CFD pada *Reefer*
(Fairclough, 2016)

2.7 Penurunan Kualitas Produk

Penurunan kualitas merupakan suatu permasalahan dalam menangani produk yang bersifat *perishable.* Umur simpan (*shelf life*) produk dapat tidak optimal jika tingkat penurunan kualitas sangat cepat, sehingga produk dapat membusuk dan tak layak konsumsi saat sampai di tangan konsumen. Suhu, kondisi lingkungan, dan waktu simpan merupakan variabel yang menentukan kualitas

produk. (Yang, et al., 2017) mengembangkan sebuah model penurunan kualitas berdasarkan kondisi atmosfer lingkungan, suhu dan waktu penyimpanan. Berikut adalah rumus penghitungan tingkat kualitas produk.

$$\mathrm{q} = q_0 e^{-\lambda t} \tag{2.5}$$

Keterangan :

q = *remaining quality of product*

q_0 = *initial quality of product*

e = bilangan eulier (e = 2.718)

λ = tingkat penurunan kualitas

t = waktu penyimpanan produk (jam)

Pada persamaan (2.5), terdapat variabel λ yang merupakan tingkat penurunan kualitas produk. Berikut adalah penjabaran dari nilai λ.

$$\lambda = k_0 e^{-\left(\frac{E}{RT_0}\right)} \tag{2.6}$$

Persamaan (2.6) digunakan saat kondisi suhu dalam ruang penyimpanan relatif stabil, padahal suatu produk bisa mendapatkan suhu lebih tinggi atau lebih rendah dari suhu optimalnya, sehingga (Zúñiga & Troncoso, 2013) mengembangkan variabel tersebut agar lebih sensitif terhadap perubahan suhu di dalam ruang penyimpan.

$$\lambda = k_0 e^{-\left(\frac{E}{R} \times \left(\frac{1}{T_{eff}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)} \tag{2.7}$$

Keterangan :

λ = tingkat penurunan kualitas

k_0 = nilai konstan untuk penurunan kualitas

e = bilangan eulier (e = 2.718)

E = energi aktifasi untuk penurunan kualitas

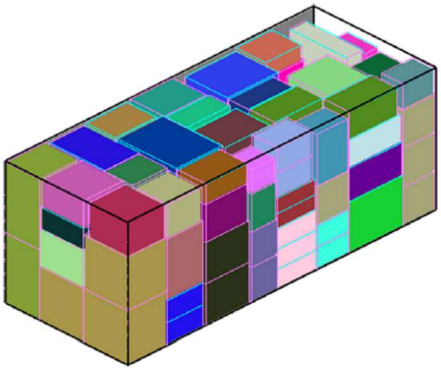
R = konstanta gas (R = 8,31 J/mol K)

T_{eff} = suhu yang diterima oleh produk (K)

T_{ref} = suhu optimal produk (K)

2.8 *Container Loading Problem*

Container loading problem adalah sebuah permasalahan penyusunan bidang geometris, di mana *small item* tiga dimensi (kargo) harus disusun ke dalam *large object* tiga dimensi dengan bentuk persegi panjang (kontainer) agar fungsi objektif yang ditentukan dapat dioptimalkan (Bortfeldt & Wäscher, 2013). Terdapat tiga *basic geometric* yang harus dipenuhi, yaitu seluruh kargo berada seluruhnya di dalam kontainer, tidak ada tumpang tindih antar kargo, dan permukaan kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai kontainer. Terdapat dua tipe bentuk kargo, yaitu regular dan irregular. Sebagian besar penelitian menggunakan asumsi bahwa bentuk kargo adalah persegi panjang. Pada umumnya, *large object* adalah sebuah kontainer, namun dapat diartikan sebagai ruang muat pada truk atau palet.



Gambar 2. 6 Contoh dari *Container Loading Problem*
(Liu, et al., 2014)

Menurut (Wäscher, et al., 2007), kargo dan kontainer dapat dibagi menjadi tiga golongan berdasarkan dimensinya, yaitu *homogeneous*, *weakly heterogeneous*, dan *strongly heterogeneous.* Dikatakan *homogeneous* jika hanya ada satu tipe kargo. Dianggap *weakly heterogeneous* jika kargo atau kontainer dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis, di mana setiap jenisnya memiliki jumlah yang relatif banyak. Dikatakan *strongly heterogeneous*, jika kargo atau kontainer tidak ada atau hanya sangat sedikit yang memiliki bentuk dan ukuran identik. Menurut (Bortfeldt & Wäscher, 2013), terdapat dua tipe *container loading problem*

berdasarkan penyusunannya, yaitu *input (value) minimization* dan *output (value) maximization.* Untuk tipe pertama, jumlah kontainer untuk mengangkut seluruh kargo tidak terbatas, sehingga fungsi objektif dari tipe ini adalah untuk meminimasi jumlah kontainer yang digunakan. Sedangkan, pada tipe kedua, hanya sebagian kargo yang dapat dimasukkan ke dalam kontainer karena jumlah kontainer terbatas. Fungsi objektif tipe kedua adalah memaksimalkan utililtas volume kontainer. Berikut adalah tipe *container loading problem* berdasarkan tipe kargo, kontainer, dan fungsi tujuannya.

Tabel 2. 2 Tipe *Container Loading Problem*

Tipe *Container Loading Problem*	***large object***				***small item***		
	S	**M**					
		1	***2***	***3***	***1***	***2***	***3***
Input minimization							
Single Stock-Size Cutting Stock Problem		✓				✓	
Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem			✓			✓	
Residual Cutting Stock Problem				✓		✓	
Single Bin-Size Bin Packing Problem		✓					✓
Multiple Bin-Size Bin Packing Problem			✓				✓
Residual Bin Packing Problem				✓			✓
Open Dimension Problem	✓					✓	✓
Output maximization							
Identical Item Packing Problem	✓				✓		
Single Large Object Placement Problem	✓					✓	
Multiple Identical Large Object Placement Problem		✓				✓	
Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem			✓	✓		✓	
Single Knapsack Problem	✓						✓
Multiple Identical Knapsack Problem		✓					✓
Multiple Heterogeneous Knapsack Problem			✓	✓			✓
Keterangan : S = *Single* M = *Multiple*	1 = Identik 2 = *Weakly Heterogeneous* 3 = *Strongly Heterogeneous*						

Sumber : (Bortfeldt & Wäscher, 2013)

Pada *container loading problem*, terdapat beberapa pembatas (*constrain*) yang digunakan. Pembatas tersebut dibagi ke dalam 5 tipe, yaitu *container-related*

(berhubungan dengan *large object*), *item-related* (berhubungan dengan *small item*), *cargo-related* (berhubungan dengan kelompok *small item*), *positioning* (hubungan *small item* dengan *large object*), dan *load-related* (berhubungan dengan proses *packing*). Berikut adalah klasifikasi dari pembatas pada *container loading problem.*

Tabel 2. 3 Pembatas-Pembatas pada *Container Loading Problem*

No.	Tipe	Pembatas	Deskripsi
1	*Container-Related*	*Weight Limit*	Berat total muatan di dalam kontainer tidak boleh melebihi batas berat maksimal kontainer
		Weight Distribution	Berat muatan tersebar merata pada lantai kontainer
2	*Item-Related*	*Loading Priorities*	Pada *output maximization*, ruang kontainer yang tersedia tidak cukup untuk memuat seluruh kargo, sehingga harus diputuskan kargo mana yang harus dimuat dan mana yang harus ditinggalkan.
		Orientation	Membatasi orientasi kargo baik secara vertikal maupun horizontal
		Stcaking	Membatasi penumpukan kargo, di mana kargo yang lebih berat tidak boleh ditumpuk di atas kargo yang lebih ringan
3	*Cargo-Related*	*Complete Shipment*	Pada *output maximization,* jika satu item dari sebuah kelompok kargo dimuat, semua item lainnya juga harus dimuat. Jika satu item tidak dapat dimuat, tidak ada item dari kelompok kargo tersebut yang akan dimuat sama sekali
		Allocation	Pada *multiple container*, kargo mungkin harus dimuat dalam kontainer yang sama atau tidak karena persyaratan dari pelanggan
4	*Positioning*	*Absolute*	Membatasi penempatan kargo di dalam kontainer, misalnya, posisi atau ruang tertentu
		Relative	Membatasi kargo agar harus atau tidak ditempatkan saling berdekatan satu sama lain

No.	Tipe	Pembatas	Deskripsi
		Multi-Drop	Item-item dari suatu kelompok kargo tidak hanya harus ditempatkan berdekatan satu sama lain, tetapi juga harus mempertimbangkan urutan pengiriman untuk meminimasi proses *unloading-reloading*
5	*Load-Related*	*Stability*	Bagian alas kargo harus ditunjang secara keseluruhan atau sebagian oleh lantai kontainer atau bagian atas kargo di bawahnya (*vertical stability*). Setiap kargo harus berdekatan dengan kargo lainnya atau dinding kontainer (*horizontal stability*)
		Guillotine Cutting	Suatu *loading plan* dikatan "guillotineable" jika dapat menghasilkan serangkaian 'potongan' secara paralel terhadap permukaan kontainer

Sumber : (Bortfeldt & Wäscher, 2013)

Container loading problem tergolong ke dalam *NP-Hard* sehingga tidak dapat diselesaikan dengan algoritma *polynomial-time* (Bischoff & Marriott, 1990). Terdapat dua pendekatan yang digunakan pada *container loading problem* yaitu metode *exact* dan heuristik. Namun, metode *exact* hanya dapat digunakan saat jumlah item sedikit. Sehingga, metode heuristik terbukti menjadi alternatif yang lebih realistis untuk menangani permasalahan ini. Walaupun metode heuristik mungkin mendapatkan solusi sub-optimal, tetapi dapat menghasilkan solusi yang cukup baik dalam jangka waktu yang cukup singkat. Menurut (Fanslau & Bortfeldt, 2010), terdapat tiga tipe metode heuristik yang digunakan untuk menyelesaikan kasus *container loading problem.*

1. Heuristik konvensional : metode konstruktif (contohnya, *greedy algorithm*) dan metode *improvement* (contohnya, *local search algorithm*)
2. Metaheuristik : *genetic algorithm* (GA), *tabu seacrh algorithm* (TS), *simulated annealing* (SA), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP).
3. Metode *tree search* : *graph search method,* dan *and/or graph search.*

Menurut (Zhao, et al., 2016), terdapat tiga pendekatan secara heuristik yang menentukan bagaimana struktur penyusunan kargo, yaitu *wall-bulding, layer-building,* dan *block-building.* Pada *wall-building,* dinding kargo dibuat memanjang dalam wadah. Pada *layer-building*, kontainer diisi dari bagian bawah ke bagian atas dengan membentuk lapisan-lapisan horizontal. Pada *block-building*, kontainer diisi dengan membentuk kubus yang sebagian besar hanya tersusun dari kargo yang identik dengan orientasi spasial yang sama. Menurut (Zhao, et al., 2016), terdapat dua tipe urutan penempatan kargo, yaitu *static* dan *dynamic.* Pada *static sequencing*, urutan kargo yang akan dimuat sudah ditentukan sebelum penempatan pertama dilakukan, sehingga penempatan suatu kargo tidak mempengaruhi penempatan kargo selanjutnya. Sedangkan, pada *dynamic sequencing,* urutan kargo yang akan dimuat selalu diperbarui setiap penempatan dilakukan, pemilihan kargo mana yang akan dimuat bergantung pada penempatan sebelumnya.

Berikut adalah model matematis dari *container loading problem* yang dikembangkan oleh (Chen, et al., 1995) dan (Li & Zhang, 2015).

a. Parameter

m	Jumlah kargo yang dimuat	
N	Jumlah kontainer yang tersedia	
M_B	Bilangan besar	
b_i	Berat kargo i	$\forall i$
B_j	Kapasitas muatan pada kontainer j	$\forall j$
(l_i, w_i, h_i)	Panjang, lebar, dan tinggi dari kargo i	$\forall i$
(L_j, W_j, H_j)	Panjang, lebar, dan tinggi dari kontainer j	$\forall j$
$\mathrm{i} \in \{1, \dots, \mathrm{m}\}$		
$j \in \{1, \dots, N\}$		

b. Variabel

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ kontainer\ j \\ 0, & Otherwise \end{cases} \qquad \forall i, j$$

$$u_j = \begin{cases} 1, & Jika\ kontainer\ j\ digunakan \\ 0, & Otherwise \end{cases} \qquad \forall j$$

$$x_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ sebelah\ kiri\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \qquad \forall i, k$$

$$x_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ sebelah\ kanan\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k$$

$$y_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ belakang\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k$$

$$y_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ depan\ kanan\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k$$

$$z_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ bawah\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k$$

$$z_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ atas\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k$$

$$l_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$l_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Y \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$l_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Z \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$w_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$w_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Y \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$w_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Z \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$h_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$h_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

$$h_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i$$

(x_i, y_i, z_i) $\quad Koordinat\ lokasi\ left - bottom - back$ dari kargo i $\quad \forall i$

i, $k \in \{1, \dots, \mathrm{m}\}$

$j \in \{1, \dots, N\}$

c. Fungsi objektif

Fungsi objektif model ini adalah untuk meminimasi volume yang tidak digunakan pada kontainer.

$$min.\ \sum_{j=1}^{N} u_j \times (L_j \times W_j \times H_j) - \sum_{i=1}^{m} l_i \times w_i \times h_i \tag{2.8}$$

d. Pembatas

$$p_{ij} \leq u_j \qquad \forall i,j \qquad (2.9)$$

$$\sum_j^N p_{ij} = 1 \qquad \forall i \qquad (2.10)$$

$$\sum_i^m b_i p_{ij} \leq B_j \qquad \forall i,j \qquad (2.11)$$

$$x_i + l_i \times l_i^x + w_i \times w_i^x + h_i \times h_i^x \leq L_j + (1 - p_{ij}) \times M \qquad \forall i,j \qquad (2.12)$$

$$y_i + l_i \times l_i^y + w_i \times w_i^y + h_i \times h_i^y \leq W_j + (1 - p_{ij}) \times M \qquad \forall i,j \qquad (2.13)$$

$$z_i + l_i \times l_i^z + w_i \times w_i^z + h_i \times h_i^z \leq H_j + (1 - p_{ij}) \times M \qquad \forall i,j \qquad (2.14)$$

$$x_i + l_i \times l_i^x + w_i \times w_i^x + h_i \times h_i^x \leq x_k + (1 - x_{ik}^+) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.15)$$

$$x_k + l_k \times l_k^x + w_k \times w_k^x + h_k \times h_k^x \leq x_i + (1 - x_{ik}^-) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.16)$$

$$y_i + l_i \times l_i^y + w_i \times w_i^y + h_i \times h_i^y \leq y_k + (1 - y_{ik}^+) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.17)$$

$$y_k + l_k \times l_k^y + w_k \times w_k^y + h_k \times h_k^y \leq y_i + (1 - y_{ik}^-) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.18)$$

$$z_i + l_i \times l_i^z + w_i \times w_i^z + h_i \times h_i^z \leq z_k + (1 - z_{ik}^+) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.19)$$

$$z_k + l_k \times l_k^z + w_k \times w_k^z + h_k \times h_k^z \leq z_i + (1 - z_{ik}^-) \times M \quad \forall i,k,i < k \qquad (2.20)$$

$$x_{ik}^+ + x_{ik}^- + y_{ik}^+ + y_{ik}^- + z_{ik}^+ + z_{ik}^- \geq p_{ij} + p_{kj} - 1 \qquad \forall i,k,j,i < k \qquad (2.21)$$

$$l_i^x + l_i^y + l_i^z = 1 \qquad \forall i \qquad (2.22)$$

$$w_i^x + w_i^y + w_i^z = 1 \qquad \forall i \qquad (2.23)$$

$$h_i^x + h_i^y + h_i^z = 1 \qquad \forall i \qquad (2.24)$$

$$l_i^x + w_i^x + h_i^x = 1 \qquad \forall i \qquad (2.25)$$

$$l_i^y + w_i^y + h_i^y = 1 \qquad \forall i \qquad (2.26)$$

$$l_i^z + w_i^z + h_i^z = 1 \qquad \forall i \qquad (2.27)$$

$$p_{ij}, u_j, x_{ik}^+, x_{ik}^-, y_{ik}^+, y_{ik}^-, z_{ik}^+, z_{ik}^-, l_i^x, l_i^y, l_i^z, w_i^x, w_i^y, w_i^z, h_i^x, h_i^y, h_i^z \in \{0,1\}$$

$$x_i, y_i, z_i \geq 0$$

$$\mathrm{i}, k \in \{1, \dots, \mathrm{m}\}$$

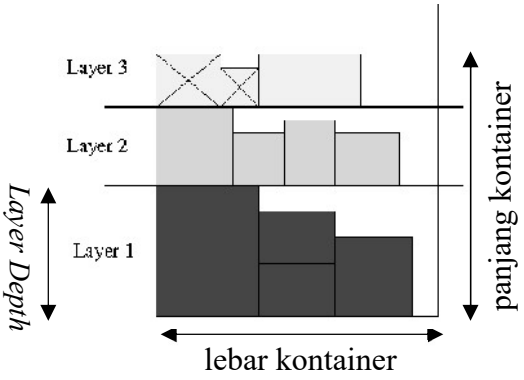
$$j \in \{1, \dots, N\}$$

Pembatas (2.9) dan (2.10) memastikan bahwa semua kargo dimuat dan sebuah kargo hanya dapat dimuat di dalam kontainer jika kontainer tersebut digunakan. Pembatas (2.11) memastikan bahwa total berat kargo yang dimuat tidak melebihi kapasitas maksimal kontainer. Pembatas (2.12) – (2.14) memastikan bahwa penempatan kargo tidak melebihi dimensi kontainer. Pembatas (2.15) – (2.20) menandakan bahwa kargo *i* dan kargo *k* tidak saling

tumpang tindih. Pembatas (2.21) menyatakan bahwa jika terdapat dua kargo yang dimuat di dalam kontainer yang sama, maka setidaknya satu dari posisi relatif akan bernilai 1. Hal tersebut memastikan bahwa kedua kargo tidak saling tumpang tindih. Pembatas (2.22) – (2.27) memastikan bahwa kargo dapat dirotasi tehadap sumbu X, Y, atau Z.

2.9 Metode Heuristik untuk *Container Loading Problem*

Metode heuristik untuk menyelesaikan *container loading problem* dengan kargo berbentuk kotak dan *strongly heterogeneous* dikembangkan pertama kali oleh (George & Robinson, 1980). Sampai saat ini, banyak penelitian-penelitian mengenai *container loading problem* yang masih menggunakan metode tersebut sebagai referensi. Metode heuristik tersebut menggunakan pendekatan *wall-building* atau mengisi kontainer lapisan (*layer*) demi lapisan dari bagian belakang kontainer hingga ke bagian pintu kontainer. Lapisan baru tidak akan dibangun sampai lapisan sebelumnya selesai dibangun. Kedalaman (*depth*) setiap lapisan ditentukan oleh dimensi kargo pertama yang dimuat dalam lapisan tersebut. Metode ini terdiri dari dua bagian, yaitu *filling scheme* dan *creations of new space.*



Gambar 2. 7 Pendekatan *Wall-Building* (Tampak Atas)
(Ceschia & Schaerf, 2013)

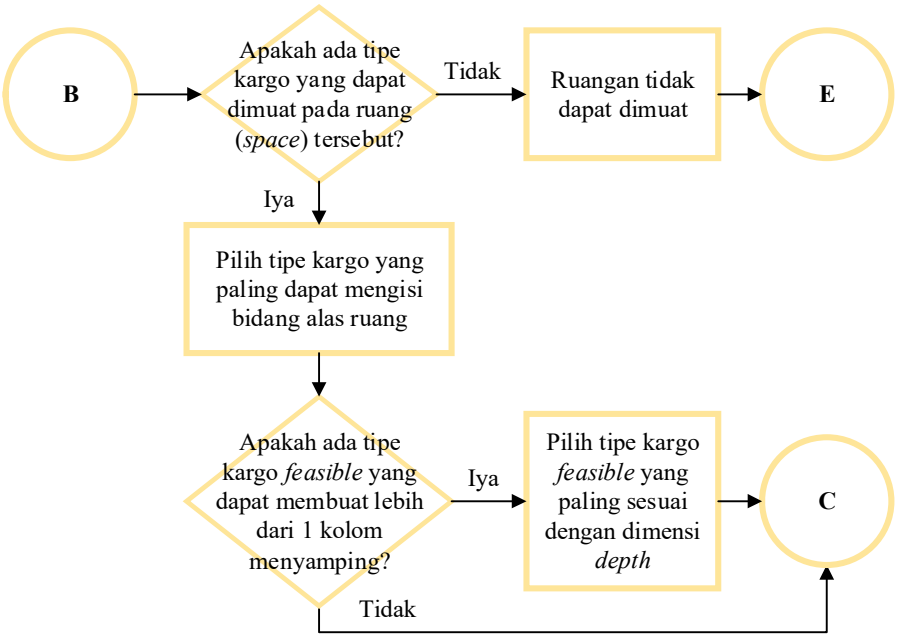
1. *Filling scheme*

   Penentuan tipe kargo yang akan dimuat pertama kali pada suatu lapisan (*layer*) ditentukan oleh beberapa kriteria. Kriteria pertama ditentukan oleh ukuran dimensi terkecil. Semakin besar ukuran dimensi terkecil, semakin tinggi pula peringkat tipe kargo tersebut. Hal tersebut disebabkan karena kargo yang memiliki ukuran dimensi terkecil yang paling besar sulit untuk dimuat pada

proses penyusunan selanjutnya. Oleh karena itu, lebih baik kargo tersebut dimuat paling awal. Kriteria kedua ditentukan oleh jumlah kargo yang belum dimuat, semakin banyak jumlah kargo yang dimuat, semakin tinggi pula peringkat tipe kargo tersebut. Proses pemuatan pada seluruh lapisan akan lebih efisien jika diisi oleh kargo-kargo dengan tipe yang sama.

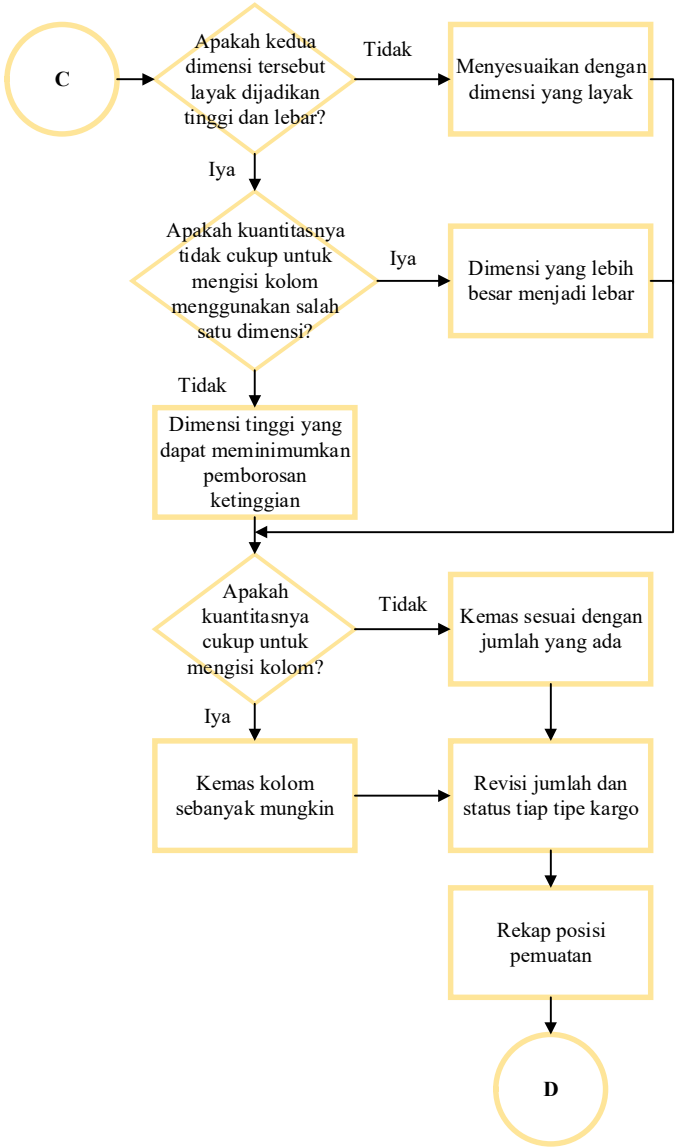
Gambar 2. 8 Proses Pencarian Tipe Kargo untuk Lapisan Baru

Jika tipe kargo yang pertama kali dimuat tidak dapat mengisi keseluruhan lapisan, maka ruang yang tersisa pada lapisan dianggap sebagai ruang baru yang harus diisi. Pengisian kargo pada ruang tersebut dijelaskan pada Gambar 2.9.



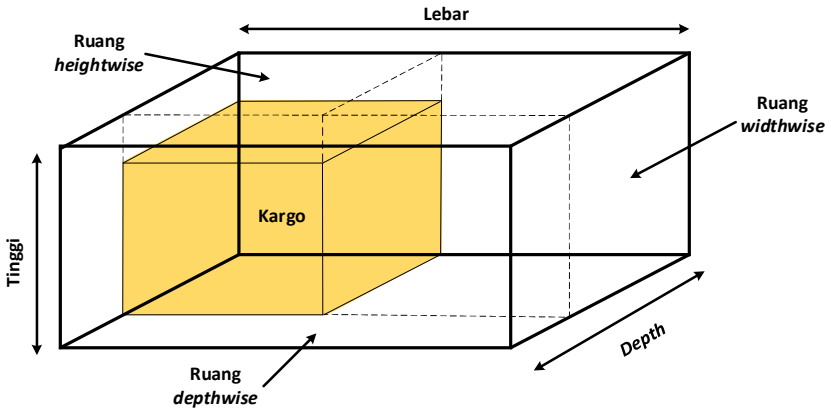
Gambar 2. 9 Proses Pencarian Tipe Kargo untuk Ruang Selain Lapisan Baru

Setelah menentukan dimensi kedalaman (*depth*) dan tipe kargo yang akan dimuat, dimensi lebar dan tinggi serta jumlah kargo yang akan dimuat pada ruang baru perlu ditemukan dengan langkah-langkah pada Gambar 2.10.



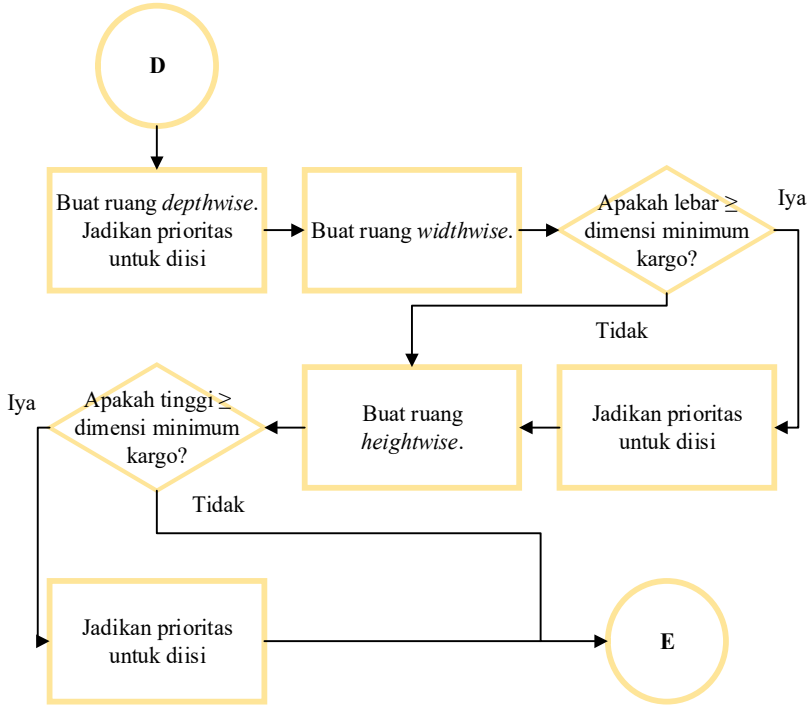
Gambar 2. 10 Proses Pemilihan Dimensi Lebar dan Tinggi dan Kuantitas Kargo

2. *Creations of new space*



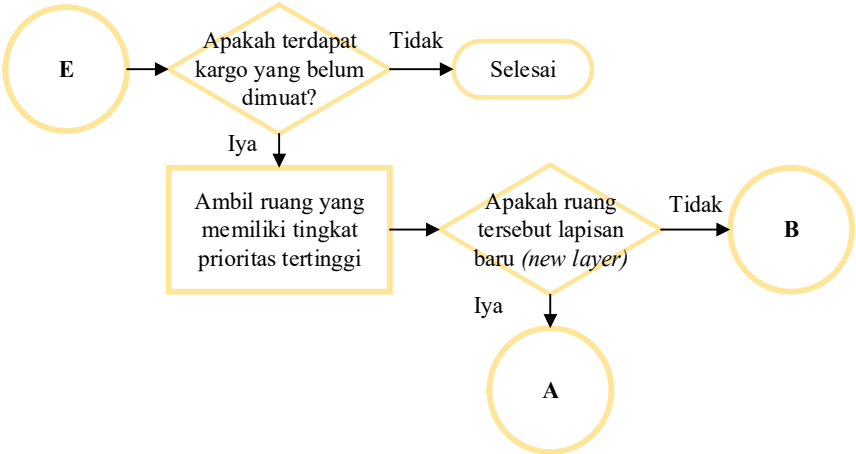
Gambar 2. 11 Skema Pembentukan Ruang Baru

Ketika sekumpulan kargo telah dimuat sesuai dengan skema pada Gambar 2.11, maka terbentuk tiga ruang baru, yaitu ruang *depthwise, widthwise,* dan *heightwise*. Dalam proses pembentukan ruang-ruang tersebut, ruang *widthwise* atau *heightwise* tidak akan terbentuk jika lebar atau tingginya lebih pendek daripada dimensi terkecil kargo yang belum dimuat.



Gambar 2. 12 Proses Pembentukan Ruang Baru (*New Spaces*)

Jika tidak ada kargo yang tersisa, maka algoritma selesai. Namun, jika terdapat kargo yang belum dimuat, maka algoritma akan kembali ke tahap *filling scheme.*



Gambar 2. 13 Proses Pemilihan Ruang Baru

2.10 Posisi Penelitian

Pada subbab ini, penulis akan membandingkan beberapa penelitian mengenai topik *container loading problem* untuk mengetahui posisi penelitian ini. Sebagian besar referensi berasal dari jurnal ilmiah dan terdapat satu referensi berasl dari tugas akhir terdahulu. Berikut adalah referensi yang digunakan.

Tabel 2. 4 Posisi Penelitian Terhadap Penelitian Terdahulu

Penelitian	**Metode**	**Pendekatan Heuristik**	**Pembatas**							
			A	**B**	**C**	**D**	**E**	**G**	**H**	**I**
(Eley, 2002)	*Tree Search*	*Block*		✓	✓		✓			
(Christensen & Rousøe, 2009)	*Tree Search*	*Wall*			✓	✓	✓			✓
(Parreño, et al., 2008)	GRASP	*Block*			✓		✓			

(Liu, et al., 2014)	*Tree Search*	*Wall*			✓		✓	✓		
(Adetio, 2019)	*Constructive Heuristic*	*Wall*	✓			✓	✓		✓	
This Research	***Constructive Heuristic***	***Wall***	✓			✓	✓		✓	✓

Keterangan : A = *weight limit* B = *weight distirbution* C = *orientation* D = *stacking*	E = *stability* F = *guillotiine cutting* G = *internal temperature distribution* H = *multi-drop*

Penelitian yang dilakukan oleh (Eley, 2002) adalah pengembangan algoritma *tree search* dengan menggunakan pendekatan *block-building* untuk *container loading problem* di mana utilitas kontainer menjadi lebih tinggi dibandingkan pendekatan menggunakan *layer-building* yang menggunakan *greedy algorithm.* Padahal, pada penelitian tersebut ditambahkan pembatas baru yaitu *weight* distribution di mana seluruh berat di seluruh lantai harus terdistribusi sama rata. Item yang digunakan pada penelitian ini identik satu sama lain (*homogeneous*) dan memiliki orientasi yang sama sehingga pendekatan *block building* cocok untuk digunakan pada kasus tersebut. Dengan metode yang sama, (Christensen & Rousøe, 2009) mengembangkan model *container loading problem* dengan menambahkan pembatas *multi-drop* di mana saat mencapai tujuan pengiriman tidak ada aktivitas penataan ulang (*reloading*). Menurut (Christensen & Rousøe, 2009), tidak banyak penelitian yang mempertimbangkan pembatas *multi-drop*, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode lain, seperti *tree search*. Pada penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan *wall-building* cocok dengan pembatas *multi-drop.*

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh (Parreño, et al., 2008) adalah pengembangan algoritma heuristik baru yaitu *greedy randomized adaptive search procedure* (GRASP). GRASP merupakan prosedur yang bersifat repetitif yang terdiri dari dua tahap, yaitu tahap konstruktif dan tahap perbaikan. Dalam fase

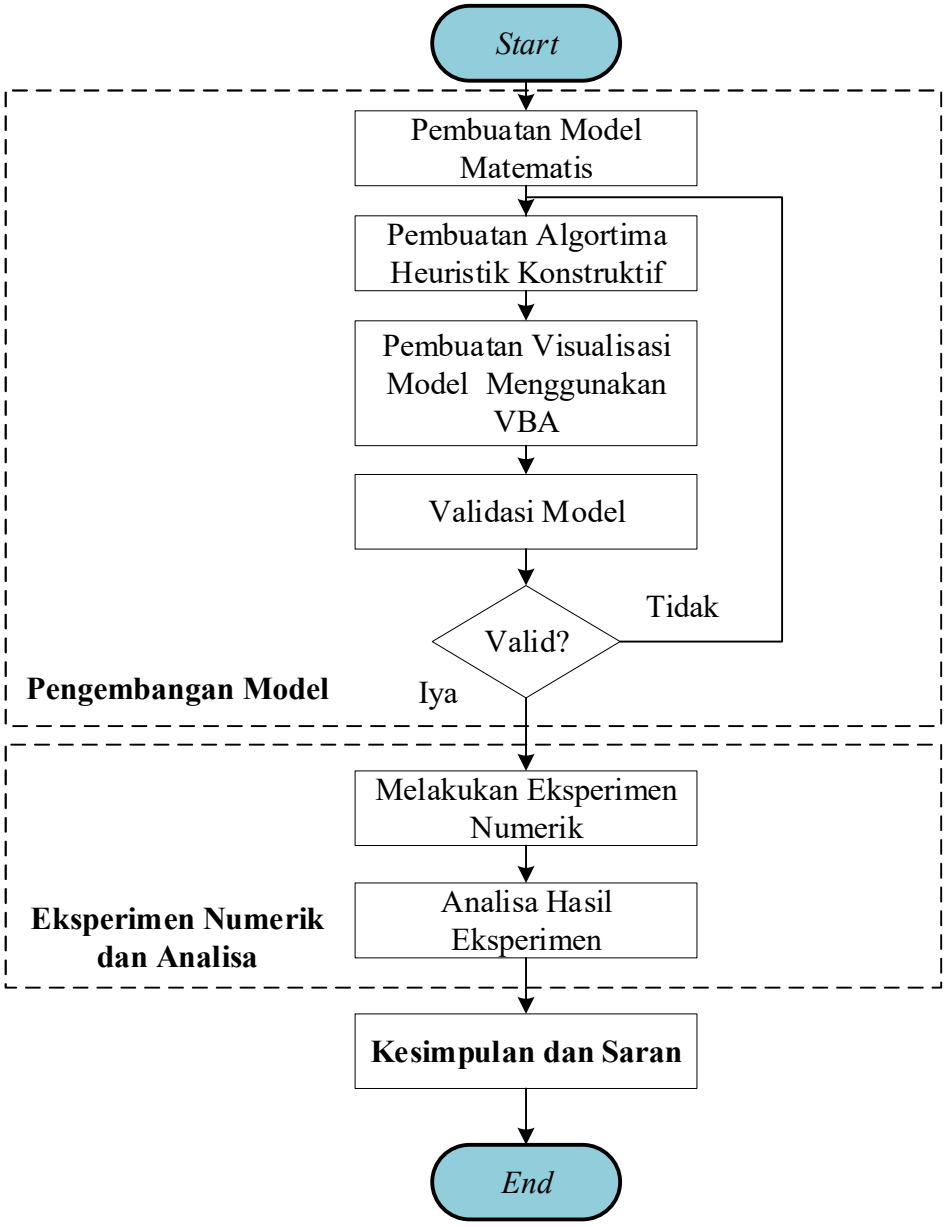
konstruktif, solusi dibangun langkah demi langkah, menambahkan elemen-elemen ke solusi awal. Pada fase perbaikan, biasanya menggunakan algoritma *tree search* sederhana dan dilanjutkan kembali ke fase konstruktif. Tingkat utilitas kontainer yang dihasilkan dengan metode tersebut adalah 93,8%, angka tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat utilitas pada penelitian (Christensen & Rousøe, 2009) sebesar 89,07%. Menurut (Parreño, et al., 2008), pembatas *stability* merupakan hal terpenting pada model *container loading problem* karena lebih menggambarkan kondisi *real.* Selanjutnya, (Liu, et al., 2014) membuat algoritma baru yaitu *Heuristic Binary Tree Search* (HBTS) yang merupakan hasil pengembangan algoritma yang dibuat oleh (Pisinger, 2002). Pendekatan yang digunakan pada penelitian ini adalah *wall-building.* Dari hasil penelitian tersebut, metode tersebut cocok digunakan jika komoditi yang disimpan pada kontainer bersifat *strongly heterogeneous.* Penelitian yang dilakukan oleh (Adetio, 2019) adalah pengembangan model *container loading problem* pada *refrigerated container*. Pada penelitian ini pembatas baru, yaitu *internal temperature distribution,* diperkenalkan untuk mengetahui suhu yang diterima masing-masing produk di dalam kontainer. Penelitian tersebut menjadi bahan acuan penulis dalam mengembangkan model *multi-drop refrigerated-container loading problem* (MR-CLP). Masing-masing penelitian yang ditinjau menunjukkan adanya perbaikan, namun hasil dari penelitian-penelitian tersebut tidak dapat dibandingkan satu sama lain karena pembatas yang digunakan berbeda-beda, walaupun terdapat parameter yang bisa dijadikan perbandingan, seperti utilitas volume.

Berdasarkan referensi-referensi tersebut, penulis berencana untuk mengembangkan model *refrigerated-container loading problem* dengan mempertimbangkan pembatas baru, yaitu *multi-drop.* Penelitian ini menggunakan metode heuristik konstruktif dengan pendekatan *wall-building* dan *dynamic sequencing*. Tipe kargo pada penelitian ini bersifat *strongly heterogeneous* dan tipe kontainer bersifat *homogeneous*. Penelitian ini lebih berfokus kepada dampak suhu penyimpanan dan penyusunan *last-in first-out* terhadap total biaya yang terdiri dari *penalty cost, quality cost, unnecessary moving cost, refrigerator cost, shipping cost,* dan *vehicle cost.*

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai metodologi yang digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Gambar 3.1 merupakan flowchart metodologi penelitian yang digunakan sebagi panduan oleh penulis.



Gambar 3. 1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

3.1 Pengembangan Model

Pada bagian ini, model matematis *multi-drop refrigerated-container loading problem* (MR-CLP) akan dikembangkan berdasarkan pada model matematis *container loading problem* yang dikembangkan oleh (Chen, et al., 1995) dan (Li & Zhang, 2015). Model matematis ini dibuat sebagai panduan penulis dalam merancang algoritma heuristik konstruktif. Fungsi objektif dari model tersebut adalah untuk meminimasi total biaya yang terdiri dari *penalty cost, quality loss cost, unnecessary moving cost, refrigeration cost, shipping cost,* dan *vehicle cost.* Terdapat beberapa pembatas (*constrain*) yang digunakan pada model ini, yaitu *weight limit*, *stacking*, *stability, internal temperature distribution*, dan *multi-drop*. Selain itu, kargo yang dimuat pada *reefer* dapat dirotasi secara vertikal dan horizontal sehingga terdapat 6 jenis konfigurasi orientasi. Beberapa teori mengenai penurunan kualitas dari (Yang, et al., 2017) dan (Zúñiga & Troncoso, 2013), penentuan suhu produk dari (Adetio, 2019) , serta total konsumsi energi pada *reefer* dari (Akdemir, 2008), juga dimasukkan ke dalam model matematis MR-CLP ini.

Selanjutnya, algoritma heuristik konstruktif untuk menyelesaikan *refrigerated-container loading problem* dikembangkan dari algoritma heuristik yang dibuat oleh (George & Robinson, 1980) dan (Ceschia & Schaerf, 2013) . Pembuatan algoritma ini menggunakan pendekatan *wall-building* dan *dynamic sequencing.* Selanjutnya, model MR-CLP akan divisualisasikan menggunakan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel berdasarkan algoritma yang sudah dirancang. Lalu, dilakukan proses validasi terhadap model MR-CLP yang sudah divisualisasikan dengan VBA. Proses validasi dilakukan dengan menggunakan data-data sekunder yang diambil dari berbagai referensi. Hasil dari proses ini akan menentukan apakah model yang sudah dibuat valid atau tidak. Jika tidak, maka perlu dilakukan evaluasi serta perbaikan terhadap algoritma yang sudah dirancang sebelumnya. Pada tahap ini, *software* ANSYS FLUENT sebagai *tools* dari *computational dynamics fluid* (CFD) digunakan untuk mengetahui pendistribusian suhu di dalam *reefer*. Terdapat dua parameter yang digunakan, yaitu suhu penyimpanan pada *reefer* dan kecepatan udara. Dengan diketahuinya pendistribusian suhu di dalam *reefer*, maka suhu yang diterima setiap produk dapat diketahui sehingga tingkat kualitas pada setiap produk dapat ditentukan.

3.2 Eksperimen Numerik dan Analisis

Setelah model dianggap valid, dilakukan eksperimen numerik terhadap model MR-CLP. Terdapat 4 eksperimen numerik yang akan dilakukan, yaitu:

1. Pengaruh suhu penyimpanan dan kecepatan udara terhadap penyusunan kargo.
2. Pengaruh dimensi kargo (identik, *weakly heterogeneous, strongly* heterogeneous) terhadap penyusunan kargo.
3. Perbandingan antara *dedicated reefer loading* berdasarkan produk, *dedicated reefer loading* berdasarkan tujuan, dan MR-CLP.
4. Pengaruh waktu tempuh pengiriman terhadap penyusunan kargo.

Selanjutnya, hasil dari masing-masing eksperimen tersebut akan dianalisis dan diinterpretasi.

3.3 Kesimpulan dan Saran

Bagian ini akan menyimpulkan keseluruhan dari penelitian ini dengan cara menjawab tujuan-tujuan yang ingin dicapai. Selain itu, diberikan pula saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4
PENGEMBANGAN MODEL

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai proses pengembangan model *multi-drop refrigerated-container loading problem* (MR-CLP) yang terdiri dari deskripsi model, perumusan model, algoritma heuristik, dan validasi model.

4.1 Deskripsi Model

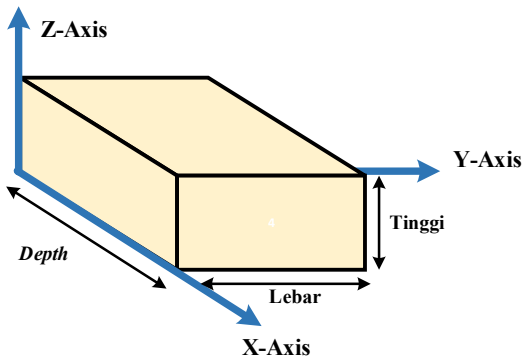
Model *multi-drop refrigerated-container loading problem* (MR-CLP) adalah sebuah *container loading problem* di mana kargo produk buah-buahan dan sayuran dengan titik pengiriman berbeda-beda disusun ke dalam *refrigerated container* (*reefer*). Karena menggunakan konsep *multi-drop*, kargo untuk pelanggan yang terakhir dikunjungi harus dimuat lebih dulu daripada kargo untuk pelanggan yang lebih awal atau dapat disebut *last-in first-out* (LIFO) sehingga proses *loading* dan *unloading* di setiap titik pengiriman dapat diminimasi. *Reefer* yang digunakan pada model ini memiliki distribusi suhu yang tidak homogen sehingga kargo yang ditempatkan menjauhi unit pendingin memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan kargo yang ditempatkan berdekatan dengan unit pendingin. Oleh karena itu, *internal temperature distribution* perlu dipertimbangkan dalam menentukan strategi penempatan kargo dalam *reefer* sehingga total biaya dapat diminimumkan. Berikut ini beberapa pembatas (*constraint*) yang dipertimbangkan pada model MR-CLP.

Tabel 4. 1 Pembatas pada *Multi-drop Refrigerated-Container Loading Problem*

No.	Pembatas	Deskripsi
1	*Weight Limit*	Berat total muatan di dalam *reefer* tidak boleh melebihi batas berat maksimal *reefer*
2	*Stcaking*	Membatasi penumpukan kargo secara vertikal, di mana kargo yang lebih berat tidak boleh ditumpuk di atas kargo yang lebih ringan
3	*Vertical Stability*	Bagian alas kargo harus ditunjang secara keseluruhan atau sebagian oleh lantai *reefer* atau bagian atas kargo di bawahnya

No.	Pembatas	Deskripsi
4	*Multi-Drop*	Item-item dari suatu kelompok kargo tidak hanya harus ditempatkan berdekatan satu sama lain, tetapi juga harus mempertimbangkan urutan pengiriman untuk meminimasi proses *unloading-reloading*
5	*Internal Temperature Distribution*	Setiap kargo harus ditempatkan pada area yang memiliki suhu yang sesuai dengan suhu optimal kargo sehingga penurunan kualitas dapat diminimumkan

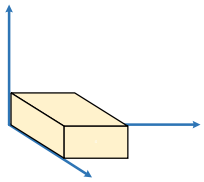
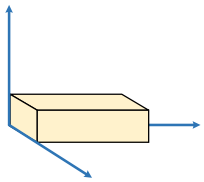
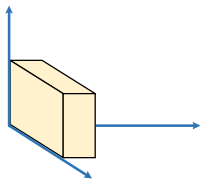
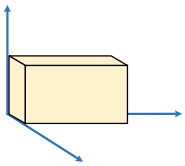
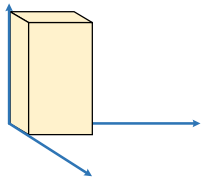
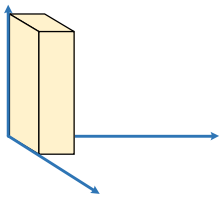
Pembatas-pembatas tersebut digunakan agar model MR-CLP dapat menggambarkan kondisi nyata pemuatan kargo pada sebuah *reefer.* Selain pembatas-pembatas tersebut, terdapat tiga *basic geometric* untuk *container loading problem* yang harus dipenuhi, yaitu seluruh kargo harus berada seluruhnya di dalam *reefer*, tidak ada tumpang tindih antar kargo, dan permukaan kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai *reefer.* Model ini memperbolehkan kargo untuk dirotasi menjadi 6 jenis orientasi di mana *base* (alas) menggambarkan orientasi vertikal atau dirotasi terhadap *x-axis* atau *y-axis* dan *rotation* menggambarkan orientasi horizontal atau dirotasi terhadap *z-axis*. Orientasi A merupakan orientasi standar di mana panjang (*depth*) kargo sejajar dengan *y-axis*, lebar kargo sejajar dengan *x-axis*, dan tinggi kargo sejajar dengan *z-axis*, sehingga alas untuk orientasi A adalah *depth* – lebar. Orientasi C dan D merupakan hasil rotasi orientasi A secara vertikal terhadap *y-axis* sehingga alas kargo adalah *depth* dan tinggi, sedangkan orientasi E dan F merupakan hasil rotasi orientasi A secara vertikal terhadap *x-axis* sehingga alas kargo adalah tinggi dan lebar.



Gambar 4. 1 Orientasi A atau Orientasi Standar

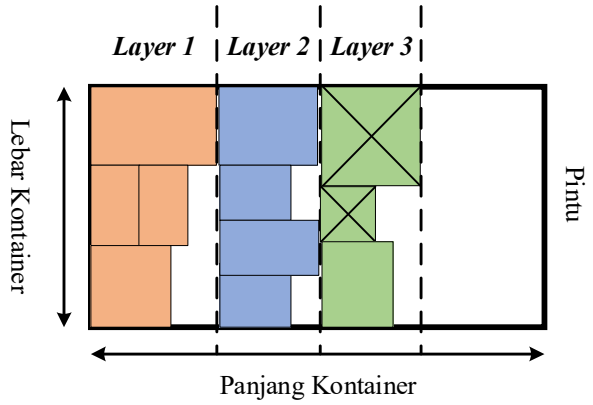
Berikut adalah penjelasan dari masing-masing jenis orientasi kargo yang digunakan pada model MR-CLP.

Tabel 4. 2 Jenis Orientasi Kargo

No	Orientasi	Alas (*y-axis – x-axis*)	Rotasi	Ilustrasi
1	A	*Depth* - Lebar	Tidak	
2	B	Lebar - *Depth*	Iya	
3	C	*Depth* – Tinggi	Tidak	
4	D	Tinggi - *Depth*	Iya	
5	E	Tinggi - Lebar	Tidak	
6	F	Lebar - Tinggi	Iya	

Model ini menggunakan pembatas *multi-drop* sehingga strategi penyusunan kargo di dalam *reefer* harus menggunakan prinsip *last-in first-out* (LIFO), yaitu kargo untuk pelanggan yang terakhir dikunjungi harus dimuat lebih dulu daripada kargo untuk pelanggan yang lebih awal. Pada Gambar 4.2 mengilustrasikan penyusunan kargo pada *reefer* berdasarkan lokasi pengiriman. *Layer* 1 merupakan

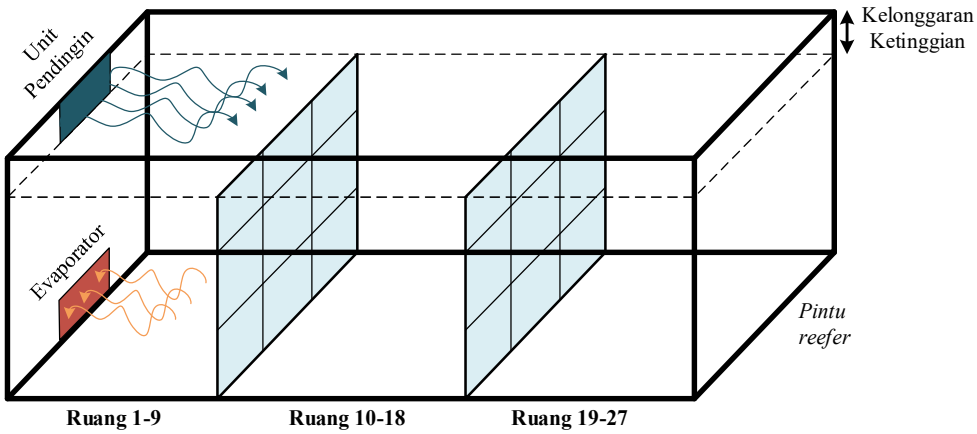
area paling dalam dari sebuah *reefer* atau paling jauh dari pintu dan *layer* 2 merupakan area terdekat dari pintu. Kargo-kargo yang dikirim ke lokasi terakhir dikunjungi akan ditempatkan pada *layer* 1, selanjutnya kargo-kargo yang dikirim ke lokasi kedua terakhir dikunjungi ditempatkan pada *layer* 2, begitu pula seterusnya.



Gambar 4. 2 Penyusunan Kargo Berdasarkan LIFO

Pada penelitian ini, jenis truk yang digunakan adalah *colt diesel double* (CDD). Truk tersebut dilengkapi sebuah *reefer* yang memiliki dimensi panjang (*depth*) 545 cm, lebar 228 cm, dan tinggi 239 cm serta kapasitas muatan adalah 29.140 kg. *Reefer* ini memiliki satu unit pendingin yang berfungsi mengalirkan udara dingin. Unit pendingin tersebut terletak di bagian tengah-atas dinding terdalam *reefer.* Setelah udara dingin bersirkulasi mengelilingi kargo, udara dingin tersebut berubah menjadi udara panas. Lalu, udara panas tersebut dihisap oleh evaporator dan diubah kembali menjadi udara dingin. Evaporator tersebut terletak di bagian tengah-bawah dinding terdalam *reefer.* Antara dinding *reefer* dengan kargo terdapat kelonggaran jarak sebesar 35 cm agar udara dingin dapat bersikulasi dengan baik tanpa terhalang oleh kargo. Model ini mempertimbangkan *internal temperature distribution* sebagai pembatas khusus, sehingga perlu diketahui penyebaran suhu di setiap titik dalam *reefer.* Penelitian ini menggunakan pendekatan *computational fluid dynamic* (CFD) dengan bantuan *software* ANSYS FLUENT dalam menyimulasikan aliran udara dingin di dalam *reefer.* Terdapat dua parameter yang digunakan dalam simulasi tersebut yaitu suhu penyimpanan dan kecepatan udara. *Reefer* akan dibagi menjadi 27 ruang dengan volume yang sama

besar di mana masing-masing area tersebut memiliki suhu yang berbeda pula akibat penyebaran suhu yang tidak merata. Gambar 4.3 di bawah ini menunjukkan pembagian 27 ruang di dalam *reefer* beserta posisi unit pendingin dan evaporator.



Gambar 4. 3 Pembagian Ruang pada *Reefer*

Setiap kargo yang ditempatkan di dalam *reefer* mungkin akan menerima suhu yang berbeda-beda dikarenakan distribusi suhu yang tidak seragam. Oleh karena itu, penentuan suhu yang diterima oleh kargo perlu dihitung menggunakan rumus yang dikembangkan oleh (Adetio, 2019). Penentuan suhu yang diterima kargo ditentukan dari proporsi volume kargo yang menerima suhu T_i terhadap total volume kargo.

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^{n} wd_i T_i}{\sum_{i=1}^{n} wd} \tag{4.1}$$

Keterangan:

TR = Suhu rata-rata yang diterima kargo di dalam *reefer* (K)

T_i = Suhu i yang diterima oleh kargo (K)

Wd_i = Volume kargo yang menerima suhu T_i (m^2)

Wd = Volume kargo (m^2)

Selain menghitung suhu, setiap kargo juga akan dihitung tingkat kualitasnya agar dapat ditentukan apakah kualitas kargo memenuhi persyaratan kualitas yang ditentukan oleh pelanggan. Tingkat kualitas kargo di dalam *reefer* dipengaruhi oleh

beberapa faktor yaitu kondisi atmosfer lingkungan, suhu penyimpanan *reefer*, dan waktu pengiriman. Kargo yang ditempatkan di dalam *reefer* mungkin akan menerima suhu yang lebih tinggi dari suhu optimal kargo. Karena buah-buahan dan sayuran sangat sensitif terhadap suhu penyimpanan maka semakin tinggi suhu yang diterima oleh kargo, semakin cepat pula tingkat penurunan kualitasnya. Penentuan tingkat kualitas kargo yang dikembangkan oleh (Yang, et al., 2017) dan (Zúñiga & Troncoso, 2013) dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\mathrm{q} = q_0 e^{-\lambda t} \tag{4.2}$$

Keterangan :

q = *remaining quality of product*

q_0 = *initial quality of product*

e = bilangan eulier (e = 2.718)

λ = tingkat penurunan kualitas

t = waktu penyimpanan produk (jam)

Di mana nilai λ atau tingkat penurunan kualitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\lambda = k_0 e^{-\left(\frac{E}{R} \times \left(\frac{1}{T_{eff}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)} \tag{4.3}$$

Keterangan :

λ = tingkat penurunan kualitas

k_0 = nilai konstan untuk penurunan kualitas

e = bilangan eulier (e = 2.718)

E = energi aktifasi untuk penurunan kualitas

R = konstanta gas (R = 8,31 J/mol K)

T_{eff} = suhu yang diterima oleh produk (K)

T_{ref} = suhu optimal produk (K)

Jika sebuah kargo ditempatkan pada area di mana tingkat kualitasnya lebih rendah daripada tingkat kualitas yang sudah ditentukan, maka produk yang berada di dalam kargo tidak dapat diterima oleh pelanggan. Hal tersebut dapat menyebabkan produk menjadi *food loss* dan perusahaan akan dibebankan biaya yaitu *lost sale.* Oleh karena itu, kargo tersebut harus dipindah ke area di mana tingkat penurunan kualitas lambat sehingga tingkat kualitas produk dapat memenuhi syarat kualitas yang sudah ditentukan.

Model ini memiliki fungsi tujuan yaitu untuk meminimasi total biaya yang terdiri dari *penalty cost*, *quality loss cost*, *refrigeration cost*, *shipping cost, unnecessary moving cost* dan *vehicle cost.* Total biaya dipengaruhi oleh jumlah kargo yang dimuat, penempatan kargo di dalam *reefer*, dan lokasi pengiriman. Berikut ini adalah penjelasan untuk masing-masing komponen total biaya.

1. *Penalty cost* adalah biaya yang dikeluarkan akibat kargo yang tidak dapat dimuat karena kapasitas *reefer* yang terbatas. *Penalty cost* sama dengan jumlah kargo yang tidak dapat dimuat (*unloaded cargo*) dikalikan dengan nilai jual setiap tipe kargo.
2. *Quality loss cost* adalah biaya yang dibebankan akibat adanya penurunan kualitas pada kargo sehingga umur simpan (*shelf life*) produk menurun. Penurunan kualitas (*quality loss*) pada produk dipengaruhi oleh waktu pengiriman dan perbedaan suhu yang diterima kargo dengan suhu optimal produk. *Quality loss cost* didapatkan dari perkalian *quality loss* (%) dengan nilai jual kargo.
3. *Refrigeration cost* adalah biaya pemakaian energi untuk pengoperasian sebuah *reefer.* Energi yang dibutuhkan dalam pengoperasian sebuah *reefer* dibagi menjadi dua aspek yaitu *heat load* dan *product load. Heat load* adalah energi panas yang masuk ke dalam *reefer* melalui atap, dinding, dan lantai. *Product load* adalah energi panas yang dipengaruhi oleh karakteristik kargo. Sehingga, total energi yang dibutuhkan dalam pengoperasian sebuah *reefer* adalah hasil penambahan dari *heat load* dan *product load. Refrigeration cost* adalah hasil perkalian total konsumsi energi (watt), total waktu pengiriman, dan tarif listrik (per kWh).

4. *Shipping cost* adalah biaya-biaya yang berkaitan dengan variabel jarak pengiriman, yaitu bahan bakar, pelumas, ban, dan upah supir.
5. *Unnecessary moving cost* adalah biaya yang dikeluarkan akibat kargo tidak dimuat berdasarkan urutan pengiriman di mana kargo dengan lokasi terdekat dimuat terlebih dahulu sehingga membutuhkan proses *unloading* dan *loading* di setiap lokasi pengiriman. Pemuatan kargo tidak sesuai dengan urutan pengiriman disebabkan oleh pembatas *stacking* dan *vertical stability. Unnecessary moving cost* adalah hasil perkalian selisih nilai *sequence* dengan *unnecessary moving cost* per unit *sequence*.
6. *Vehicle cost* merupakan biaya tetap (*fixed cost*) yang dikeluarkan akibat penggunaan truk dan *reefer.* Nilai dari *vehicle cost* dapat bervariasi sesuai dengan jenis truk dan ukuran *reefer.*

4.2 Perumusan Model

Model MR-CLP ini tergolong ke dalam *NP-Hard* sehingga metode *exact* tidak dapat digunakan untuk menyelesaikan model ini. Oleh karena itu, penulis mengembangkan algorima heuristik konstruktif pada Subbab 4.3 sebagai metode yang tepat untuk menyelesaikan model MR-CLP ini. Meskipun demikian, model matematis ini tetap dibuat sebagai dasar dalam membangun algoritma heuristik konstruktif. Terdapat dua jenis model MR-CLP yang dikembangkan, yaitu *output (value) maximization* dengan satu *reefer* (*Single* MR-CLP) dan *input (value) minimization* dengan multi-*reefer* (Multi MR-CLP). Model matematis MR-CLP ini dikembangkan berdasarkan model matematis *container loading problem* penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu (Chen, et al., 1995), (Li & Zhang, 2015), dan (Pedruzzi, et al., 2016).

4.2.1 Parameter

Berikut ini adalah parameter model matematis MR-CLP.

1. Parameter *variable set*

C *Set of cargos* = {1, 2, 3, ..., n}

D	*Set of reefers* = {1, 2, 3, ..., N}	

2. Parameter variabel biaya

EC	Biaya listrik per kWh	
FC	Biaya bahan bakar per km	
OC	Biaya oli per km	
TC	Biaya ban per km	
WC	Biaya upah supir per jam	
UC	Biaya *unnecessary moving* per unit *sequence*	
VC	Biaya kendaraan (truk) per unit	

3. Parameter variabel kargo

n	Jumlah kargo i yang dimuat	
l_i	Panjang (*depth*) kargo i (m)	$\forall i \in C$
w_i	Lebar kargo i (m)	$\forall i \in C$
h_i	Tinggi kargo i (m)	$\forall i \in C$
b_i	Berat kargo i (m)	$\forall i \in C$
v_i	Nilai jual kargo i	$\forall i \in C$
M	Bilangan besar	

4. Parameter variabel *reefer*

N	Jumlah *reefer* j yang tersedia	
L_j	Panjang (*depth*) *reefer* j (m)	$\forall j \in D$
W_j	Lebar *reefer* j (m)	$\forall j \in D$
H_j	Tinggi *reefer* j (m)	$\forall j \in D$
B_j	Kapasitas maksimum *reefer* j (kg)	$\forall j \in D$

5. Parameter variabel kualitas

U_i	Umur simpan (*shelf life*) kargo i (s)	$\forall i \in C$
Q_i	Syarat kualitas kargo i	$\forall i \in C$
k_0	Nilai konstanta untuk penurunan kualitas	
e	Bilangan eulier (e = 2.718)	

E Energi aktifasi untuk penurunan kualitas ($Jmol^{-1}K$)

R Konstanta gas ideal (R = 8,31 $Jmol^{-1}K$)

6. Parameter variabel energi pada *reefer*

λ Konduktivitas termal ($Wm^{-1}K$)

s Ketebalan material dinding *reefer* (m)

A Luas permukaan *reefer* (m^2)

c_p Kapasitas panas spesifik produk ($J\ kg^{-1}\ K$)

7. Parameter variabel lokasi pengiriman

t_i Waktu pengiriman kargo i (jam) $\forall i \in C$

t_{tot} Total waktu pengiriman (jam)

d_{tot} Total jarak pengiriman (m)

o_i Urutan pengiriman kargo i. Kargo dengan nilai terendah akan dikunjungi terlebih dahulu dan kargo dengan nilai tertinggi akan menjadi yang terakhir dikunjungi

8. Parameter variabel suhu

T_i Suhu yang diterima oleh kargo i (K) $\forall i \in C$

TR_i Suhu optimal kargo i (K) $\forall i \in C$

T_{int} Suhu internal *reefer* (K)

T_{ext} Suhu eksternal *reefer* (K)

9. Parameter variabel keputusan

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ kontainer\ j \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C, j \in D$$

$$u_j = \begin{cases} 1, & Jika\ kontainer\ j\ digunakan \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall j \in D$$

$$x_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ sebelah\ kiri\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$x_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ disebelah\ kanan\ kargo\ k(i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$y_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ belakang\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$y_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ depan\ kanan\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$z_{ik}^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ bawah\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$z_{ik}^{-} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ di\ atas\ kargo\ k\ (i < k) \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C$$

$$l_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$l_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Y \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$l_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ panjang\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Z \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$w_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$w_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Y \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$w_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ lebar\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ Z \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$h_i^x = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$h_i^y = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$h_i^z = \begin{cases} 1, & Jika\ tinggi\ kargo\ i\ sejajar\ dengan\ sumbu\ X \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$S^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ ditunjang\ sebesar\ 100\% \\ 0, & Jika\ kargo\ i\ ditunjang\ sebesar\ 0\% \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$N^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ T_i\ \geq\ TR_i \\ 0, & Jika\ T_i\ <\ TR_i \end{cases} \quad \forall i \in C$$

$$P^{+} = \begin{cases} 1, & Jika\ kargo\ i\ dimuat\ sebelum\ kargo\ k \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k$$

(x_i, y_i, z_i) $\quad$ $Koordinat\ lokasi\ left - bottom - back$ dari kargo i $\quad$ $\forall i \in C$

Variabel x_i, y_i, z_i digunakan untuk mengetahui posisi kargo di dalam *reefer*. Sedangkan, variabel $x_{ik}^{+}, x_{ik}^{-}, y_{ik}^{+}, y_{ik}^{-}, z_{ik}^{+}, z_{ik}^{-}$ digunakan untuk memastikan bahwa tidak ada tumpang tindih antar kargo (i dan k). Apabila, variabel $x_{ik}^{+}, x_{ik}^{-}, y_{ik}^{+}, y_{ik}^{-}, z_{ik}^{+}, z_{ik}^{-}$ bernilai 1, maka kargo i berada di sebelah kiri, kanan, belakang, depan, bawah, dan atas kargo j secara berurutan.Variabel $l_i^x, l_i^y, l_i^z, w_i^x, w_i^y, w_i^z, h_i^x, h_i^y, h_i^z$ digunakan untuk memastikan setiap kargo

ditempatkan sejajar terhadap lantai dan dinding *reefer.* Selain itu, variabel tersebut digunakan untuk mengetahui orientasi setiap kargo, apakah dirotasi terhadap sumbu X, Y, atau Z. Sebagai contoh, variabel l_i^y w_i^x, h_i^z bernilai 1, maka bagian alas kargo i adalah panjang – lebar atau jenis orientasi B.

Variabel S^+ digunakan untuk memastikan bahwa setiap kargo ditunjang sebesar 100% oleh lantai atau kargo yang berada di bawahnya. Variabel N^+digunakan untuk memastikan apakah sebuah kargo menerima suhu di atas atau sesuai dengan suhu optimalnya. Variabel P^+ digunakan untuk mengakomodasi kargo yang dimuat tanpa memerhatikan urutan pengiriman. Sebagai contoh, terdapat kargo i dengan nilai o_i = 4 dan kargo k dengan nilai o_k = 5. Kargo i merupakan kargo yang dikirim terlebih dahulu daripada kargo k sehingga kargo k harus dimuat terlebih dahulu apabila mengikuti LIFO. Namun, karena tidak memenuhi pembatas *stacking* dan *vertical stability* sehingga kargo *i* dimuat terlebih dahulu dan nilai P^+ sama dengan 1.

4.2.2 Model Matematis *Single Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai model matematis untuk *single multi-drop refrigerated-container loading problem* (Single MR-CLP) atau jenis *output (value) maximization.*

4.2.2.1 Fungsi Objektif

Fungsi objektif untuk Single MR-CLP adalah untuk meminimasi total biaya yang terdiri dari *penalty cost, quality loss cost, refrigeration cost, shipping cost, unnecessary moving cost* dan *vehicle cost.* Total biaya dipengaruhi oleh jumlah kargo yang dimuat, penempatan kargo di dalam *reefer*, dan lokasi pengiriman.

$$Min.\left[[(n-\sum_{i=1}^{n}p_i)\times v_i]+\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i+N_i\left(U_i-U_ie^{-t_ik_0e^{-\left(\frac{E}{R}\times\left(\frac{1}{T_i}-\frac{1}{TR_i}\right)\right)}}\right)}{U_i}\times v_i\times p_i\right]+\right.$$

$$\left[\left(\frac{\lambda}{s}\times A\times(T_{ext}-T_{int})\right)+\left(\frac{1}{t_{tot}}\times\sum_{i=1}^{n}b_ip_i\times c_p\times(T_{ext}-T_{int})\right)\times t_{tot}\times\right.$$

$$\left.EC\right]+[(d_{tot}\times(FC+OC+TC))+(t_{tot}\times WC)]+[\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}P^{+}(o_k-o_i)\times$$

$$\left.UC]+[VC]\right] \quad (4.4)$$

4.2.2.2 Pembatas

Pembatas yang digunakan pada model ini terdiri dari pembatas yang berkaitan dengan *basic geometric*, yaitu seluruh kargo berada seluruhnya di dalam *reefer*, tidak ada tumpang tindih antar kargo, dan permukaan kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai *reefer*, serta pembatas khusus, yaitu *weight limit, stacking, vertical stability, multi drop,* dan *internal temperature distribution.* Berikut ini adalah pembatas-pembatas yang digunakan pada model Single MR-CLP.

1. Kargo tidak dapat melebihi dimensi *reefer* atau harus ditempatkan di dalam *reefer* (*basic geometric*).

$$x_i+l_i\times l_i^x+w_i\times w_i^x+h_i\times h_i^x\leq L_j+(1-p_{ij})\times M \qquad \forall i\in C, j\in D \quad (4.5)$$

$$y_i+l_i\times l_i^y+w_i\times w_i^y+h_i\times h_i^y\leq W_j+(1-p_{ij})\times M \qquad \forall i\in C, j\in D \quad (4.6)$$

$$z_i+l_i\times l_i^z+w_i\times w_i^z+h_i\times h_i^z\leq H_j+(1-p_{ij})\times M \qquad \forall i\in C, j\in D \quad (4.7)$$

2. Kargo tidak dapat ditempatkan pada area yang sama atau tidak saling tumpang tindih (*basic geometric*).

$$x_i+l_i\times l_i^x+w_i\times w_i^x+h_i\times h_i^x\leq x_k+(1-x_{ik}^{+})\times M \quad \forall i,k\in C, i<k \quad (4.8)$$

$x_k + l_k \times l_k^x + w_k \times w_k^x + h_k \times h_k^x \leq x_i + (1 - x_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.9)

$y_i + l_i \times l_i^y + w_i \times w_i^y + h_i \times h_i^y \leq y_k + (1 - y_{ik}^+) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.10)

$y_k + l_k \times l_k^y + w_k \times w_k^y + h_k \times h_k^y \leq y_i + (1 - y_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.11)

$z_i + l_i \times l_i^z + w_i \times w_i^z + h_i \times h_i^z \leq z_k + (1 - z_{ik}^+) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.12)

$z_k + l_k \times l_k^z + w_k \times w_k^z + h_k \times h_k^z \leq z_i + (1 - z_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.13)

$x_{ik}^+ + x_{ik}^- + y_{ik}^+ + y_{ik}^- + z_{ik}^+ + z_{ik}^- \geq p_{ij} + p_{kj} - 1 \quad \forall i, k \in C, i < k$ (4.14)

3. Kargo dapat dirotasi terhadap sumbu X, Y, dan Z (orientasi kargo).

$l_i^x + l_i^y + l_i^z = 1 \quad \forall i \in C$ (4.15)

$w_i^x + w_i^y + w_i^z = 1 \quad \forall i \in C$ (4.16)

$h_i^x + h_i^y + h_i^z = 1 \quad \forall i \in C$ (4.17)

$l_i^x + w_i^x + h_i^x = 1 \quad \forall i \in C$ (4.18)

$l_i^y + w_i^y + h_i^y = 1 \quad \forall i \in C$ (4.19)

$l_i^z + w_i^z + h_i^z = 1 \quad \forall i \in C$ (4.20)

4. Setiap sisi kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai *reefer* (*basic geometric*).

$l_i^x + l_i^y + l_i^z + w_i^x + w_i^y + w_i^z + h_i^x + h_i^y + h_i^z = 3 \quad \forall i \in C$ (4.21)

5. Total berat kargo yang dimuat tidak melebihi kapasitas maksimal *reefer* (*weight limit*).

$\sum_i^n b_i p_{ij} \leq B_j \quad \forall i \in C, j \in D$

(4.22)

6. Kargo yang lebih berat tidak boleh ditumpuk di atas kargo yang lebih ringan (*stacking*).

$b_i \leq b_k z_{ik}^- \quad \forall i \in C$ (4.23)

7. Bagian alas kargo harus ditunjang secara keseluruhan atau sebagian oleh lantai *reefer* atau bagian atas kargo di bawahnya (*vertical stability*).

$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) + (1 - z_{ik}^+)M \geq x_k \quad \forall i, k \in C, i \neq k$ (4.24)

$$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) - x_k + (1 - z_{ik}^+)M \geq (l_k l_k^x + w_k(1 - l_k^x))S^+ \quad \forall i, k \in C, i \neq k \quad (4.25)$$

$$y_i + l_i l_i^y + w_i(1 - l_i^y) + (1 - z_{ik}^+)M \geq y_k \quad \forall i, k \in C, i \neq k \quad (4.26)$$

$$y_i + l_i l_i^y + w_i(1 - l_i^y) - y_k + (1 - z_{ik}^+)M \geq (l_k l_k^y + w_k(1 - l_k^y))S^+ \quad \forall i, k \in C, i \neq k \quad (4.27)$$

8. Penempatan kargo pada *reefer* harus mengikuti kaidah LIFO di mana kargo terakhir yang dimuat pada *reefer* akan menjadi yang pertama diturunkan. Pembatas ini memastikan bahwa penempatan kargo sesuai dengan urutan pengiriman sehingga tidak ada aktivitas perombakan kargo di setiap lokasi pengiriman (*multi-drop*).

$$x_i + (1 - y_{ik}^+)M \geq x_k \quad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \quad (4.28)$$

$$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) + (1 - y_{ik}^+)M \geq x_k + l_k l_k^x + w_k(1 - l_k^x) \quad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \quad (4.29)$$

$$z_i + (1 - z_{ik}^+)M \geq z_k \quad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \quad (4.30)$$

$$z_i + h_i + (1 - z_{ik}^+)M \geq z_k + h_k \quad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \quad (4.31)$$

9. Tingkat kualitas produk tidak boleh di kurang dari syarat kualitas yang ditentukan (*internal temperature distribution*).

$$1 - \frac{t_i + N_i\left(U_i - U_i e^{-t_i k_0 e^{-\left(\frac{E}{R} \times \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{TR_i}\right)\right)}}\right)}{U_i} \geq Q_i \quad \forall i \in C \quad (4.32)$$

10. Semua koordinat kargo harus sama atau lebih dari nol

$$x_i, y_i, z_i \geq 0 \quad \forall i \in C \quad (4.33)$$

4.2.3 Model Matematis *Multi Multi-Drop Refrigerated-Container Loading Problem*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai model matematis untuk *multi multi-drop refrigerated-container loading problem* (Multi MR-CLP) atau jenis *input (value) minimization.*

4.2.3.1 Fungsi Objektif

Fungsi objektif untuk Multi MR-CLP adalah untuk meminimasi total biaya yang terdiri dari *quality loss cost, unnecessary moving cost, refrigeration cost, shipping cost,* dan *vehicle cost.* Pada jenis model ini, *penalty cost* tidak termasuk ke dalam komponen total biaya karena *reefer* yang tersedia tidak terbatas sehingga seluruh kargo dapat dimuat di dalam *reefer.* Total biaya dipengaruhi oleh jumlah kargo yang dimuat, penempatan kargo di dalam *reefer*, dan lokasi pengiriman.

$$Min.\left[\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{N}\frac{t_i+N_i\left(U_i-U_ie^{-t_ik_0e^{-\left(\frac{E}{R}\times\left(\frac{1}{T_i}-\frac{1}{TR_i}\right)\right)}}\right)}{U_i}\times v_i\times p_{ij}\right]+\left[\left(\frac{\lambda}{s}\times A\times(T_{ext}-T_{int})\times N\right)+\left(\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{t_{totj}}\times\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{N}b_ip_{ij}\times c_p\times(T_{ext}-T_{int})\right)\times\sum_{j=1}^{N}t_{totj}\times EC\right]+\left[\left(\sum_{j=1}^{N}d_{totj}\times(FC+OC+TC)\right)+\left(\sum_{j=1}^{N}t_{totj}\times WC\right)\right]+\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}P^{+}(o_k-o_i)\times UC\right]+[N\times VC]\right] \quad (4.34)$$

4.2.3.2 Pembatas

Berikut ini adalah pembatas-pembatas yang digunakan pada model Multi MR-CLP.

1. Masing-masing kargo harus dimuat pada satu *reefer.*

$$p_{ij}\leq u_j \qquad \forall i\in C, j\in D \qquad (4.35)$$

$$\sum_{j}^{N}p_{ij}=1 \qquad \forall i\in C \qquad (4.36)$$

2. Kargo tidak dapat melebihi dimensi *reefer* atau harus ditempatkan di dalam *reefer* (*basic geometric*).

$$x_i+l_i\times l_i^x+w_i\times w_i^x+h_i\times h_i^x\leq L_j+(1-p_{ij})\times M \qquad \forall i\in C, j\in D \quad (4.37)$$

$$y_i + l_i \times l_i^y + w_i \times w_i^y + h_i \times h_i^y \leq W_j + (1 - p_{ij}) \times M \quad \forall i \in C, j \in D \quad (4.38)$$

$$z_i + l_i \times l_i^z + w_i \times w_i^z + h_i \times h_i^z \leq H_j + (1 - p_{ij}) \times M \quad \forall i \in C, j \in D \quad (4.39)$$

3. Kargo tidak dapat ditempatkan pada area yang sama atau tidak saling tumpang tindih (*basic geometric*).

$$x_i + l_i \times l_i^x + w_i \times w_i^x + h_i \times h_i^x \leq x_k + (1 - x_{ik}^+) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.40)$$

$$x_k + l_k \times l_k^x + w_k \times w_k^x + h_k \times h_k^x \leq x_i + (1 - x_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.41)$$

$$y_i + l_i \times l_i^y + w_i \times w_i^y + h_i \times h_i^y \leq y_k + (1 - y_{ik}^+) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.42)$$

$$y_k + l_k \times l_k^y + w_k \times w_k^y + h_k \times h_k^y \leq y_i + (1 - y_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.43)$$

$$z_i + l_i \times l_i^z + w_i \times w_i^z + h_i \times h_i^z \leq z_k + (1 - z_{ik}^+) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.44)$$

$$z_k + l_k \times l_k^z + w_k \times w_k^z + h_k \times h_k^z \leq z_i + (1 - z_{ik}^-) \times M \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.45)$$

$$x_{ik}^+ + x_{ik}^- + y_{ik}^+ + y_{ik}^- + z_{ik}^+ + z_{ik}^- \geq p_{ij} + p_{kj} - 1 \quad \forall i, k \in C, i < k \quad (4.46)$$

4. Kargo dapat dirotasi terhadap sumbu X, Y, dan Z (orientasi kargo).

$$l_i^x + l_i^y + l_i^z = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.47)$$

$$w_i^x + w_i^y + w_i^z = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.48)$$

$$h_i^x + h_i^y + h_i^z = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.49)$$

$$l_i^x + w_i^x + h_i^x = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.50)$$

$$l_i^y + w_i^y + h_i^y = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.51)$$

$$l_i^z + w_i^z + h_i^z = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.52)$$

5. Setiap sisi kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai *reefer* (*basic geometric*).

$$l_i^x + l_i^y + l_i^z + w_i^x + w_i^y + w_i^z + h_i^x + h_i^y + h_i^z = 3 \quad \forall i \in C \quad (4.53)$$

6. Total berat kargo yang dimuat tidak melebihi kapasitas maksimal *reefer* (*weight limit*).

$$\sum_i^n b_i p_{ij} \leq B_j u_j \quad \forall i \in C, j \in D \quad (4.54)$$

7. Kargo yang lebih berat tidak boleh ditumpuk di atas kargo yang lebih ringan (*stacking*).

$$b_i \leq b_k z_{ik}^{-} \qquad \forall i \in C \quad (4.55)$$

8. Bagian alas kargo harus ditunjang secara keseluruhan atau sebagian oleh lantai *reefer* atau bagian atas kargo di bawahnya (*vertical stability*).

$$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) + (1 - z_{ik}^{+})M \geq x_k \qquad \forall i, k \in C, i \neq k \ (4.56)$$

$$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) - x_k + (1 - z_{ik}^{+})M \geq (l_k l_k^x + w_k(1 - l_k^x))S^{+} \qquad \forall i, k \in C, i \neq k \ (4.57)$$

$$y_i + l_i l_i^y + w_i(1 - l_i^y) + (1 - z_{ik}^{+})M \geq y_k \qquad \forall i, k \in C, i \neq k \ (4.58)$$

$$y_i + l_i l_i^y + w_i(1 - l_i^y) - y_k + (1 - z_{ik}^{+})M \geq (l_k l_k^y + w_k(1 - l_k^y))S^{+} \qquad \forall i, k \in C, i \neq k \ (4.59)$$

9. Penempatan kargo pada *reefer* harus mengikuti kaidah LIFO di mana kargo terakhir yang dimuat pada *reefer* akan menjadi yang pertama diturunkan. Pembatas ini memastikan bahwa penempatan kargo sesuai dengan urutan pengiriman sehingga tidak ada aktivitas perombakan kargo di setiap lokasi pengiriman (*multi-drop*).

$$x_i + (1 - y_{ik}^{+})M \geq x_k \qquad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \ (4.60)$$

$$x_i + l_i l_i^x + w_i(1 - l_i^x) + (1 - y_{ik}^{+})M \geq x_k + l_k l_k^x + w_k(1 - l_k^x) \qquad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \ (4.61)$$

$$z_i + (1 - z_{ik}^{+})M \geq z_k \qquad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \ (4.62)$$

$$z_i + h_i + (1 - z_{ik}^{+})M \geq z_k + h_k \qquad \forall i, k \in C, i \neq k, o_i < o_k \ (4.63)$$

10. Tingkat kualitas produk tidak boleh di kurang dari syarat kualitas yang ditentukan (*internal temperarure distribution*).

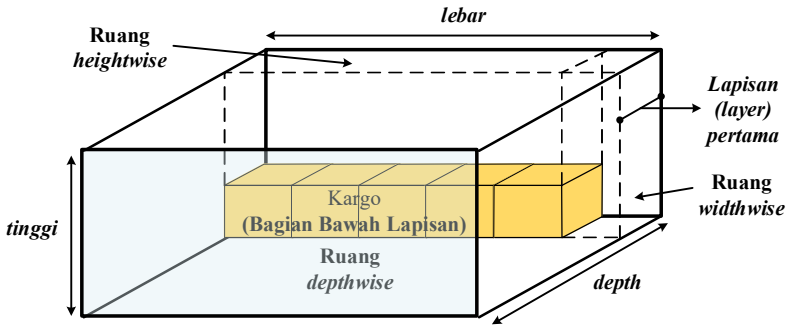
$$1 - \frac{t_i + N_i\left(U_i - U_i e^{-t_i k_0 e^{-\left(\frac{E}{R} \times \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{TR_i}\right)\right)}}\right)}{U_i} \geq Q_i \qquad \forall i \in C \quad (4.64)$$

11. Semua koordinat kargo harus sama atau lebih dari nol.

$$x_i, y_i, z_i \geq 0 \qquad \forall i \in C \quad (4.65)$$

4.3 Algoritma Heuristik

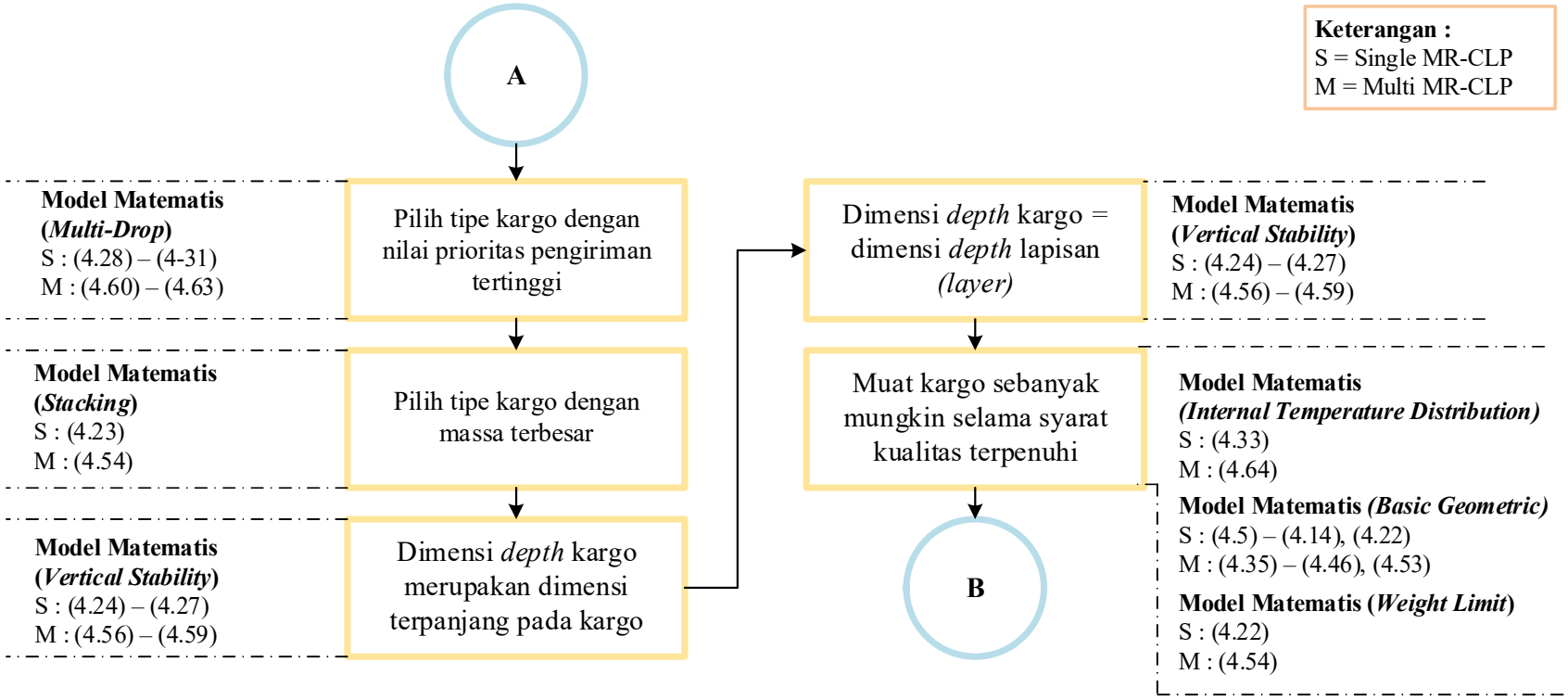
Algoritma heuristik untuk model MR-CLP ini diadaptasi dari algoritma heuristik konstruktif untuk *container loading problem* oleh (George & Robinson, 1980) dan dibangun berdasarkan pada bagaimana menjalankan model matematis. Algoritma ini menggunakan pendekatan *wall-building* atau mengisi *reefer* lapisan (*layer*) demi lapisan dari bagian belakang *reefer* hingga ke bagian pintu *reefer.* Lapisan-lapisan tersebut akan membentuk seperti dinding (*wall*). Sebuah lapisan baru tidak akan dibangun sampai lapisan sebelumnya selesai dibangun. Algoritma ini terdiri dari empat bagian, yaitu proses pemilihan dan penyusunan tipe kargo untuk bagian bawah lapisan, proses pemilihan dan penyusunan tipe kargo untuk ruang kosong, proses pembuatan ruang kosong, dan proses pemilihan ruang kosong.



Gambar 4. 4 Ruang Kosong di Dalam *Reefer*

Kedalaman (*depth*) setiap lapisan sama dengan dimensi *depth* kargo pertama yang dimuat dalam lapisan tersebut. Kargo pertama yang dimuat ditentukan berdasarkan tipe kargo yang memiliki nilai prioritas pengiriman paling tinggi (paling terakhir dikirim). Dengan begitu, pembatas *multi-drop* dapat dipenuhi karena kargo yang terakhir dikirim akan ditaruh lebih dulu atau *last-in first-out* (LIFO). Selanjutnya, jika terdapat beberapa tipe kargo dengan nilai prioritas pengiriman yang sama, maka penentuan tipe kargo ditentukan berdasarkan tipe kargo yang memiliki berat terbesar. Ketentuan ini untuk mengakomodasi pembatas *stacking* di mana kargo yang lebih berat tidak bisa ditempatkan di atas kargo yang lebih ringan. Setelah ditemukan tipe kargo yang memenuhi dua ketentuan tersebut, dimensi terpanjang kargo akan dijadikan sebagai dimensi *depth*

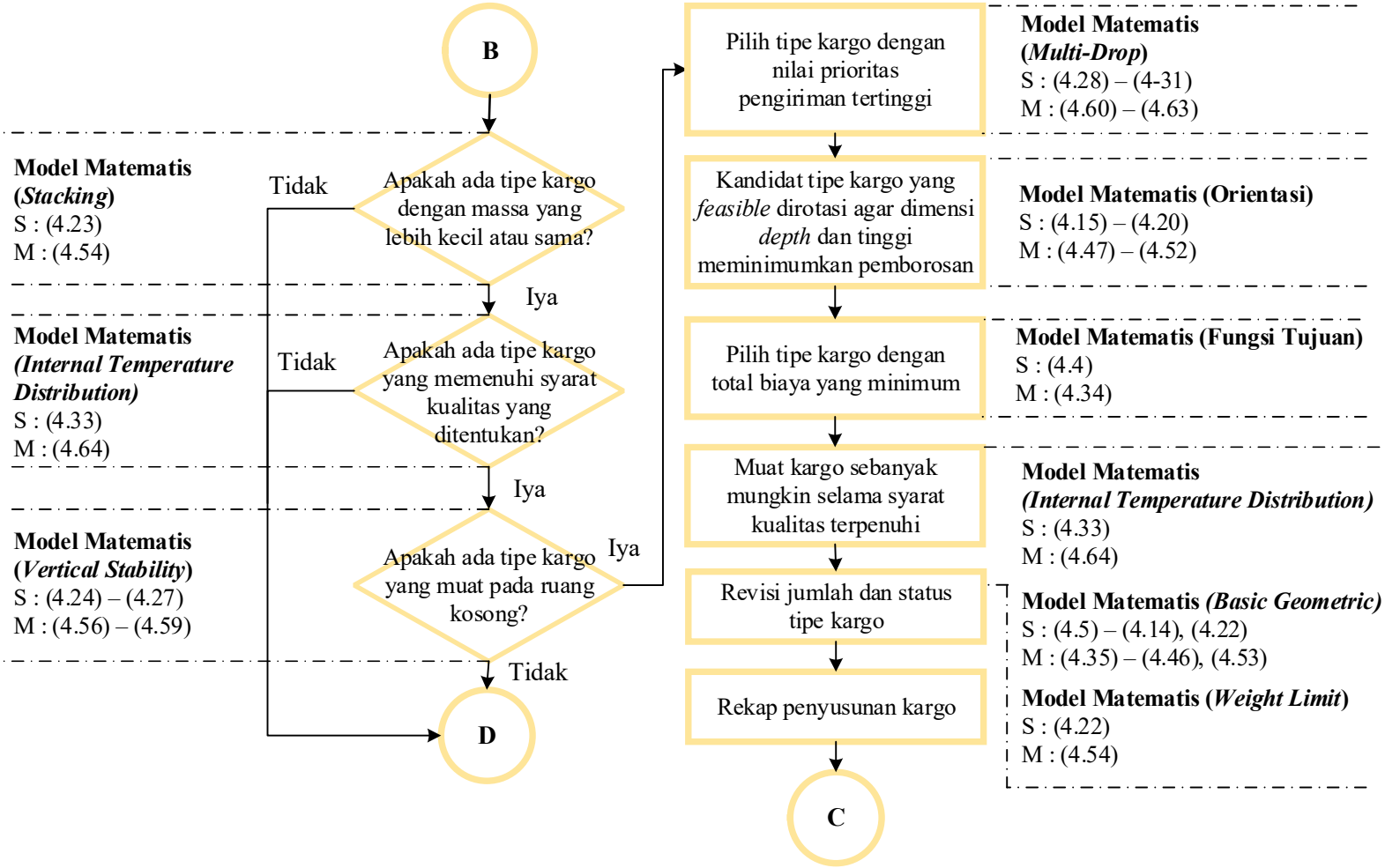
kargo yang juga dijadikan sebagai *depth* lapisan. Hal tersebut dilakukan guna memudahkan proses penyusunan kargo selanjutnya dan memastikan pembatas *vertical stability* terpenuhi di mana posisi kargo harus ditunjang secara keseluruhan atau sebagian oleh kargo yang berada di bawahnya. Model MR-CLP ini mempertimbangkan pembatas *internal temperature distribution*, sehingga setiap kargo dimuat di dalam *reefer*, suhu yang diterima kargo perlu dihitung untuk mengetahui tingkat kualitas tipe kargo, apakah memenuhi syarat kualitas yang sudah ditentukan atau tidak. Jika tingkat kualitas kargo di bawah syarat kualitas yang sudah ditentukan, maka proses pemuatan harus dihentikan walaupun masih terdapat ruang kosong. Hal tersebut dilakukan guna mencegah adanya produk yang tidak diterima oleh pelanggan. *Flowchart* pada Gambar 4. 5 menggambarkan proses pemilihan dan penyusunan tipe kargo untuk bagian bawah lapisan.



Gambar 4. 5 Proses Pemilihan dan Penyusunan Tipe Kargo (Bagian Bawah Lapisan)

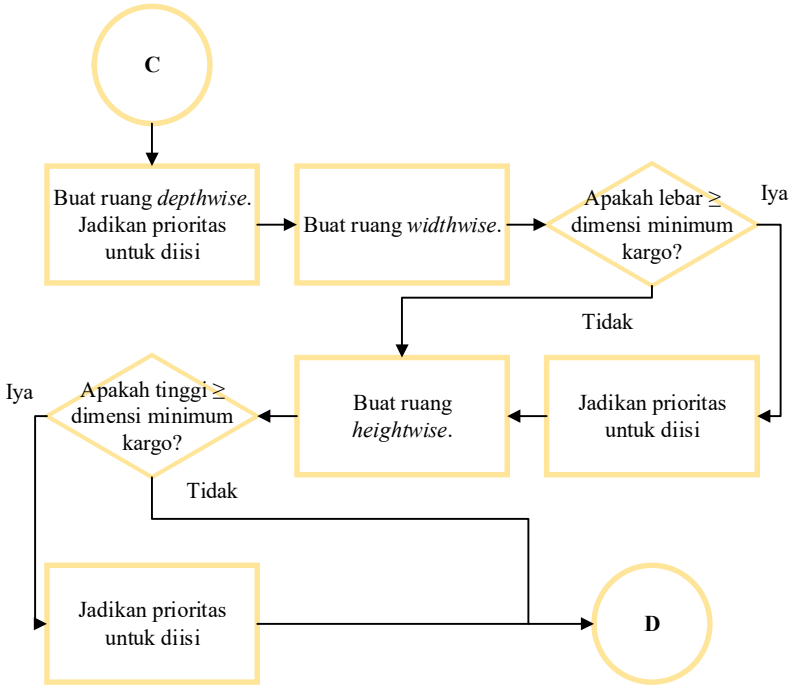
Setelah bagian bawah lapisan sudah terisi, maka dilakukan kembali proses pemilihan tipe kargo untuk mengisi ruang kosong pada *reefer.* Ketentuan pertama adalah berat kargo. Tipe kargo harus memiliki berat yang sama atau lebih ringan daripada tipe kargo yang berada di bagian bawah lapisan. Hal tersebut dilakukan guna memastikan terpenuhinya pembatas *stacking.* Selain itu, tipe kargo juga harus muat dengan ruang kosong di atas bagian bawah lapisan dan ditunjang 100% oleh tipe kargo di bagian bawah lapisan. Hal tersebut menjamin pembatas *vertical stability.* Tingkat kualitas tipe kargo juga harus dipertimbangkan guna menjamin terpenuhinya syarat kualitas yang sudah ditentukan. Selanjutnya, tipe kargo yang memiliki nilai prioritas tertinggi akan dipilih menjadi kandidat tipe kargo yang *feasible* untuk dimuat terlebih dahulu. Hal tersebut untuk memastikan pemuatan kargo berdasarkan prinsip LIFO atau memenuhi pembatas *multi-drop* dan meminimasi *unnecessary moving* atau proses *loading* dan *unloading* di tiap titik pengiriman.

Kandidat tipe kargo yang *feasible* akan dirotasi sehingga selisih antara dimensi *depth* kargo dengan *depth* lapisan adalah minimum. Selain itu, dimensi tinggi kargo harus memberikan pemborosan ketinggian (jarak antara kargo dengan atap *reefer*) yang minimum. Kedua hal tersebut perlu dilakukan guna utilitas *reefer* bisa maksimum. Selanjutnya, tipe kargo yang akan mengisi ruang kosong harus memiliki biaya yang paling minimum. Komponen biaya yang berpengaruh terhadap penyusunan kargo adalah *penalty cost*, dan *quality loss cost*, *unnecessary moving cost* dan *refrigeration cost. Penalty cost* dipengaruhi oleh jumlah kargo yang dapat dimuat di dalam *reefer*, semakin banyak kargo yang dapat dimuat maka semakin kecil nilai *penalty cost.* Oleh karena itu, tipe kargo yang terpilih pada setiap proses penyusunan kargo harus memberikan pemborosan ruang yang paling minimum. *Quality loss cost* yang minimum didapatkan jika kargo ditempatkan pada area yang sesuai dengan suhu optimal kargo, sehingga penurunan kualitas produk dapat diminimumkan. *Unnecessary moving cost* yang minimum didapatkan jika kargo yang dimuat tidak melanggar urutan pengiriman, sehingga proses *loading* dan *unloading* kargo di setiap lokasi pengiriman dapat diminimumkan. Sedangkan, *refrigeration cost* bergantung pada jumlah kargo dan berat kargo yang dimuat.



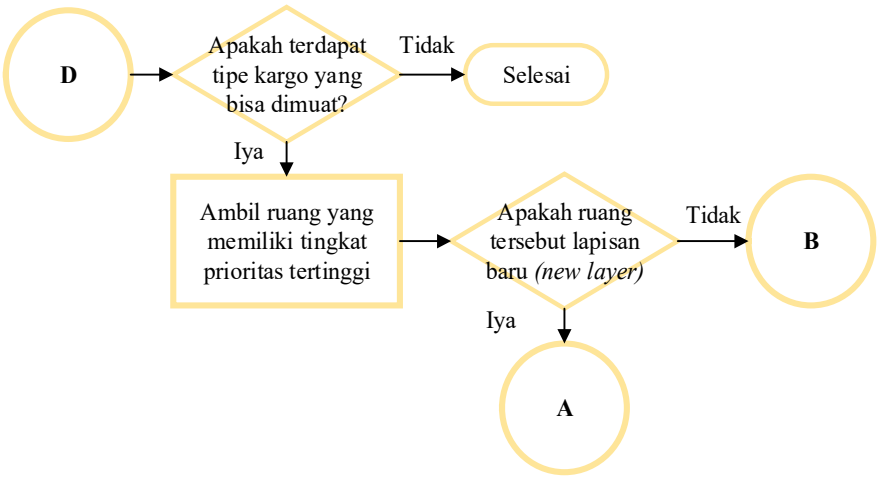
Gambar 4. 6 Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo (Ruang Kosong)

Setelah proses penyusunan kargo dilakukan, ruang kosong yang terbentuk perlu diidentifikasi. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.4, terdapat tiga ruang kosong yang mungkin terbentuk, yaitu ruang *heightwise*, *depthwise*, dan *widthwise.* Dalam proses pembuatan ruang-ruang tersebut yang dijelaskan pada Gambar 4.7, ruang *widthwise* atau *heightwise* tidak akan terbentuk jika lebar atau tingginya lebih pendek daripada dimensi terkecil kargo yang belum dimuat.



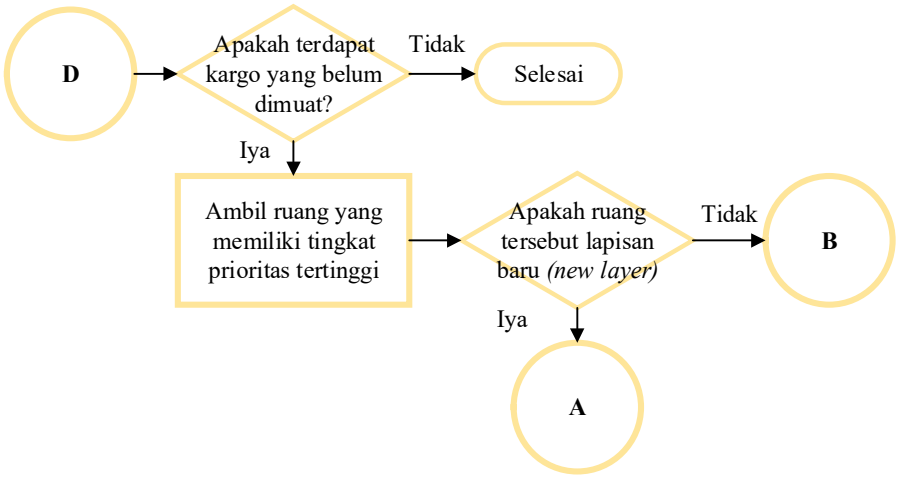
Gambar 4. 7 Proses Pembentukan Ruang Kosong

Proses yang terakhir adalah proses pemilihan ruang kosong. Pada proses ini akan ditentukan apakah proses penyusunan kargo akan dilanjutkan atau selesai. Jika dilanjutkan, terdapat dua pilihan, yaitu mengisi kargo pada ruang kosong atau lapisan baru. Ruang kosong yang paling diutamakan untuk diisi terlebih dahulu adalah ruang *heightwise*, *widthwise*, lalu *depthwise.* Selesainya proses penyusunan kargo ke dalam *reefer* tergantung dari tipe model MR-CLP. Untuk Single MR-CLP, proses penyusunan kargo akan selesai jika tidak ada tipe kargo yang dapat dimuat, meskipun memungkinkan adanya kargo yang belum dimuat. Sedangkan, untuk Multi MR-CLP, proses penyusunan kargo akan selesai jika tidak ada tipe kargo yang tersisa. Berikut adalah proses pemilihan ruang kosong untuk Single MR-CLP.



Gambar 4. 8 Proses Pemilihan Ruang Kosong pada Single MR-CLP

Berikut adalah proses pemilihan ruang kosong untuk Multi MR-CLP.



Gambar 4. 9 Proses Pemilihan Ruang Kosong pada Multi MR-CLP

4.4 Validasi Model

Pada subbab ini akan dilakukan uji validasi terhadap model MR-CLP. Uji validasi ini dilakukan untuk menguji keakuratan penghitungan secara matematis dan konsistensi algoritma model.

4.4.1 Data Validasi Model

Untuk validasi model, terdapat beberapa data atau parameter yang digunakan. Data yang digunakan adalah data sekunder yang diambil dari penelitian-

penelitian sebelumnya dan internet (*online*). Data yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan pengiriman *outbound* produk buah-buahan dan sayuran dengan menggunakan *refrigerated container* (*reefer*) dari gudang penyimpanan ke lokasi pengiriman (pelanggan). Buah-buahan dan sayuran tersebut memiliki kisaran suhu optimal dari -1°C (272.15 K) hingga 7°C (210.15 K) atau termasuk ke dalam kategori *chilling-low temperature.* Buah-buahan dan sayuran akan dikemas ke dalam kargo yang berbentuk balok dengan lubang-lubang kecil agar sirkulasi udara di dalam kargo lancar dan seluruh buah-buahan dan sayuran menerima suhu yang sama dingin. Selain itu, dimensi kargo yang digunakan pada penelitian ini berdasar kepada dimensi kargo yang digunakan oleh salah satu *e-commerce* yang bergerak di bidang *agriculture.* Titik lokasi pengiriman diambil dari titik tengah yang berupa *latitude* dan *longtitude* beberapa kota atau kabupaten di kawasan Jabodetabek (Jakarta-Bogor-Depok-Tangerang-Bekasi).

Gambar 4. 10 Ilustrasi Bentuk Kargo Buah-Buahan dan Sayuran (www.bestforworld.com)

Diharapkan model ini dapat menyelesaikan *container loading problem* dengan berbagai jenis buah-buahan dan sayuran, dimensi kargo dan *reefer*, lokasi pengiriman serta suhu penyimpanan. Namun, pada penelitian kali ini, data-data yang digunakan hanya berdasarkan proses pengiriman *outbound.* Berikut ini adalah parameter tetap yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4. 3 Parameter Tetap Model

Jenis	Simbol	Parameter	Nilai	*Unit*
Biaya	EC	Biaya listrik	972	Rp per kWh
	FC	Biaya bahan bakar	940	Rp per km
	OC	Biaya oli	315	Rp per km
	TC	Biaya ban	180	Rp per km
	WC	Biaya upah supir	15,000	Rp per jam
	UC	Biaya *unnecessary moving*	10,000	Rp per unit *sequence*
	VC	Biaya *reefer*	3,500,000	Rp per unit
Reefer	L_j	Panjang (*Depth*)	5.45	m
	W_j	Lebar	2.28	m
	H_j	Tinggi	2.39	m
	B_j	Kapasitas	29,140	kg
	V_j	Kecepatan	40	km/jam
Kualitas	k_0	Nilai konstanta untuk penurunan kualitas	0.01	
	e	Bilangan eulier	2.718	
	E	Energi aktifasi untuk penurunan kualitas	83	J/mol K
	R	Konstanta gas ideal	8.31	J/mol K
Energi	λ	Konduktivitas termal	0.25	W/m K
	s	Ketebalan material dinding reefer	0.2	m
	A	Luas permukaan reefer	70.96	m2
	cp	Kapasitas panas spesifik produk	3.85	J/kg K
Suhu	T_{ext}	Suhu eksternal reefer	305.15	K

Selain itu, terdapat parameter yang dapat diubah-ubah sesuai dengan kondisi yang diinginkan seperti lokasi pengiriman, jenis buah-buahan dan sayuran, dimensi kargo, dan suhu penyimpanan. Distribusi suhu penyimpanan di dalam *reefer* disimulasikan menggunakan *software* ANSYS FLUENT. Pada simulasi ini, terdapat dua parameter yang digunakan yaitu suhu penyimpanan dan kecepatan udara. Terdapat tiga jenis pengaturan suhu penyimpanan, yaitu 269.15 (-4°C) K, 271.15 K (-2°C), dan 273.15 K (0°C), dan dua jenis pengaturan kecepatan udara, yaitu 2 m/s dan 4 m/s. Seperti yang dijelaskan pada Subbab 4.1, *reefer* akan dibagi menjadi 27 ruang berbentuk balok dengan volume yang sama besar di mana masing-masing area tersebut memiliki suhu yang berbeda pula akibat penyebaran suhu yang tidak merata. Setiap ruang direpresentasikan dengan titik koordinat x, y, z (*left, bottom, back*) dan x', y', z' (*right, top, front*). Berikut ini adalah

pendistribusian suhu penyimpanan dengan beberapa pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara.

Tabel 4. 4 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s

Koordinat ruang *reefer*						**Suhu (K)**
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	276.46
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	274.98
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	273.96
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	275.53
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	275.97
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	275.02
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	274.53
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	272.81
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	276.93
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	275.29
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	274.97
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	274.46
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	274.47
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	274.47
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	274.32
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	274.62
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	272.98
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	274.90
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	277.47
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	277.18
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	278.32
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	275.83
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	275.75
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	277.20
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	275.44
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	274.90
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	277.07

Tabel 4. 5 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s

Koordinat ruang *reefer*						**Suhu (K)**
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	274.26

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	273.25
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	272.49
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	273.63
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	274.00
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	273.23
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	272.94
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	271.75
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	274.65
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	273.47
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	273.24
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	272.83
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	272.89
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	272.87
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	272.73
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	273.01
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	272.71
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	275.08
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	275.68
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	276.29
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	275.13
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	274.36
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	275.21
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	274.58
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	273.81
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	274.90
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	274.55

Tabel 4. 6 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	277.99
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	276.61
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	275.65
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	277.12
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	277.53
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	276.64
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	276.18
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	274.57

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	278.43
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	276.89
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	276.60
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	276.12
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	276.12
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	276.12
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	275.99
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	276.27
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	274.74
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	276.53
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	278.48
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	278.21
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	279.28
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	276.95
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	276.77
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	278.23
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	276.58
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	276.07
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	278.11

Tabel 4. 7 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	275.93
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	274.98
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	274.27
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	275.34
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	275.69
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	274.97
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	274.69
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	273.58
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	276.29
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	275.19
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	274.98
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	274.59
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	274.65
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	274.63
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	274.50

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	274.76
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	273.64
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	274.86
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	277.15
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	276.93
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	277.86
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	275.86
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	275.73
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	276.94
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	275.53
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	275.13
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	276.80

Tabel 4. 8 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	279.52
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	278.23
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	277.34
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	278.70
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	279.09
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	278.26
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	277.83
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	276.34
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	279.93
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	278.50
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	278.22
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	277.77
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	277.78
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	277.78
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	277.66
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	277.91
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	276.49
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	278.16
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	279.49
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	279.24
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	280.24
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	278.07

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	277.79
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	279.26
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	277.72
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	277.25
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	279.15

Tabel 4. 9 Data Distribusi Suhu pada Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s

Koordinat ruang *reefer*						Suhu (K)
left	***bottom***	***back***	***right***	***top***	***front***	
x	**y**	**z**	**x'**	**y'**	**z'**	
0	0	0	0.76	0.68	1.82	277.60
0.76	0	0	1.52	0.68	1.82	276.72
1.52	0	0	2.28	0.68	1.82	276.06
0	0.68	0	0.76	1.36	1.82	277.05
0.76	0.68	0	1.52	1.36	1.82	277.38
1.52	0.68	0	2.28	1.36	1.82	276.70
0	1.36	0	0.76	2.04	1.82	276.45
0.76	1.36	0	1.52	2.04	1.82	275.41
1.52	1.36	0	2.28	2.04	1.82	277.94
0	0	1.82	0.76	0.68	3.63	276.91
0.76	0	1.82	1.52	0.68	3.63	276.71
1.52	0	1.82	2.28	0.68	3.63	276.35
0	0.68	1.82	0.76	1.36	3.63	276.41
0.76	0.68	1.82	1.52	1.36	3.63	276.39
1.52	0.68	1.82	2.28	1.36	3.63	276.27
0	1.36	1.82	0.76	2.04	3.63	276.51
0.76	1.36	1.82	1.52	2.04	3.63	274.58
1.52	1.36	1.82	2.28	2.04	3.63	274.64
0	0	3.63	0.76	0.68	5.45	278.62
0.76	0	3.63	1.52	0.68	5.45	277.58
1.52	0	3.63	2.28	0.68	5.45	280.59
0	0.68	3.63	0.76	1.36	5.45	277.36
0.76	0.68	3.63	1.52	1.36	5.45	276.25
1.52	0.68	3.63	2.28	1.36	5.45	279.30
0	1.36	3.63	0.76	2.04	5.45	277.25
0.76	1.36	3.63	1.52	2.04	5.45	275.35
1.52	1.36	3.63	2.28	2.04	5.45	279.04

4.4.2 Uji Validasi Model

Uji validasi ini akan membandingkan hasil yang ditampilkan pada Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel dengan hasil penghitungan secara manual. Pada Tabel 4.10 menunjukkan lokasi pengiriman yang digunakan pada uji validasi.

Tabel 4. 10 Data Lokasi Pelanggan untuk Uji Validasi

Urutan Pengiriman	**Lokasi**	**Koordinat**		**Waktu Tempuh (jam)**	**Jarak Tempuh (km)**
		Latitude	***Longtitude***		
0 (Gudang)	Jakarta Selatan (JKS)	-6.30	106.81		
1	Jakarta Pusat (JKP)	-6.19	106.83	0.31	12.43
2	Jakarta Utara (JKU)	-6.13	106.87	0.51	20.43

Pada Tabel 4.10 di atas menunjukkan terdapat dua lokasi pengiriman, yaitu Jakarta Pusat dan Jakarta Utara, di mana total jarak yang ditempuh adalah 20.43 km dengan waktu tempuh sebesar 0.51 jam atau 30 menit 6 detik. Berikut ini adalah data-data pesanan pelanggan yang digunakan pada uji validasi.

Tabel 4. 11 Data Pesanan Pelanggan untuk Uji Validasi

Order ID	**Nama Produk**	**Q**	**Tujuan Pengiriman**	**Suhu Optimal (K)**		**Umur Simpan (jam)**	**Syarat Kualitas**
				Min.	**Maks.**		
O1	Apel	35	JKU	272.15	277.15	720	90%
O2	Kiwi	3	JKP	273.15	275.15	1344	90%

Tabel 4. 12 Data Pesanan Pelanggan untuk Uji Validasi (Lanjutan)

Order ID	**Nama Produk**	**Dimensi kargo (m)**			**Volume kargo (m3)**	**Berat kargo (kg)**	**Nilai Jual per Kargo (Rp.)**
		Lebar	**Tinggi**	***Depth***			
O1	Apel	0.37	0.3	0.51	0.057	19	Rp 665,000
O2	Kiwi	0.29	0.17	0.59	0.029	0.29	Rp 590,000

Uji validasi ini hanya dilakukan untuk memuat kargo ke dua lokasi pelanggan dengan dua Pesanan. Order ID O1 dengan produk Apel akan dikirim ke Jakarta Utara (JKU) dan Order ID O2 yaitu Kiwi akan dikirim ke Jakarta Pusat

(JKP). Data distribusi yang digunakan pada uji validasi ini adalah suhu penyimpanan 271.15 K dengan kecepatan udara 4 m/s.

Validasi dimulai dari pemilihan tipe kargo untuk bagian bawah lapisan (*layer*). Berdasarkan data pada Tabel 4.10, lokasi JKU merupakan lokasi terakhir yang akan dikunjungi, sehingga tipe kargo yang akan dikirim pada lokasi tersebut harus dimuat telebih dahulu. Dikarenakan pada lokasi pengiriman tersebut tidak ada tipe kargo lainnya, maka kargo O1 akan dimuat pada bagian bawah lapisan. Selanjutnya, kargo tersebut akan dirotasi sehingga dimensi terbesar kargo tersebut akan dijadikan sebagai dimensi *depth* sedangkan dimensi terkecil akan dijadikan dimensi tinggi agar meminumkan pemborosan ketinggian. Pada kargo O1, dimensi terbesar yaitu dimensi 0.51 m dan dimensi terkecil adalah 0.3 m. sehingga kargo tersebut akan dirotasi menjadi orientasi A di mana bagian alas kargo adalah lebar – *depth.*

Kargo O1 akan memuat bagian bawah lapisan hingga sebanyak mungkin dengan memerhatikan tingkat kualitas kargo, di mana kargo akan dimuat di dalam *reefer* jika tingkat kualitas kargo di atas syarat kualitas, yaitu 90%. Sebagai contoh untuk penghitungan, kargo ketiga dengan koordinat (0.6, 0, 0) berada pada ruang *reefer* dengan koordinat (0, 0, 0) dan koordinat (0.76, 0, 0), sehingga kargo tersebut menerima dua suhu yang berbeda, yaitu 275.93 K dan 274.98 K. Pada kondisi demikian, rata-rata suhu yang diterima kargo dapat dihitung sebagai berikut.

$$wd_1 = (koordinat\ x\ ruang\ reefer\ 2 - koordinat\ x\ kargo) \times tinggi \times depth$$
$$wd_1 = (0.76 - 0.6) \times 0.3 \times 0.51 = 0.025\ m^2$$

$$wd_2 = (koordinat\ x\ kargo + lebar\ - koordinat\ x\ ruang\ reefer\ 2) \times tinggi \times depth$$
$$wd_2 = (0.6 + 0.37 - 0.76) \times 0.3 \times 0.51 = 0.032\ m^2$$

$$wd = volume\ kargo = \ 0.057\ m^2$$

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^{n} wd_i T_i}{\sum_{i=1}^{n} wd} = \left(\frac{0.025}{0.057} \times 275.93\right) + \left(\frac{0.032}{0.057} \times 274.98\right) = 275.39\ K$$

Berdasarkan penghitungan di atas, suhu rata-rata kargo ketiga sebesar 275.39 K. Setelah itu, akan dilakukan penghitungan tingkat kualitas kargo dengan menggunakan rumus berikut.

$$Quality\ loss\ (\%) = \frac{t_i + N_i\left(U_i - U_i e^{-t_i k_0 e^{-\left(\frac{E}{R}\times\left(\frac{1}{T_i}-\frac{1}{TR_i}\right)\right)}}\right)}{U_i}$$

$$Quality\ loss\ (\%) = \frac{0.51 + 0\left(720 - 720e^{-(720)(0.02)e^{-\left(\frac{83}{8.31}\times\left(\frac{1}{275.39}-\frac{1}{277.15}\right)\right)}}\right)}{720}$$

$$Quality\ loss\ (\%) = \frac{0.51}{720} = 0.07\%$$

Berdasarkan hasil penghitungan tingkat kualitas kargo didapatkan bahwa terjadi *quality loss* pada kargo sebesar 0.07%. Variabel N_i bernilai 0 karena suhu yang diterima produk atau kargo berada pada kisaran suhu optimal sehingga pengurangan kualitas kargo terjadi hanya karena faktor waktu pengiriman. Berikut adalah rekapitulasi data-data kargo yang dimuat pada bagian bawah lapisan (*layer*).

Tabel 4. 13 Data Uji Validasi Proses Penyusunan Kargo pada Bagian Bawah Lapisan

Cargo Count	Order ID	Koordinat Kargo			Suhu Optimal (K)	Suhu yang Diterima Kargo (K)	*Quality Loss* (%)	Tingkat Kualitas (%)	Sisa Umur Simpan (jam)
		Lebar	Tinggi	*Depth*					
1	O1	0	0	0	277.15	275.93	0.07%	99.93%	719.49
2	O1	0.3	0	0	277.15	275.93	0.07%	99.93%	719.49
3	O1	0.6	0	0	277.15	275.39	0.07%	99.93%	719.49
4	O1	0.9	0	0	277.15	274.98	0.07%	99.93%	719.49
5	O1	1.2	0	0	277.15	274.98	0.07%	99.93%	719.49
6	O1	1.5	0	0	277.15	274.27	0.07%	99.93%	719.49
7	O1	1.8	0	0	277.15	274.27	0.07%	99.93%	719.49

Berdasarkan Tabel 4.13 dapat disimpulkan bahwa seluruh kargo tidak menerima suhu di atas suhu optimal sehingga *quality loss* hanya diakibatkan oleh faktor waktu pengiriman. Setelah bagian bawah lapisan terisi, selanjutnya dilakukan proses pemilihan dan penyusunan kargo di atas bagian bawah lapisan.

Pemilihan kargo didasari oleh berat kargo, ketersedian ruang, urutan pengiriman, dan profit terbesar. Untuk mempermudah penghitungan, nilai profit didapatkan dari pengurangan total nilai jual kargo terhadap *quality loss cost, refrigeration cost,* dan *unnecessary moving cost.* Berikut ini adalah data yang digunakan untuk memvalidasi proses pemilihan dan penyusunan kargo pada ruang kosong.

Tabel 4. 14 Data Uji Validasi Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo pada Ruang Kosong

Order ID	Lokasi Pengiriman	Berat Kargo	Pencarian Rasio Depth			Rasio *Depth* Terbaik	Sisa Q	Profit
			Lebar	Tinggi	*Depth*			
O1	JKU	19	0.725	0.588	1.000	1.000	28	Rp18,620,000
O2	JKP	10	0.569	0.333	0.000	0.569	3	Rp 3,363,000

Berdasarkan data pada Tabel 4.14, kargo O1 merupakan tipe kargo yang paling tepat untuk mengisi ruang kosong tersebut karena beberapa hal. Pertama, kargo tersebut memiliki tujuan yang sama dengan kargo (O1) yang sudah mengisi di bagian bawah lapisan. Kedua, kargo tersebut memiliki rasio *depth* terbaik dengan nilai 1 di mana dimensi *depth* kargo sama dengan *depth* lapisan. Ketiga, kargo tersebut memiliki profit lebih besar daripada kargo O2. Apabila ditinjau dari segi berat kargo, kedua tipe kargo memenuhi kriteria di mana berat kedua kargo sama atau lebih ringan daripada berat kargo yang mengisi di bagian bawah lapisan. Selanjutnya, kargo O1 akan mengisi ruang kosong hingga terisi penuh selama persyaratan kualitas terpenuhi.

Berdasarkan koordinat kargo terakhir yang dimuat, terdapat dua ruang yang terbentuk, yaitu ruang *heightwise,* dan *widthwise.* Namun dari kedua ruang tersebut, ruang yang paling *feasible* untuk diisi adalah ruang *widthwise* karena kargo yang tersisa muat untuk mengisi ruang tersebut. Sedangkan, ruang *heightwise* tidak dapat dimuat oleh kargo manapun karena melebihi batas ketinggian *reefer.* Karena sudah tidak ada kargo O1 yang tersisa, maka kargo O2 akan dipilih untuk mengisi ruang *widthwise.* Dikarenakan kargo tersebut mengisi ruang *widthwise* dari lantai sehingga berat kargo tidak dipertimbangkan, selain itu kargo tersebut memiliki rasio *depth* terbaik dengan nilai 0.569 sehingga *feasible* untuk mengisi ruang

widthwise. Kargo tersebut akan dirotasi menjadi orientasi F karena dimensi lebar kargo menjadi dimensi *depth.*

Tabel 4. 15 Data Uji Validasi Proses Pemilihan dan Penyusunan Kargo pada Ruang *Widthwise*

Order ID	Lokasi Pengiriman	Berat Kargo	Pencarian Rasio Depth			Rasio *Depth* Terbaik	Sisa Q	Profit
			Lebar	Tinggi	*Depth*			
O1	JKU	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0	Rp -
O2	JKP	10	0.569	0.333	0.000	0.569	3	Rp3,363,000

Pada Tabel 4.16 akan ditampilkan hasil rekapitulasi data pemuatan kargo pada uji validasi.

Tabel 4. 16 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Uji Validasi

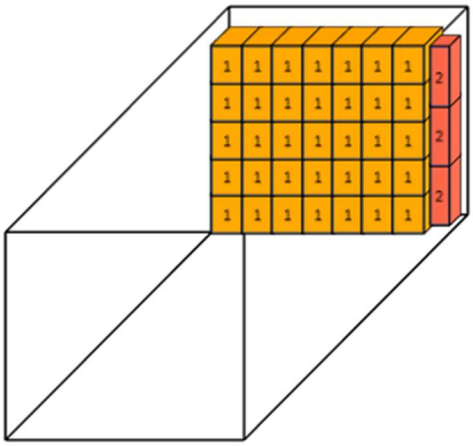
Cargo Count	Order ID	Tujuan Pengiriman	Koordinat Kargo			Orientasi	Tingkat Kualitas (%)	Sisa Umur Simpan (jam)
			Lebar	Tinggi	*Depth*			
1	O1	JKU	0	0	0	A	99.93%	719.49
2	O1	JKU	0.3	0	0	A	99.93%	719.49
3	O1	JKU	0.6	0	0	A	99.93%	719.49
4	O1	JKU	0.9	0	0	A	99.93%	719.49
...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	O1	JKU	1.5	1.48	0	A	99.93%	719.49
35	O1	JKU	1.8	1.48	0	A	99.93%	719.49
36	O2	JKP	2.1	0	0	F	99.98%	1,343.69
37	O2	JKP	2.1	0.59	0	F	99.98%	1,343.69
38	O2	JKP	2.1	1.18	0	F	99.98%	1,343.69

Pada Tabel 4.17 di bawah ini memperlihatkan total biaya yang dibutuhkan untuk mengirim kargo O1 dan O2 ke masing-masing lokasi pengiriman yaitu sebesar Rp 3,628,010.67. *Penalty cost* bernilai 0 karena seluruh kargo berhasil dimuat di dalam *reefer*. Sedangkan, *unnecessary moving cost* bernilai 0 karena seluruh kargo dimuat berdasarkan urutan pengiriman.

Tabel 4. 17 Rekapitulasi Biaya untuk Uji Validasi

Komponen Biaya	Jumlah	
Penalty Cost	Rp	-
Quality Loss Cost	Rp	17,008.07
Refrigeration Cost	Rp	88,558.60
Shipping Cost	Rp	22,444.00
Vehicle Cost	Rp	3,500,000.00
Unnecessary Moving Cost	Rp	-
Total Biaya	**Rp**	**3,628,010.67**

Berikut adalah visualisasi pemuatan kargo berdasarkan data-data pelanggan yang digunakan pada uji validasi.



Gambar 4. 11 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Uji Validasi

Berdasarkan hasil dan visualisasi pemuatan kargo pada uji validasi ini, dapat disimpulkan bahwa pemuatan kargo dilakukan berdasarkan algoritma model yang dibuat dan memenuhi seluruh pembatas yang dipertimbangkan, yaitu *stacking, weight limit, vertical stability, multi-drop,* dan *internal temperature distribution*, serta tiga pembatas *basic geometric*, yaitu seluruh kargo harus berada seluruhnya di dalam *reefer*, tidak ada tumpang tindih antar kargo, dan permukaan kargo harus sejajar dengan dinding dan lantai *reefer.* Selain itu, hasil penghitungan matematis juga terbukti sama dengan hasil penghitungan yang dilakukan secara manual.

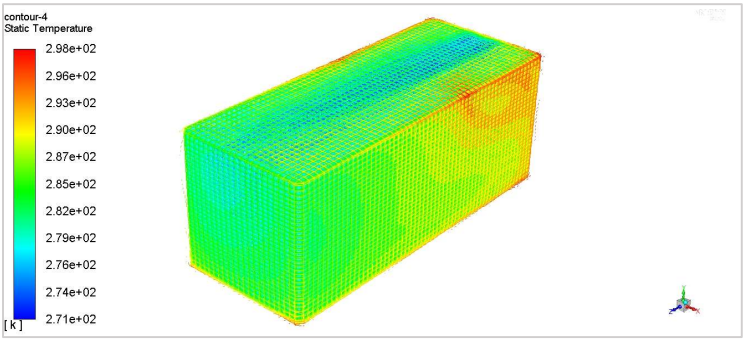
BAB 5
EKSPERIMEN NUMERIK DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dilakukan beberapa eksperimen numerik terhadap model MR-CLP dan menganalisis hasil eksperimen tersebut terhadap total biaya dan penyusunan kargo.

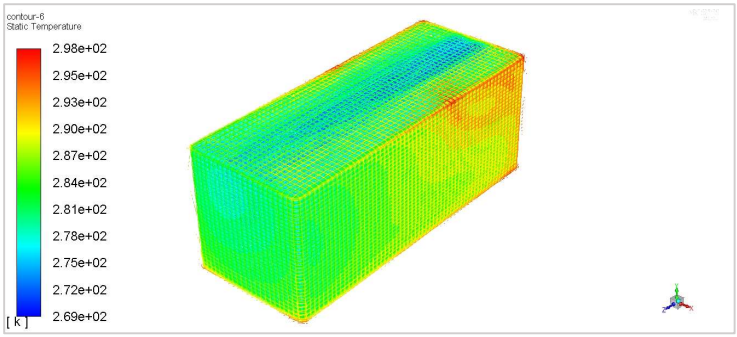
5.1 Eksperimen Numerik 1 : Pengaruh Suhu Penyimpanan dan Kecepatan Udara Terhadap Penyusunan Kargo

Eksperimen numerik ini dilakukan untuk membandingkan hasil model dengan hasil pada kondisi nyata atau hasil penelitian terdahulu. Namun, karena model ini baru atau tidak pernah dibahas pada penelitian sebelum-sebelumnya terutama pembatas *multi-drop* dengan *intenal temperature distribution* serta tidak pernah dipraktikan maka hasil model ini tidak bisa dibandingkan. Oleh karena itu, hasil eksperimen numerik ini belum bisa dianggap benar.

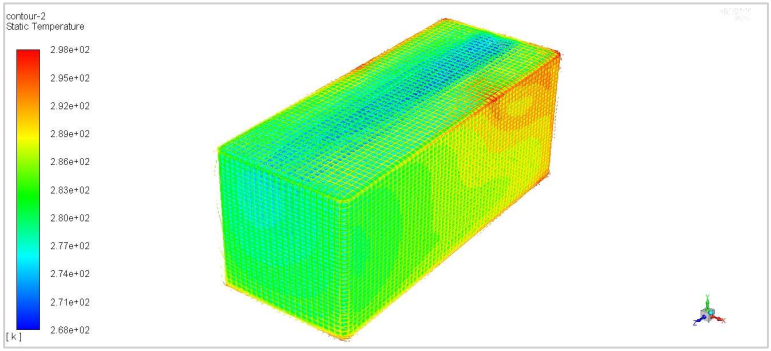
Untuk memastikan bahwa produk sampai ke pelanggan dengan tingkat kualitas yang memenuhi syarat kualitas, besar suhu yang diterima oleh produk merupakan hal yang paling menentukan tingkat kualitas produk. Terdapat dua faktor yang memengaruhi besar suhu yang diterima oleh produk saat proses pengiriman menggunakan *reefer*, yaitu suhu penyimpan dan kecepatan udara. Pada eksperimen numerik ini akan dilakukan pengujian untuk mengetahui dampak pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara terhadap penyusunan dan pemuatan kargo serta total biaya. Pada eksperimen ini, terdapat enam skenario yang akan dilakukan di mana terdapat tiga pengaturan suhu yang berbeda, yaitu 269.15 (-4°C) K, 271.15 K (-2°C), dan 273.15 K (0°C), dan dua pengaturan kecepatan udara, yaitu 2 m/s dan 4 m/s. Dengan menggunakan *software* ANSYS FLUENT, dapat diketahui pendistribusian suhu di dalam *reefer*. Berikut adalah hasil simulasi pendistribusian suhu untuk masing-masing skenario.



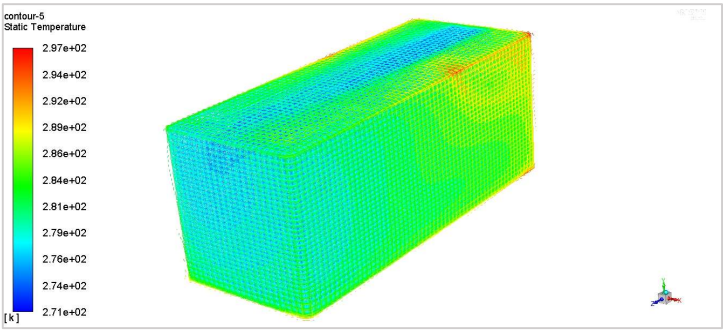
Gambar 5. 1 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s



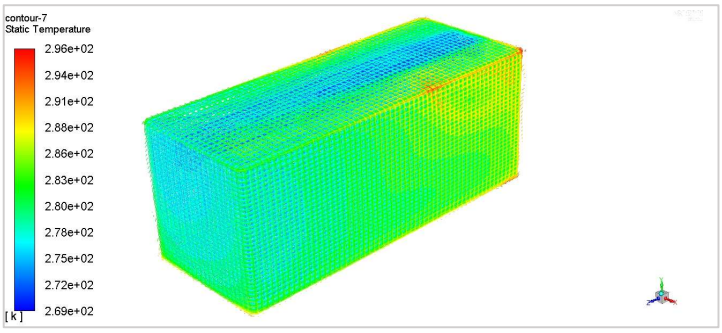
Gambar 5. 2 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s



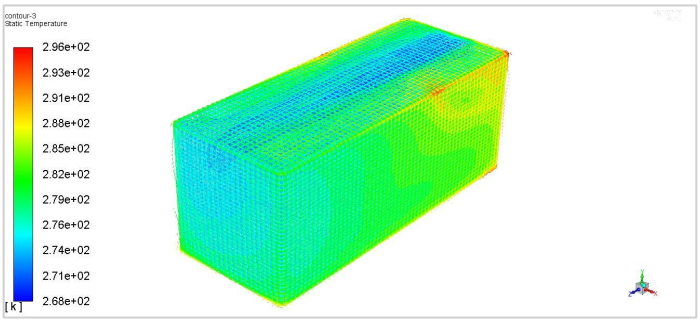
Gambar 5. 3 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 2 m/s



Gambar 5. 4 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 269.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s



Gambar 5. 5 Hasil Simulasi Udara di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 271.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s



Gambar 5. 6 Hasil Simulasi Pendistribusian Suhu di Dalam *Reefer* dengan Suhu Penyimpanan 273.15 K dan Kecepatan Udara 4 m/s

Pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.6 dapat dilihat bahwa pendistribusian suhu di dalam *reefer* tidak merata. Semakin jauh dari unit pendingin, suhu yang diterima kargo akan semakin panas atau tinggi. Oleh karena itu, kecepatan udara merupakan faktor yang paling penting karena semakin tinggi kecepatan udara yang diatur maka udara dingin akan terdistribusi hingga mendekati bagian pintu *reefer*.

Selain faktor pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara, terdapat faktor lain yang memengaruhi, yaitu perpindahan panas dari luar *reefer* dan perpindahan panas dari produk yang dimuat. Pada Tabel 5.1 menunjukkan lokasi pengiriman yang digunakan pada eksperimen ini.

Tabel 5. 1 Data Lokasi Pengiriman untuk Eksperimen Numerik 1

Urutan Pengiriman	**Lokasi**	**Koordinat**		**Waktu Tempuh (jam)**	**Jarak Tempuh (km)**
		Latitude	***Longtitude***		
0 (Gudang)	Jakarta Utara (JKU)	-6.13	106.87		
1	Jakarta Timur (JKT)	-6.23	106.88	0.28	11.17
2	Bekasi (BEK)	-6.24	106.99	0.58	23.38
3	Tangerang (TGS)	-6.29	106.72	1.34	53.74
4	Bogor (BOG)	-6.60	106.80	2.23	89.32

Pada Tabel 5.1 di atas menunjukkan terdapat empat lokasi pengiriman, yaitu Jakarta Timur, Bekasi, Tangerang, dan Bogor, di mana total jarak yang ditempuh adalah 89.32 km dengan waktu tempuh sebesar 2.23 jam. Berikut ini adalah data-data pesanan pelanggan yang digunakan pada eksperimen ini.

Tabel 5. 2 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 1

Order ID	**Nama Produk**	**Q**	**Tujuan Pengiriman**	**Suhu Optimal (K)**		**Umur Simpan (jam)**	**Syarat Kualitas**
				Min.	**Maks.**		
O1	Apel	150	BOG	272.15	277.15	720	99%
O2	Kiwi	150	BOG	273.15	275.15	1344	99%
O3	Jeruk	100	BOG	277.15	280.15	336	99%
O4	Ceri	100	TGS	273.15	275.15	240	99%
O5	Apel	100	BEK	272.15	277.15	720	99%
O6	Apel	200	JKT	272.15	277.15	720	99%
O7	Ceri	200	JKT	273.15	275.15	240	99%

Tabel 5. 3 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 1 (Lanjutan)

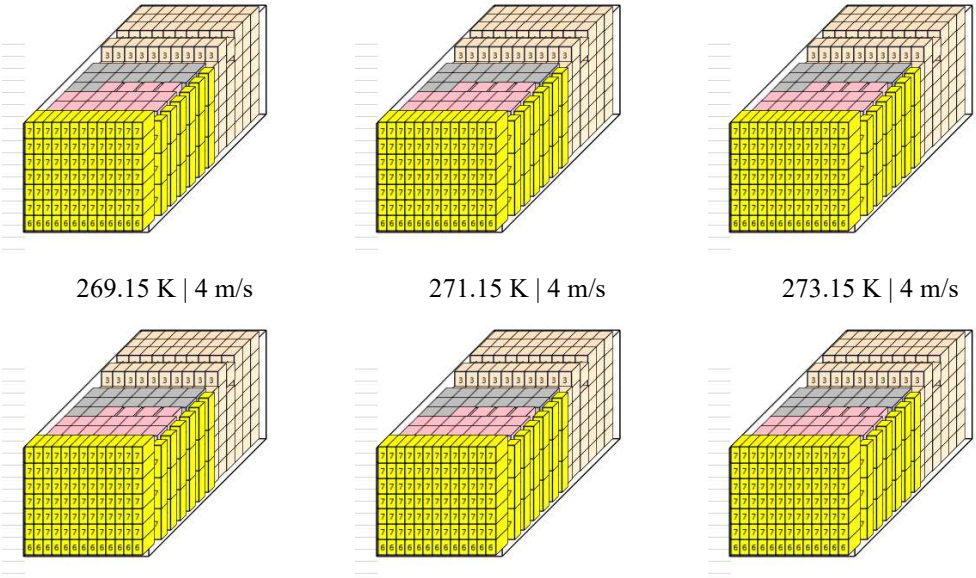
Order ID	Nama Produk	Dimensi kargo (m)			Volume kargo (m3)	Berat kargo (kg)	Nilai Jual per Kargo (Rp.)
		Lebar	Tinggi	*Depth*			
O1	Apel	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp 560,000
O2	Kiwi	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp 944,000
O3	Jeruk	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp 398,400
O4	Ceri	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp 4,845,000
O5	Apel	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp 665,000
O6	Apel	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp 350,000
O7	Ceri	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp 2,550,000

Eksperimen ini menggunakan jenis model Single MR-CLP dan berikut ini adalah hasil rekapitulasi pemuatan kargo pada kondisi suhu penyimpanan dan kecepatan udara yang berbeda-beda.

Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 1

Indicator	**Parameter Suhu Penyimpanan dan Kecepatan Udara**												**Satuan**
	269.15 K	**2 m/s**	**269.15 K**	**4 m/s**	**271.15 K**	**2 m/s**	**271.15 K**	**4 m/s**	**273.15 K**	**2 m/s**	**273.15 K**	**4 m/s**	
Performance Indicator													
Total Kargo	1,000		1,000		1,000		1,000		1,000		1,000		unit
Kargo yang Dimuat	712		712		712		712		712		712		unit
Kargo yang Tidak Dimuat	288		288		288		288		288		288		unit
Filling Rate	0.71		0.71		0.71		0.71		0.71		0.71		%
Komponen Biaya													
Penalty Cost	323,000,000.00		323,000,000.00		323,000,000.00		323,000,000.00		323,000,000.00		323,000,000.00		Rp
Quality Loss Cost	5,664,458.91		3,897,519.30		6,465,355.44		4,253,914.56		7,465,208.21		4,534,161.03		Rp
Refrigeration Cost	1,526,565.56		1,526,565.56		1,441,756.37		1,441,756.37		1,356,947.16		1,356,947.16		Rp
Shipping Cost	20,272.00		20,272.00		20,272.00		20,272.00		20,272.00		20,272.00		Rp
Vehicle Cost	3,500,000.00		3,500,000.00		3,500,000.00		3,500,000.00		3,500,000.00		3,500,000.00		Rp
Unnecessary Moving Cost	210,000.00		210,000.00		210,000.00		210,000.00		210,000.00		210,000.00		Rp
Total Biaya	**333,921,296.47**		**332,154,356.86**		**334,637,383.81**		**332,425,942.93**		**335,552,427.37**		**332,621,380.19**		**Rp**

Berikut ini adalah visualisasi hasil pemuatan kargo untuk beberapa skenario pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara.

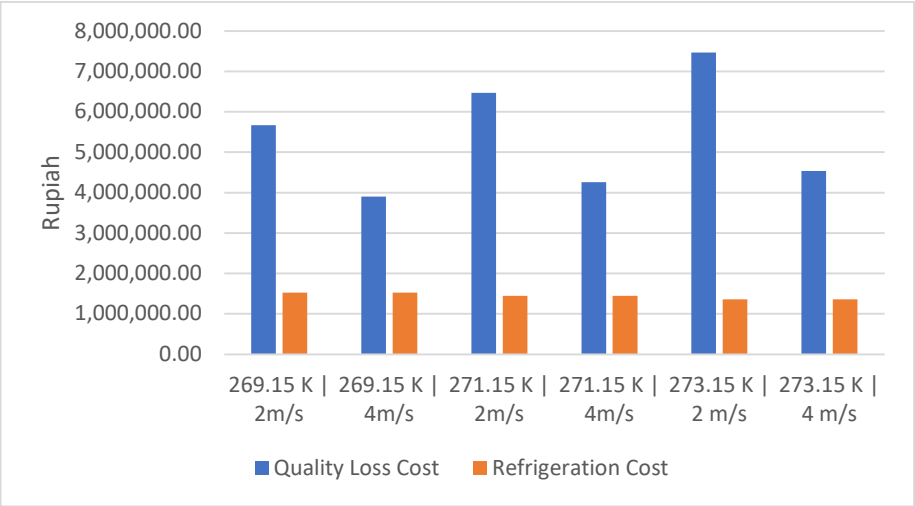


269.15 K | 4 m/s 271.15 K | 4 m/s 273.15 K | 4 m/s

269.15 K | 2 m/s 271.15 K | 2 m/s 273.15 K | 2 m/s

Gambar 5. 7 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 1

Berikut ini adalah hasil perbandingan *quality loss cost* dan *refrigeration cost* pada beberapa skenario pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara.



Gambar 5. 8 Perbandingan *Quality Loss Cost* dan *Refrigeration Cost* pada Eksperimen Numerik 1

Berdasarkan pada Tabel 5.4 dapat diketahui bahwa pengaturan suhu penyimpanan dan kecepatan udara tidak memengaruhi penyusunan kargo di mana pada seluruh skenario memiliki tingkat *filling rate* yang sama yaitu 71 %. Hal ini dapat terjadi karena algoritma model memprioritaskan pemuatan kargo berdasarkan urutan pengiriman, yaitu dimulai dari kargo dengan lokasi tejauh, sehingga pemuatan kargo untuk setiap skenario sama, seperti yang ditunjukan pada Gambar 5.7. Selain itu, waktu tempuh antar lokasi yang relatif singkat menyebabkan penurunan kualitas kargo tidak teralu besar, walaupun kargo-kargo tersebut ditempatkan pada area yang memiliki suhu lebih tinggi daripada suhu optimal. Apabila ditinjau dari setiap komponen biaya, *penalty cost* untuk seluruh skenario memiliki nominal yang sama karena nilai *filling rate* yang sama pula. Sedangkan, *unnecesary moving cost* untuk seluruh skenario memiliki nominal yang sama karena proses pemilihan kargo di setiap proses pemuatan berdasarkan urutan pengiriman.

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.8 dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu penyimpanan, maka semakin tinggi pula *quality loss cost.* Hal tersebut terjadi karena pengaturan suhu penyimpanan yang semakin tinggi dapat menyebabkan distribusi suhu di setiap area menjadi tinggi pula. Apabila di setiap area *reefer* memiliki suhu yang tinggi, maka kemungkinan besar setiap kargo menerima suhu di atas suhu optimalnya. Hal tersebut menyebabkan kargo mengalami penurunan kualitas yang lebih signifikan. Selain itu, semakin tinggi kecepatan udara di dalam *reefer*, maka semakin rendah *quality loss cost.* Hal tersebut dapat terjadi karena kecepatan udara yang tinggi menyebabkan udara dingin dapat mencapai area terjauh dari unit pendingin, sehingga banyak area yang memiliki kisaran suhu optimal kargo. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin rendah suhu penyimpanan dan semakin tinggi kecepatan udara dapat meminimumkan *quality loss cost.* Selain itu, semakin tinggi suhu penyimpanan, semakin rendah pula *refrigeration cost.* Terdapat tiga faktor yang memengaruhi *refrigeration cost*, yaitu waktu pengiriman, berat kargo yang dimuat, dan suhu penyimpanan. Berdasarkan hasil eksperimen ini, seluruh skenario memiliki berat kargo dan waktu pengiriman yang sama, sehingga suhu penyimpanan merupakan faktor yang paling memengaruhi *refrigeration cost.* Semakin kecil selisih antara suhu penyimpanan di

dalam *reefer* dengan suhu di luar *reefer* (eksternal) maka semakin kecil pula *refrigeration cost.*

5.2 Eksperimen Numerik 2 : Pengaruh Dimensi Kargo Terhadap Penyusunan Kargo

Eksperimen numerik ini akan dilakukan untuk menguji pengaruh dimensi kargo terhadap penyusunan kargo dan total biaya. Terdapat tiga skenario dimensi kargo yang akan dilakukan, yaitu *homogeneous*, *weakly heterogeneous*, dan *strongly heterogeneous.* Dikatakan *homogeneous* jika hanya ada satu tipe dimensi kargo. Dianggap *weakly heterogeneous* jika terdapat beberapa jenis dimensi kargo, di mana setiap jenisnya memiliki jumlah yang relatif banyak. Dikatakan *strongly heterogeneous*, jika kargo tidak ada atau hanya sangat sedikit yang memiliki dimensi yang identik. Eksperimen numerik ini menggunakan jenis model Single MR-CLP dan data distribusi suhu yang digunakan adalah suhu penyimpanan 271.15 K dan kecepatan udara 4 m/s. Berikut adalah data lokasi pelanggan yang digunakan pada eksperimen numerik ini.

Tabel 5. 5 Data Lokasi Pengiriman untuk Eksperimen Numerik 2

Urutan Pengiriman	**Lokasi**	**Koordinat**		**Waktu Tempuh (jam)**	**Jarak Tempuh (km)**
		Latitude	***Longtitude***		
0 (Gudang)	Jakarta Utara (JKU)	-6.13	106.87		
1	Jakarta Timur (JKT)	-6.23	106.88	0.28	11.17
2	Jakarta Selatan (JKS)	-6.30	106.81	0.55	22.15
3	Bekasi (BEK)	-6.24	106.99	1.08	43.13
4	Bogor (BOG)	-6.60	106.80	2.21	88.33

Tabel 5.5 di bawah ini menampilkan data jumlah kuantitas (Q) dan tipe kargo pada tiap skenario. Setiap pesanan akan dikemas ke dalam tipe kargo sesuai dengan skenario masing-masing, yaitu tipe C1 untuk skenario 1 (*homogeneous*), tipe C1, C3 untuk skenario 2 (*weakly heterogeneous*), dan tipe C1, C2, C3, C4 untuk skenario 3 (*strongly heterogeneous*).

Tabel 5. 6 Rancangan Skenario untuk Eksperimen Numerik 2

Order ID	Nama Produk	Tujuan Pengiriman	Quantity (unit)	Tipe Kargo		
				Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
O1	Apel	JKT	100	C1	C1	C2
O2	Kiwi	JKT	200	C1	C3	C2
O3	Ceri	JKS	200	C1	C1	C1
O4	Apel	BEK	100	C1	C3	C3
O5	Jeruk	BEK	100	C1	C3	C3
O6	Jeruk	BOG	100	C1	C1	C4

Berikut ini merupakan data pesanan pelanggan pada masing-masing skenario untuk ekperimen numerik 2.

Tabel 5. 7 Data Pesanan Pelanggan Skenario 1 untuk Eksperimen Numerik 2

Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O1	Apel	100	JKT	272.15	277.15	720	99%
O2	Kiwi	200	JKT	273.15	275.15	1344	99%
O3	Ceri	200	JKS	273.15	275.15	240	99%
O4	Apel	100	BEK	272.15	277.15	720	99%
O5	Jeruk	100	BEK	277.15	280.15	336	99%
O6	Jeruk	100	BOG	277.15	280.15	336	99%

Order ID	Tipe Kargo	Dimensi kargo (m)			Volume kargo (m3)	Berat kargo (kg)	Nilai Jual per Kargo (Rp.)
		Lebar	Tinggi	*Depth*			
O1	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp350,000.00
O2	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp590,000.00
O3	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp2,550,000.00
O4	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp350,000.00
O5	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp249,000.00
O6	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp249,000.00

Tabel 5. 8 Data Pesanan Pelanggan Skenario 2 untuk Eksperimen Numerik 2

Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O1	Apel	100	JKT	272.15	277.15	720	99%
O2	Kiwi	200	JKT	273.15	275.15	1344	99%
O3	Ceri	200	JKS	273.15	275.15	240	99%
O4	Apel	100	BEK	272.15	277.15	720	99%

Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O5	Jeruk	100	BEK	277.15	280.15	336	99%
O6	Jeruk	100	BOG	277.15	280.15	336	99%
Order ID	**Tipe Kargo**	**Dimensi kargo (m)**			**Volume kargo (m3)**	**Berat kargo (kg)**	**Nilai Jual per Kargo (Rp.)**
		Lebar	**Tinggi**	***Depth***			
O1	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp350,000.00
O2	C3	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp944,000.00
O3	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp2,550,000.00
O4	C3	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp560,000.00
O5	C3	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp398,400.00
O6	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp249,000.00

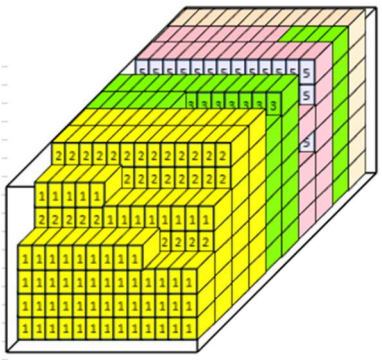
Tabel 5. 9 Data Pesanan Pelanggan Skenario 3 untuk Eksperimen Numerik 2

Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O1	Apel	100	JKT	272.15	277.15	720	99%
O2	Kiwi	200	JKT	273.15	275.15	1344	99%
O3	Ceri	200	JKS	273.15	275.15	240	99%
O4	Apel	100	BEK	272.15	277.15	720	99%
O5	Jeruk	100	BEK	277.15	280.15	336	99%
O6	Jeruk	100	BOG	277.15	280.15	336	99%
Order ID	**Tipe Kargo**	**Dimensi kargo (m)**			**Volume kargo (m3)**	**Berat kargo (kg)**	**Nilai Jual per Kargo (Rp.)**
		Lebar	**Tinggi**	***Depth***			
O1	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp665,000.00
O2	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp1,121,000.00
O3	C1	0.29	0.17	0.59	0.029	10	Rp2,550,000.00
O4	C3	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp560,000.00
O5	C3	0.29	0.22	0.43	0.027	16	Rp398,400.00
O6	C4	0.4	0.15	0.6	0.036	12	Rp298,800.00

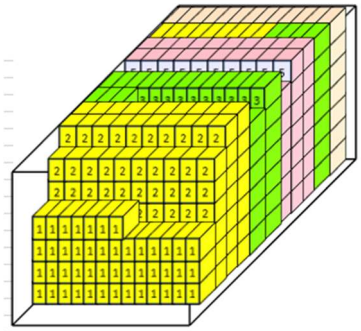
Berikut ini adalah hasil pemuatan kargo dan visualisasi masing-masing skenario untuk eksperimen numerik 2.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 2

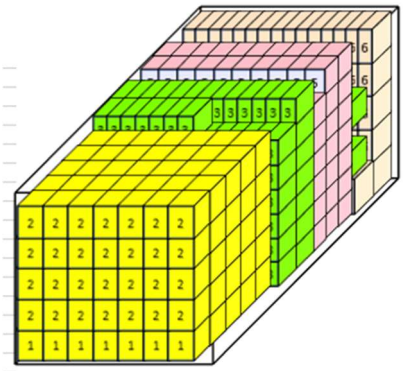
Indikator	Skenario			Unit
	1	2	3	
Performance Indicator				
Total Kargo	800	800	800	unit
Kargo yang Dimuat	800	800	675	unit
Kargo yang Tidak Dimuat	0	0	125	unit
Filling Rate	100%	100%	84%	%
Komponen Biaya				
Penalty Cost	0	0	110,485,000	Rp
Quality Loss Cost	1,585,910	1,742,935	1,726,315	Rp
Refrigeration Cost	1,018,750	1,324,113	1,238,230	Rp
Shipping Cost	20,272	20,272	20,272	Rp
Vehicle Cost	3,500,000	3,500,000	3,500,000	Rp
Unnecessary Moving Cost	280,000	1,360,000	240,000	Rp
Total Biaya	**6,404,932**	**7,947,320**	**117,209,817**	**Rp**



Skenario 1



Skenario 2



Skenario 3

Gambar 5. 9 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 2

Berdasarkan Tabel 5.10 dapat dilihat bahwa skenario 1 dan skenario 2 dapat mengakomodasi seluruh kargo, sedangkan skenario 3 hanya dapat mengakomodasi 84%. Hal tersebut dapat terjadi karena skenario 1 dan 2 memiliki tipe kargo yang relatif sedikit sehingga hampir setiap lapisan (*layer*) dapat terisi penuh karena memiliki dimensi dan berat yang sama. Skenario 3 memiliki tipe kargo yang sangat heterogen sehingga pada beberapa lapisan ditemukan ketidaksesuaiaan berat kargo, dan dimensi depth, sehingga pemanfaatan ruang tidak efisien. Skenario 2 memiliki nilai *unnecessary moving cost* yang paling besar karena proses penyusunan kargo memprioritaskan pencarian rasio *depth* terbaik dibandingkan membuat lapisan baru, apabila pada lokasi pengiriman yang sama tidak ditemukan tipe kargo yang memenuhi kriteria *stacking* dan rasio *depth* terbaik. Sedangkan, skenario 3 memiliki nilai *unnecessary moving cost* terkecil karena tidak semua kargo dapat dimuat di dalam *reefer*, namun hal tersebut membuat skenario 3 memiliki *penalty cost* yang paling besar. Apabila dilihat dari total biaya keseluruhan dapat disimpulkan bahwa semakin banyak tipe kargo yang digunakan akan meningkatkan total biaya keseluruhan. Apabila tipe kargo yang digunakan teralu banyak akan berdampak kepada utilitas kargo sehingga ruang pada *reefer* tidak dapat digunakan secara maksimal dan dapat meningkatkan *penalty cost.*

5.3 Eksperimen Numerik 3 : Perbandingan *Dedicated Reefer Loading* Berdasarkan Produk, *Dedicated Reefer Loading* Berdasarkan Tujuan, dan *Multi Reefer Loading*

Pada eksperimen numerik ini, hasil pemuatan kargo antara *dedicated reefer loading* dengan *multi refeer loading* (Multi MR-CLP) akan dibandingkan. *Dedicated reefer loading* adalah pemuatan kargo pada *reefer* yang dikhususkan untuk jenis produk atau tujuan pengiriman tertentu. Terdapat tiga lokasi pengiriman yang akan digunakan pada eksperimen numerik ini, yaitu Jakarta Pusat (JKP), Jakarta Barat (JKB), dan Jakarta Selatan (JKS) dengan titik pemberangkatan *reefer* dari Jakarta Utara (JKU). Masing-masing lokasi tersebut akan menerima tiga jenis produk, yaitu Apel, Jeruk, dan Ceri. Eksperimen numerik ini menggunakan jenis model Single MR-CLP dan Multi MR-CLP dengan data distribusi suhu yang

digunakan adalah suhu penyimpanan 271.15 K dan kecepatan udara 4 m/s. Berikut ini adalah urutan pengiriman kargo ke masing-masing lokasi.

Tabel 5. 11 Data Lokasi Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 3

Urutan Pengiriman	Lokasi	Koordinat		Waktu Tempuh (jam)	Jarak Tempuh (km)
		Latitude	*Longtitude*		
0 (Gudang)	Jakarta Utara (JKU)	-6.13	106.87		
1	Jakarta Barat (JKB)	-6.15	106.83	0.12	4.95
2	Jakarta Pusat (JKP)	-6.19	106.83	0.23	9.40
3	Jakarta Selatan (JKS)	-6.30	106.81	0.55	21.83

Berikut ini adalah data pesanan pelanggan untuk eksperimen numerik 3.

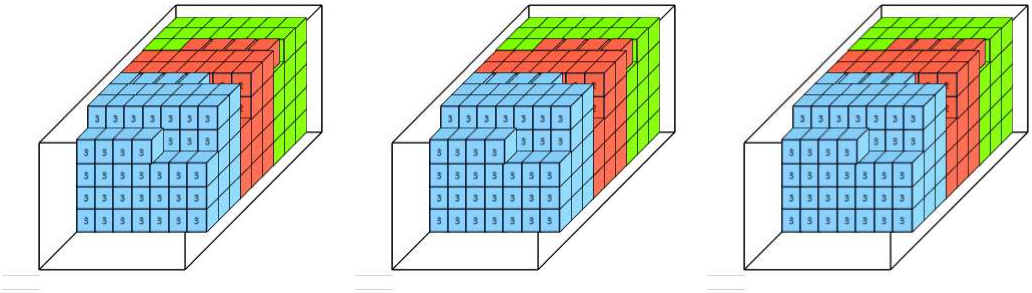
Tabel 5. 12 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 3

Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O1	Jeruk	100	JKS	277.15	280.15	336	95%
O2	Jeruk	100	JKB	277.15	280.15	336	95%
O3	Jeruk	100	JKP	277.15	280.15	336	95%
O4	Ceri	100	JKS	273.15	275.15	240	95%
O5	Ceri	100	JKB	273.15	275.15	240	95%
O6	Ceri	100	JKP	273.15	275.15	240	95%
O7	Apel	100	JKS	272.15	277.15	720	95%
O8	Apel	100	JKB	272.15	277.15	720	95%
O9	Apel	100	JKP	272.15	277.15	720	95%
Order ID	**Tipe Kargo**	**Dimensi kargo (m)**			**Volume kargo (m3)**	**Berat kargo (kg)**	**Nilai Jual per Kargo (Rp.)**
		Lebar	**Tinggi**	***Depth***			
O1	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp473,100.00
O2	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp473,100.00
O3	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp473,100.00
O4	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp4,845,000.00
O5	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp4,845,000.00
O6	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp4,845,000.00
O7	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp665,000.00
O8	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp665,000.00
O9	C2	0.3	0.37	0.51	0.057	19	Rp665,000.00

Berikut ini adalah rekapitulasi hasil pemuatan kargo dan visualisasi untuk eksperimen numerik 3.

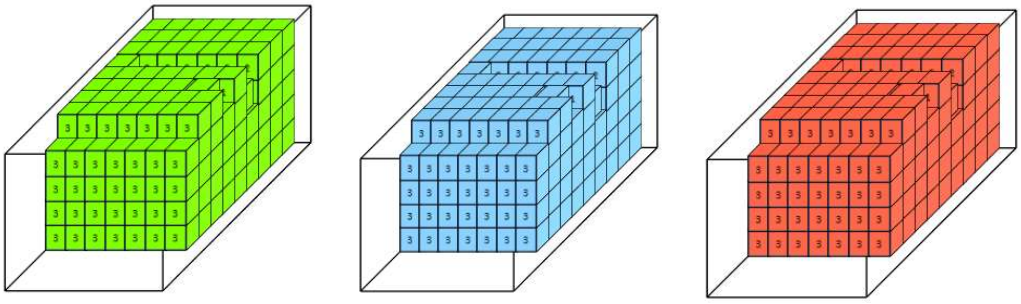
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 3

Indikator	**Dedicated Reefer Loading (Produk)**			**Dedicated Reefer Loading (Lokasi)**			**Multi MR-CLP**			**Unit**
	Reefer			**Reefer**			**Reefer**			
	#1	**#2**	**#3**	**#1**	**#2**	**#3**	**#1**	**#2**	**#3**	
Performance Indicator										
Total Kargo	300	300	300	300	300	300	403	365	134	unit
Tingkat Utilitas (Volume)	56.23	56.23	56.23	56.23	56.23	56.23	75.54	68.41	25.12	%
Komponen Biaya										
Penalty Cost	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rp
Quality Loss Cost	86,578	2,013,923	126,723	1,243,642	298,481	497,466	1,764,871	482,650	19,464	Rp
Refrigeration Cost	725,382	725,382	725,382	725,477	725,296	725,334	972,077	880,417	323,222	Rp
Shipping Cost	8,688	8,688	8,688	36,200	8,688	14,480	31,321	13,485	7,103	Rp
Vehicle Cost	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	3,500,000	Rp
Unnecessary Moving Cost	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rp
Total Cost	**4,320,647**	**6,247,993**	**4,360,793**	**5,505,319**	**4,532,465**	**4,737,280**	**6,268,268**	**4,876,552**	**3,849,788**	**Rp**
Grand Total	**14,929,432**			**14,775,063**			**14,994,608**			**Rp**



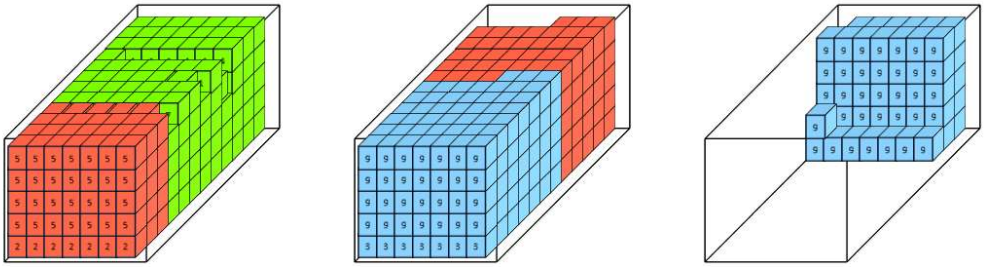
Reefer #1 Reefer #2 Reefer #3

Gambar 5. 10 Visualisasi Pemuatan Kargo *Dedicated Reefer Loading* (Lokasi)



Reefer #1 Reefer #2 Reefer #3

Gambar 5. 11 Visualisasi Pemuatan Kargo *Dedicated Reefer Loading* (Produk)



Reefer #1 Reefer #2 Reefer #3

Gambar 5. 12 Visualisasi Pemuatan Kargo Multi MR-CLP

Berdasarkan Tabel 5.13, dapat dilihat bahwa setiap model dapat mengakomodasi seluruh kargo sehingga tidak dikenakan *penalty cost.* Utilitas volume model MR-CLP pada *reefer* pertama lebih tinggi dibandingkan *reefer* kedua dan ketiga, sedangkan *dedicated reefer loading* baik produk maupun lokasi memiliki utilitas yang sama besar pada masing-masing *reefer.* Dari segi *quality loss cost*, model *dedicated reefer loading* berdasarkan lokasi memiliki total *quality loss*

cost terendah yaitu Rp 2,039,589. Sedangkan dari segi *refrigeration cost*, model MR-CLP memiliki total *refrigeration cost* terendah yaitu Rp 2,175,715. Apabila ditinjau dari *shipping cost,* model *dedicated reefer loading* berdasarkan produk memiliki total *shipping cost* terendah yaitu Rp 26,004. Secara keseluruhan, model *dedicated reefer loading* berdasarkan lokasi memiliki total biaya yang paling minimum.

5.4 Eksperimen Numerik 4 : Pengaruh Waktu Tempuh Terhadap Penyusunan Kargo

Eksperimen numerik ini akan dilakukan untuk menguji pengaruh waktu tempuh pengiriman terhadap penyusunan kargo dan total biaya. Terdapat tiga skenario pengiriman yang akan dilakukan pada eksperimen ini, di mana masing-masing skenario memiliki titik lokasi pengiriman, waktu tempuh, dan jarak tempuh yang berbeda-beda namun jumlah dan jenis produk yang dikirim sama. Eksperimen numerik ini menggunakan jenis model Single MR-CLP dan data distribusi suhu yang digunakan adalah suhu penyimpanan 271.15 K dan kecepatan udara 4 m/s. Berikut adalah data lokasi pelanggan untuk masing-masing skenario.

Tabel 5. 14 Data Lokasi Pelanggan Skenario 1 untuk Eksperimen Numerik 4

Urutan Pengiriman	Notasi	Lokasi	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
0 (Gudang)	L1	Jakarta Pusat (JKP)		
1	L2	Tangerang (TGS)	16.48	0.41
2	L3	Bekasi (BEK)	46.83	1.17
3	L4	Bogor (BOG)	92.03	2.30
4	L5	Bandung (BDG)	189.31	4.73

Tabel 5. 15 Data Lokasi Pelanggan Skenario 2 untuk Eksperimen Numerik 4

Urutan Pengiriman	Notasi	Lokasi	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
0 (Gudang)	L1	Jakarta Pusat (JKP)		
1	L2	Jakarta Timur (JKT)	7.09	0.18
2	L3	Bekasi (BEK)	19.30	0.48
3	L4	Bandung (BDG)	122.06	3.05
4	L5	Semarang (SEM)	433.46	10.84

Tabel 5. 16 Data Lokasi Pelanggan Skenario 3 untuk Eksperimen Numerik 4

Urutan Pengiriman	Notasi	Lokasi	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
0 (Gudang)	L1	Jakarta Pusat (JKP)		
1	L2	Jakarta Timur (JKT)	8.00	0.20
2	L3	Bekasi (BEK)	104.18	2.60
3	L4	Bandung (BDG)	309.38	7.73
4	L5	Semarang (SEM)	620.78	15.52

Seluruh skenario memiliki titik pemberangkatan yang sama, yaitu Gudang di Jakarta Pusat (JKP). Berdasarkan pada Tabel 5.14, total jarak tempuh pengiriman untuk skenario 1 adalah 189.31 km dengan waktu tempuh 4.73 jam. Berdasarkan pada Tabel 5.15, total jarak tempuh pengiriman untuk skenario 2 adalah 433.46 km dengan waktu tempuh 10.84 jam. Berdasarkan pada Tabel 5.16, total jarak tempuh

pengiriman untuk skenario 3 adalah 620.78 km dengan waktu tempuh 15.52 jam. Dari ketiga skenario tersebut, skenario 3 memiliki jarak tempuh terpanjang dan skenario 1 memiliki jarak tempuh terpendek. Berikut adalah data pesanan pelanggan untuk eksperimen numerik 4.

Tabel 5. 17 Data Pesanan Pelanggan untuk Eksperimen Numerik 4

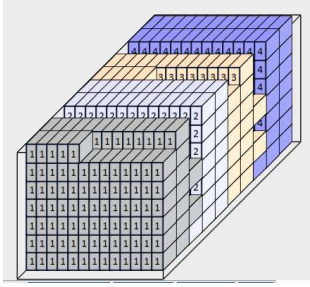
Order ID	Nama Produk	Q	Tujuan Pengiriman	Suhu Optimal (K)		Umur Simpan (jam)	Syarat Kualitas
				Min.	Maks.		
O1	Ceri	200	L2	273.15	275.15	240	95%
O2	Apel	200	L3	272.15	277.15	720	95%
O3	Kiwi	200	L4	273.15	275.15	1344	95%
O4	Ceri	200	L5	273.15	275.15	240	95%
Order ID	**Tipe Kargo**	**Dimensi kargo (m)**			**Volume kargo (m3)**	**Berat kargo (kg)**	**Nilai Jual per Kargo (Rp.)**
		Lebar	**Tinggi**	***depth***			
O1	C1	0.29	0.17	0.59	0.0291	10	Rp2,550,000.00
O2	C1	0.29	0.17	0.59	0.0291	10	Rp350,000.00
O3	C1	0.29	0.17	0.59	0.0291	10	Rp590,000.00
O4	C1	0.29	0.17	0.59	0.0291	10	Rp2,550,000.00

Pada Tabel 5.17 dapat dilihat bahwa masing-masing lokasi pengiriman hanya memiliki satu pesanan dengan jumlah yang sama besar. Berikut ini adalah hasil pemuatan kargo dan visualisasi masing-masing skenario pada eksperimen numerik 4.

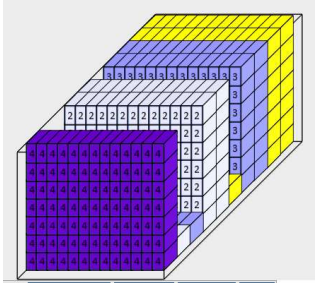
Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 4

Indikator	Skenario			Unit
	1	2	3	
Variabel Skenario				
Jarak Tempuh	189.31	433.46	620.78	km
Waktu Tempuh	4.73	10.84	15.52	jam
Performance Indicator				
Total Kargo	800	800	800	unit
Kargo yang Dimuat	800	691	600	unit
Kargo yang Tidak Dimuat	0	109	200	unit
Filling Rate	100	86,37	75	%
Tingkat Utilitas (Volume)	77.05	66.55	57.78	%
Komponen Biaya				

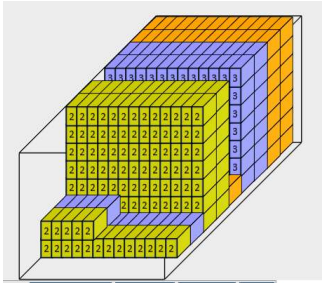
Indikator	Skenario			Unit
	1	2	3	
Penalty Cost	0	277,950,000	510,000,000	Rp
Quality Loss Cost	12,743,165	11,412,821	1,894,747	Rp
Refrigeration Cost	1,019,248	881,507	767,552	Rp
Shipping Cost	29,684	784,816	188,240	Rp
Vehicle Cost	3,500,000	3,500,000	3,500,000	Rp
Unnecessary Moving Cost	0	12,000,000	12,000,000	Rp
Total Biaya	**17,292,097**	**306,529,143**	**528,350,539**	**Rp**



Skenario 1



Skenario 2



Skenario 3

Gambar 5. 13 Visualisasi Pemuatan Kargo untuk Eksperimen Numerik 4

Pada Tabel 5.18 dapat dilihat bahwa semakin lama waktu tempuh pengiriman maka nilai tingkat utilitas dan *filling rate* akan semakin rendah. Hal tersebut disebabkan oleh banyaknya kargo yang tidak memenuhi syarat kualitas sebesar 95%. Tingkat kualitas kargo dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu waktu tempuh pengiriman dan perbedaan suhu optimal dengan suhu penyimpanan. Semakin jauh waktu tempuh pengiriman maka penurunan tingkat kualitas kargo akan semakin besar pula, begitu juga dengan selisih antara suhu optimal dengan suhu penyimpanan. Kargo yang tidak memenuhi syarat kualitas yang sudah ditentukan tidak akan dimuat ke dalam *reefer* guna menjaga tingkat kepuasan

pelanggan. Apabila ditinjau dari segi komponen biaya, semakin lama waktu tempuh pengiriman maka semakin besar nilai *penalty cost.* Hal tersebut disebabkan oleh nilai *filling rate* di mana semakin rendah nilai *filling rate* akan menyebabkan *penalty cost* menjadi besar. Namun, hal tersebut memiliki *trade-off* di mana dapat menyebabkan *quality loss cost* rendah. Komponen biaya *refrigeration cost* dipengaruhi oleh berat kargo yang dimuat sehingga semakin rendah *nilai filling rate* maka semakin rendah pula *refrigeration cost.* Komponen biaya *shipping cost* dipengaruhi oleh jarak tempuh di mana semakin jauh jarak pengiriman maka semakin besar pula *shipping cost.* Dari eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu pengiriman maka semakin besar total biaya di mana komponen biaya yang signifikan berpengaruh terhadap total biaya adalah *penalty cost.* Selain itu, disarankan agar total waktu tempuh pengiriman kurang dari 10.84 jam agar *filling rate* mencapai 100% sehingga tidak ada *penalty cost* yang besar.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 6
KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan yang didapatkan dari penelitian dan saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya.

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini, model *multi-drop refrigerated container loading problem* dengan mempertimbangkan *internal temperature distribution* untuk kargo komoditi hortikultura, yaitu buah-buahan dan sayuran, atau MR-CLP dikembangkan dan divisualisasikan menggunakan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel. Model ini berfungsi untuk menentukan strategi penyusunan kargo di dalam *reefer* sehingga dapat meminimumkan total biaya yang terdiri dari *penalty cost, quality loss cost, unnecessary moving cost, refrigeration cost, shipping cost*, dan *vehicle cost.* Model ini menggunakan algoritma heuristik konstruktif dengan menggunakan pendekatan *wall-building* dan *dynamic sequencing.* Terdapat beberapa pembatas yang dipertimbangkan pada model ini, yaitu *stacking, vertical stability, multi-drop, internal temperature distribution,* dan *weight limit.*
2. Model ini dapat digunakan untuk melakukan eksperimen pemuatan kargo di dalam *reefer* dengan berbagai data jenis produk, tipe kargo, titik lokasi pengiriman, dan suhu penyimpanan. Hasil eksperimen numerik menunjukkan bahwa total biaya minimum akan tercapai jika penyusunan kargo menggunakan pengaturan suhu penyimpanan rendah dan kecepatan udara yang tinggi, dan menggunakan tipe kargo yang sejenis. Selain itu, disarankan agar pengiriman kargo dilakukan untuk jarak pendek atau total waktu tempuh kurang dari 10.84 jam serta mempertimbangkan jumlah lokasi pengiriman dan jumlah jenis buah

yang dimuat agar dapat menentukan strategi penyusunan yang tepat antara *dedicated reefer loading* atau *multi reefer loading.*

6.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut:

1. Mengembangkan model dengan pendekatan atau algoritma heuristik lain serta menambahkan pembatas praktis agar memiliki hasil yang lebih baik dan merepresentasikan kondisi nyata.
2. Mengembangkan model dengan menggunakan jenis bentuk kargo selain balok seperti tabung atau bentuk irregular.
3. Melakukan uji kelayakan model matematis dengan menggunakan metode *exact* untuk mengetahui keakuratan pembatas (*contraints*) dan tingkat solusi optimal.
4. Menambahkan pembatas (*constraint*) *vehicle routing problem* pada model matematis model agar mendapatkan total biaya yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Adetio, I. R., 2019. *Model Development of Refrigerated Container Loading Problem for Fishery Products Considering Internal Temperatyre Distribution,* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Akdemir, S., 2008. Designing of Cold Stores and Choosing of Cooling System Elements. *Journal of Applied Sciences,* Volume 8, pp. 788-794.

American President Lines , 2018. *Fresh Connections Your Reefer Guide,* Singapore: American President Lines Ltd.

Aung, M. & Chang, Y., 2014. Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain. *Food Control,* Volume 40, pp. 198 - 207.

Badan Pusat Statistik, 2019. *Statistik Perusahaan Hortikultura dan Usaha Hortikultura Lainnya 2019.* Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Badan Pusat Statistik, 2020. *Laju Pertumbuhan Y on Y Produk Domestik Bruto Menurut Lapangan Usaha (Persen), 2017 - 2020.* [Online] Available at: https://www.bps.go.id/dynamictable/2017/05/05/1255/-seri-2010-laju-pertumbuhan-y-on-y-produk-domestik-bruto-menurut-lapangan-usaha-persen-2017---2020.html. [Accessed 1 May 2020].

Berry, T., Delele, M., Griessel, H. & Opara, U., 2015. Geometric design characterisation of ventilated multi-scale packaging used in the South African pome fruit industry. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America,* 46(3), pp. 34-42.

Bischoff, E. E. & Marriott, M., 1990. Comparative evaluation of heuristics for container loading. *European Journal of Operational Research,* 44(2), p. 267–276.

Bortfeldt, A. & Wäscher, G., 2013. Constraints in container loading – Astate-of-the-art review. *European Journ al of Operational Research,* Volume 229, pp. 1-20.

Brzozowska, A., Imiołczyk, J., Brzeszczak, A. & Szymczyk, K., 2016. Managing Cold Chain. *Conference Paper.*

Ceschia, S. & Schaerf, A., 2013. Local search for a multi-drop multi-container loading problem. *Journal of Heuristics,* 19(2), pp. 275-294.

Chen, C. S., Lee, S. M. & Shen, Q. S., 1995. An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research,* 80(1), pp. 68-76.

Christensen, S. G. & Rousøe, D. M., 2009. Container loading with multi-drop constraints. *International Transactions in Operational Research,* 16(6), p. 727–743 .

Eley, M., 2002. Solving container loading problems by block arrangement. *European Journal of Operational Research,* 141(2), p. 393–409.

Fairclough, C., 2016. *Using Simulation to Ensure the Cooling Efficiency of Refrigerated Trucks.* [Online] Available at: https://www.comsol.com/blogs/using-simulation-to-ensure-the-cooling-efficiency-of-refrigerated-trucks/ [Accessed 8 May 2020].

Fanslau, T. & Bortfeldt, A., 2010. A Tree Sarch Algorithm for Solving the Container Loading Problem. *INFORMS Journal on Computing,* Volume 22, pp. 222-235.

Food And Agriculture Organization , 2011. *Global food losses and food waste: extent, causes and prevention,* Rome: Food And Agriculture Organization .

Food And Agriculture Organization , 2019. *The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction,* Rome: Food And Agriculture Organization .

George, J. A. & Robinson, D. F., 1980. A heuristic for packing boxes into a container. *Computers & Operations Research,* 7(3), p. 147–156.

Goedhals-Gerber, L., Stander, C. & Van Dyk, F., 2017. Maintaining cold chain integrity: Temperature breaks within fruit reefer containers in the Cape Town Container Terminal. *Southern African Business Review ,* Volume 21, p. 364.

Goverment of Western Australia, 2016. *Storage of fresh fruit and vegetables,* Perth: Goverment of Western Australian.

Hu, H. H., 2012. Computational Fluid Dynamics. In: *Fluid Mechanics.* s.l.:s.n., p. 421–472.

Kementerian Pertanian, 2019. *Kebijakan Ekspor Amran Meningkatkan Pasar Ekspor Hortikultura.* [Online]

Available at: https://www.pertanian.go.id/home/?show=news&act=view&id=3858 [Accessed 1 May 2020].

Liu, S., Tan, W., Xu, Z. & Liu, X., 2014. A tree search algorithm for the container loading problem. *Computers & Industrial Engineering,* Volume 75, pp. 20 - 30.

Li, X. & Zhang, K., 2015. A hybrid differential evolution algorithm for multiple container loading problem with heterogeneous containers. *Computers & Industrial Engineering,* Volume 90, pp. 305-313.

Nunes, M. et al., 2014. Improvement in fresh fruit and vegetable logistics quality: berry logistics field studies. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences,.*

Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J. M. & Oliveira, J. F., 2008. A Maximal-Space Algorithm for the Container Loading Problem. *INFORMS Journal on Computing,* 20(3), p. 412–422.

Pedruzzi, S., Nunes, L. P. A., Rosa, R. d. A. & Arpini, B. P., 2016. A mathematical model to optimize the volumetric capacity of trucks utilized in the transport of food products. *Gest. Prod., São Carlos,* 23(2), pp. 350-364.

Pisinger, D., 2002. Heuristics for the container loading problem. *european journal operational research,* Volume 141, pp. 382 - 392.

Queensland's Departement of Agriculture and Fisheries, 2017. *Recommended storage temperatures for fresh produce,* Brisbane: Goverment of Queensland.

Raafat, F., 1991. Survey of literature on continuously deteriorating inventorymodels. *Journal of the Operational Research Society,* pp. 27-37.

Rodrigue, J. & Notteboom, T., 2017. *The Cold Chain and its Logistics.* [Online] Available at: http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch5en/appl5en/ch5a5en.html. [Accessed 7 May 2020].

Saffir, I. & Lang, W., 2016. Airflow Simulation inside Reefer Containers. *4th International Conference LDIC,* pp. 303 - 311.

Seifi, M. S., 2017. *Multimodal transportation for perishable products.* Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Sheng, L. et al., 2017. Heuristic algorithm for the container loading problem with multiple constrains. *Computers and Industrial Engineering,* Volume 108, pp. 149 - 164.

Silver, E. A., Pyke, D. F. & Thomas, D. J., 2017. *Inventory and Production Management in Supply Chains.* 4th ed. Boca Raton: CRC Press.

Smale, N., Moureh, J. & Cortella, G., 2016. A review of numerical models of airflow in refrigerated. *International Journal of Refrigeration,* 29(6), pp. 911 - 930.

U.S Departement of Agriculture, 1977. *Storing Perishable Foods in Home,* Washington D.C.: U.S Departement of Agriculture.

U.S Departement of Agriculture, 2019. *What Food Are Perishable.* [Online] Available at: https://ask.usda.gov/s/article/What-foods-are-perishable [Accessed May 1 2020].

Umeno, Y. et al., 2015. The use of CFD to simulate temperature distribution in refrigerated containers.. *Engineering in Agriculture, Environment and Food,* 8(4), pp. 257-263.

Wäscher, G., Haußner, H. & Schumann, H., 2007. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research,* Volume 183, pp. 1109-1130.

Winarni, I., 2008. Ruang Lingkup dan Perkembangan Hortikultura. In: *Hortikultura.* Jakarta: Universitas Terbuka, pp. 1-43.

Yang, S., Xiao, Y. & Yong-Hong Kuo, 2017. The Supply Chain Design for Perishable Food with Stochastic Demand. *Sustainability,* 9(7), p. 1195 .

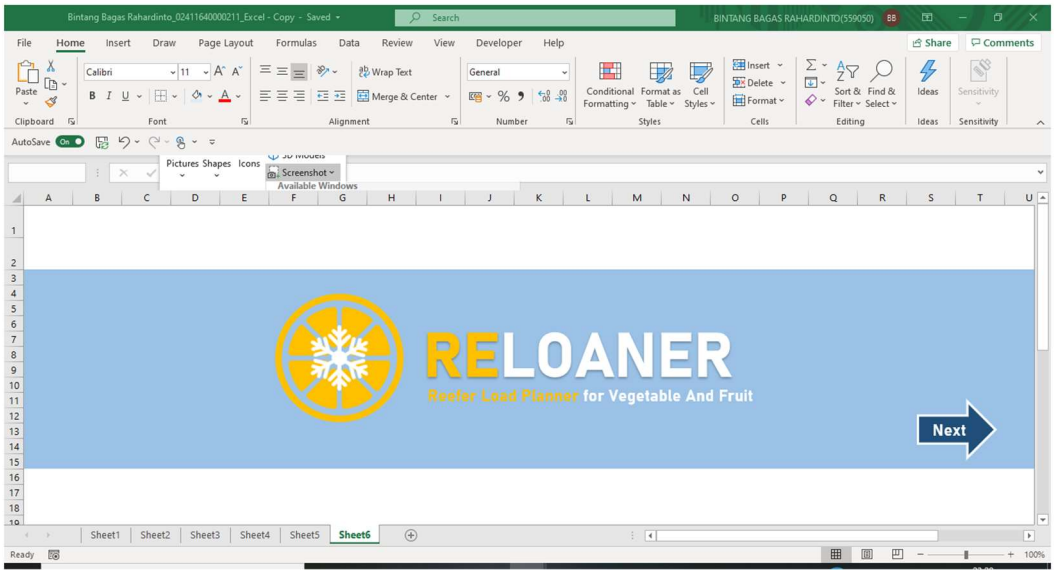
Zhao, X., Bennell, J., Bektaş, T. & Dowsland, K., 2016. A comparative review of 3D container loading algorithms. *International Transactions in Operational Research ,* 23(1-2), pp. 287-320.

Zúñiga, R. N. & Troncoso, E., 2013. SHELF-LIFE CALCULATION AND TEMPERATURETIME INDICATORS: IMPORTANCE IN FOOD SAFETY. In: C. Z. Pedreschi F., ed. *Chemical food safety and health.* Santiago Metropolitan Region: Nova Science Publishers, pp. 131 - 148.

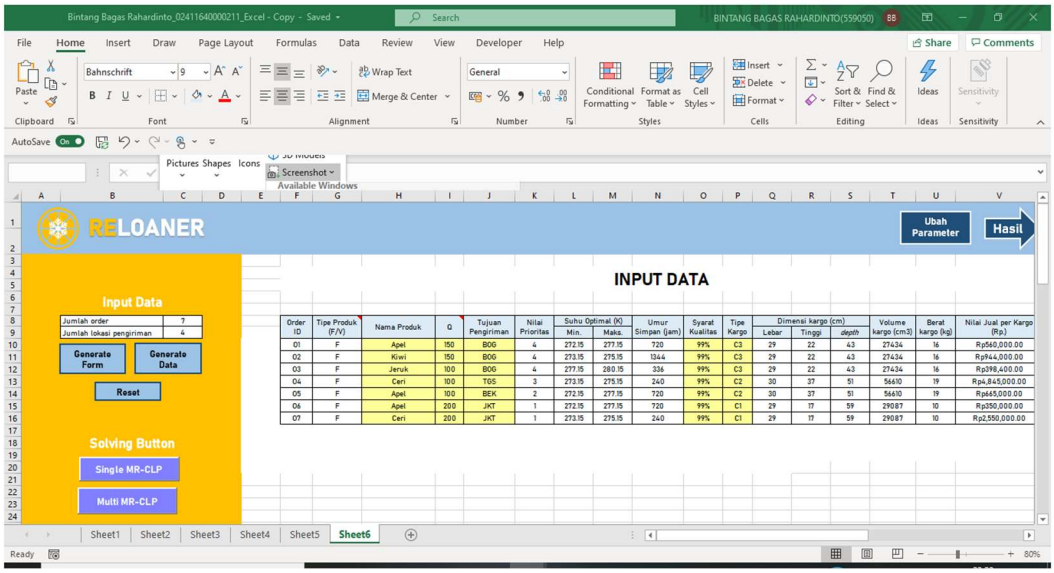
LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: Tampilan Visualisasi Model

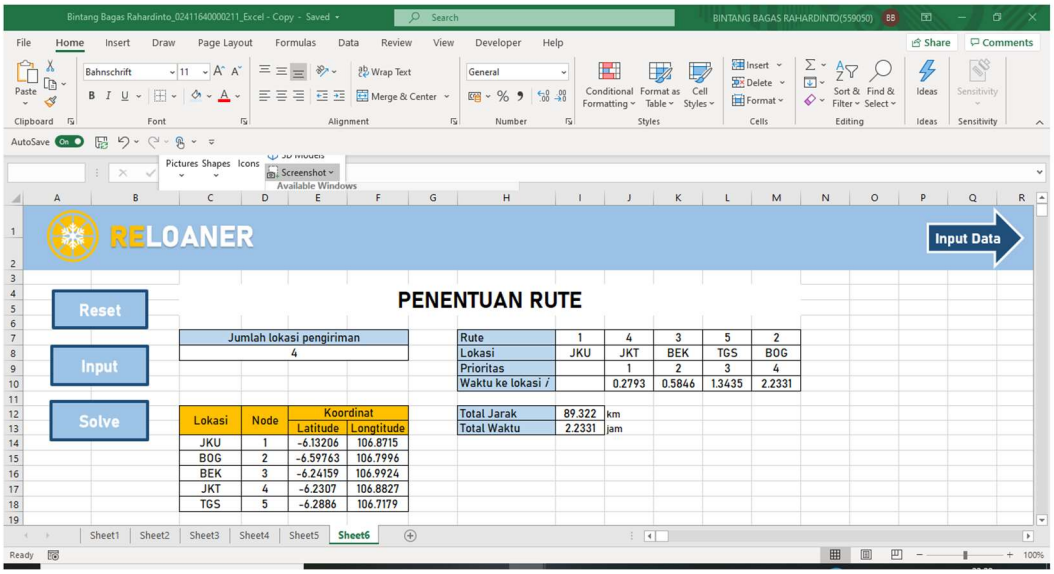
Tampilan Beranda - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



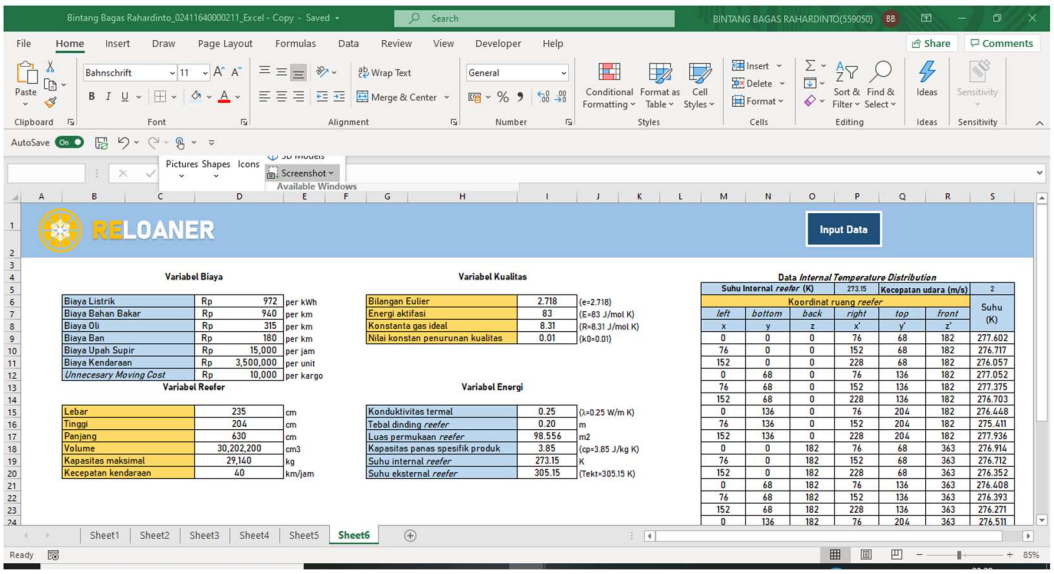
Tampilan Laman Input Data - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



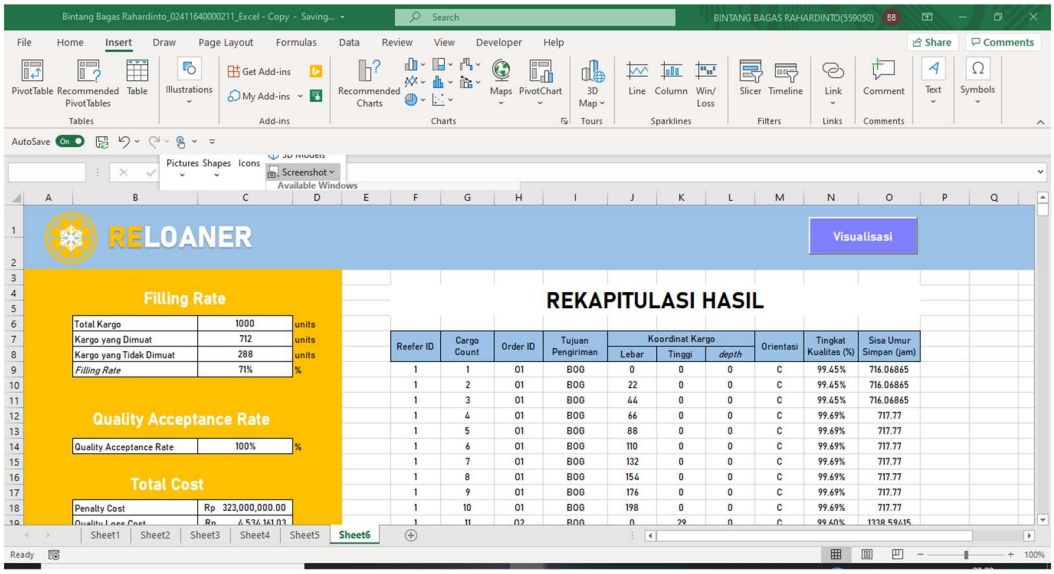
Tampilan Laman Penentuan Rute - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



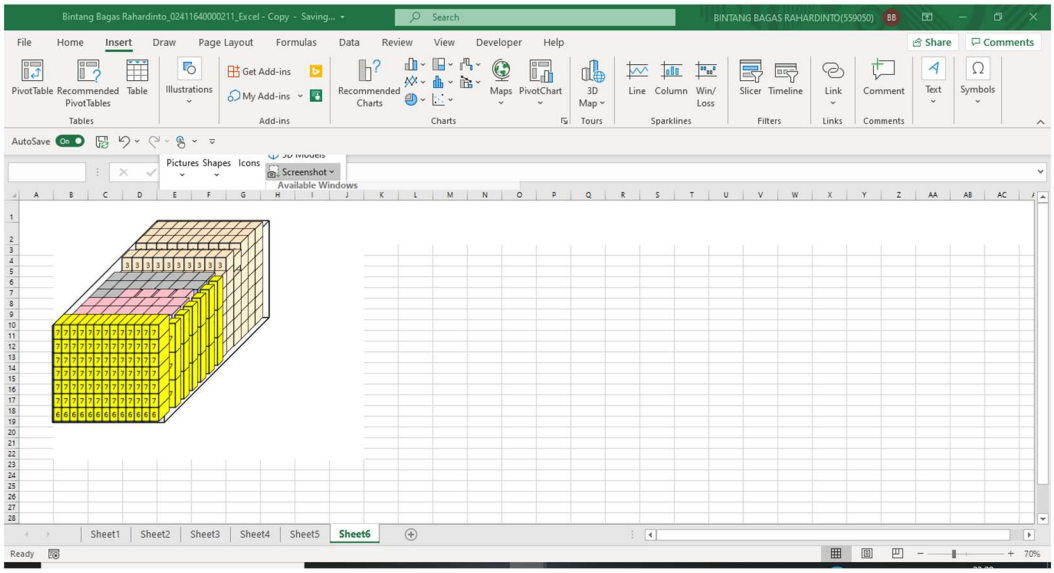
Tampilan Laman Parameter - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



Tampilan Laman Hasil - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



Tampilan Laman Visualisasi - Reefer Load Planner for Vegetable And Fruit (RELONER) di Microsoft Excel 2016



(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BIOGRAFI PENULIS

Bintang Bagas Rahardinto lahir di Jakarta pada tanggal 4 Oktober 1998. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis merupakan putra satu-satunya dari pasangan Bambang Raharjo dan Dyne Meirianti Sugiharto. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Gunung 05 Pagi Jakarta, SMP Negeri 19 Jakarta, dan SMA Negeri 28 Jakarta.

Setelah lulus dari bangku sekolah menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjalani perkuliahan, penulis merupakan mahasiswa yang aktif, baik dalam bidang akademik maupun non-akademik. Dalam bidang akademik, penulis telah mengikuti tiga kompetisi keilmuan teknik industri, yaitu (1) *National Business Solution Competition* (NBSC) 2018 di Universitas Padjajaran; (2) *Industrial Creative Season* (Increase) 2019 di Universitas Telkom; serta (3) *Industrial and System Engineering Competition* (ISEEC) 2020 di Universitas Indonesia. Dari ketiga kompetisi yang diikuti oleh penulis, penulis berhasil menjadi finalis pada NBSC dan ISEEC serta juara dua pada Increase. Dalam bidang non-akademik, penulis juga berperan aktif dalam dua organisasi, yaitu (1) *Logistics and Supply Chain Management Laboratory* (LSCM) sebagai asisten laboratorium periode 2019-2020; dan (2) Himpunan Mahasiswa Teknik Industri (HMTI) sebagai Kepala Departemen Sosial Masyarakat (Sosma) periode 2018-2019.

Pada periode akhir perkuliahan, penulis mendapatkan kesempatan untuk melakukan Kerja Praktik (KP) pada Divisi *Business Government Enterprise Services* (BGEST) di PT Telkom Indonesia (Persero) Tbk, Witel Banten Timur. Untuk informasi lebih lanjut terkait dengan tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi bintangbagasrahardinto@gmail.com.