NO. TUGAS AKHIR
122250453/2753/2026

PERBAIKAN TATA LETAK LANTAI PRODUKSI UNTUK MEMINIMASI JARAK *MATERIAL HANDLING* DENGAN PENDEKATAN *MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING*

(Studi Kasus Pada Industri Karton Di Sewon, Bantul, Yogyakarta)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam Memperoleh Gelar Sarjana di Teknik Industri

Oleh

RAFLI HUSAINI AHMAD

122220027

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI

JURUSAN TEKNIK INDUSTRI

FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"

YOGYAKARTA

2026

A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING APPROACH FOR PRODUCTION FLOOR LAYOUT IMPROVEMENT TO MINIMIZE MATERIAL HANDLING DISTANCE

(Case Study at a Carton Industry in Sewon, Bantul, Yogyakarta)

AN UNDERGRADUATE THESIS

Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Undergraduate in Industrial Engineering

By

RAFLI HUSAINI AHMAD

122220027

UNDERGRADUATE OF INDUSTRIAL ENGINEERING

INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"

YOGYAKARTA

2026

HALAMAN PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERBAIKAN TATA LETAK LANTAI PRODUKSI UNTUK MEMINIMASI JARAK *MATERIAL HANDLING* DENGAN PENDEKATAN *MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING*

Oleh

Rafli Husaini Ahmad
122220027

Telah disetujui dan disahkan
pada tanggal: 22 Juli 2026

Dosen Pembimbing

Ir. Intan Berlianty., S.T., M.T.
NIP 19761019200501 2001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Industri
Fakultas Teknik Industri
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

Ir. Andreas Mahendro K., S.T., M.Sc., M.Sc., Ph.D.
NIP 198111172022031001

PERNYATAAN KEASLIAN DAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rafli Husaini Ahmad

No. Mahasiswa : 122220027

Jurusan : Teknik Industri

menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini adalah benar-benar hasil karya penulis sendiri dan bukan merupakan hasil plagiat kecuali yang secara tertulis disitasi dalam tugas akhir ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini terbukti merupakan hasil plagiat dari karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan karya penulis lain, penulis bersedia bertanggung jawab dan menerima sanksi tanpa melibatkan institusi sesuai aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya dan tanpa paksaan dari pihak manapun.

Yogyakarta, 20 April 2026

Yang menyatakan



Rafli Husaini Ahmad

122220027

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "**Perbaikan Tata Letak Lantai Produksi Untuk Meminimasi Jarak *Material Handling* Dengan Pendekatan *Mixed Integer Linear Programming***" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Industri di Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Ir. Intan Berlianty, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan bimbingan, ilmu, saran, dan motivasi berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Ir. Andreas Mahendro K., S.T., M.Sc., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta yang telah memberikan arahan dan fasilitas selama masa studi penulis.
3. Bapak FX Bagus Kuncoro, selaku CEO perusahaan objek penelitian, atas kesempatan dan izin yang diberikan kepada penulis dalam melakukan penelitian serta pengambilan data di perusahaan.
4. Orang tua dan keluarga,yang senantiasa memberikan dukungan moral, doa, semangat, serta motivasi yang tak terhingga bagi penulis.
5. Teman-teman grup Reuni#1, terima kasih atas kebersamaan, bantuan dalam pengerjaan skripsi, serta waktu luang untuk *mabar* yang sangat berarti sebagai pelepas penat.
6. Seluruh rekan mahasiswa Teknik Industri Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta angkatan 2022, atas kebersamaan dan kenangan indah selama masa perkuliahan.

7. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah membantu dalam kelancaran penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan bagi pembaca.

Yogyakarta, 20 April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN PENGESAHAN ..... **ii**
PERNYATAAN KEASLIAN DAN BEBAS PLAGIAT ..... **iii**
KATA PENGANTAR ..... **iv**
DAFTAR ISI ..... **vi**
DAFTAR TABEL ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **x**
DAFTAR NOTASI ..... **xii**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xiii**
ABSTRAK ..... **xvi**
ABSTRACT ..... **xvii**

BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan dan Asumsi 3
1.4.1 Batasan Masalah 3
1.4.2 Asumsi 4
1.5 Manfaat Penelitian 4
1.6 Sistematika Penulisan 4

BAB II LANDASAN TEORI **6**
2.1 Tata Letak Fasilitas 6
2.2 Implementasi Tata Letak Usulan 7
2.3 Jenis-Jenis Tata Letak 9
2.4 Pola Aliran Material 12
2.5 Metode Pengukuran Jarak 15
2.6 Perhitungan Luas Area Produksi 17

2.7 *From To Chart* 19
2.8 *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) 20
2.8.1 Pengertian MILP 20
2.8.2 Unsur-Unsur Pada MILP 21
2.8.3 Model MILP 22
2.8.4 Implementasi MILP Pada Perancangan Ulang Tata Letak 23
2.9 Simulasi *Discrete-Event* 25
2.10 Promodel 27
2.11 Verifikasi dan Validasi Model 29
2.12 Penelitian Terdahulu 31

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 34
3.1 Objek Penelitian 34
3.2 Deskripsi Sistem 34
3.3 Kerangka Penelitian 37
3.4 Pengumpulan Data 38
3.5 Metode Pengolahan Data 40
3.6 Analisis Hasil 52
3.7 Kesimpulan dan Saran 53

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 54
4.1 Pengumpulan Data 54
4.1.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan 54
4.1.2 Data aliran material 56
4.1.3 Data produksi harian 57
4.1.4 Data frekuensi perpindahan material 58
4.1.5 Data ukuran mesin dan jumlah mesin 59
4.1.6 Data ukuran *material handling* 60
4.1.7 Data *layout* awal lantai produksi 60
4.1.8 Data waktu proses 60
4.1.9 Data biaya operasional produksi 61

4.2 Pengolahan Data 61
4.2.1 Menghitung total jarak perpindahan material tata letak awal 61
4.2.2 Menghitung kebutuhan area setiap departemen 64
4.2.3 Menyusun formulasi matematis menggunakan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* 66
4.2.4 Menghitung total jarak perpindahan material tata letak hasil optimasi 69
4.2.5 Melakukan perbandingan total jarak perpindahan tata letak usulan dengan tata letak awal 70
4.2.6 Membuat simulasi tata letak awal 71
4.2.7 Membuat simulasi tata letak usulan 75
4.2.8 Melakukan uji validasi simulasi tata letak usulan 77
4.2.9 Melakukan analisis feasibilitas 79
4.2.10 Melakukan analisis sensitivitas terhadap model tata letak usulan 81
4.3 Analisis Hasil 89

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 95
5.1 Kesimpulan 95
5.2 Saran 96

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1 Contoh FTC 20
Tabel 4.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan 54
Tabel 4.2 Data aliran material 57
Tabel 4.3 Data produksi harian 57
Tabel 4.4 Data frekuensi perpindahan material 59
Tabel 4.5 Data ukuran mesin dan jumlah mesin 59
Tabel 4.6 Data ukuran *material handling* 60
Tabel 4.7 Data waktu proses 61
Tabel 4.8 FTC perpindahan material tata letak awal 62
Tabel 4.9 FTC jarak antar departemen tata letak awal 63
Tabel 4.10 FTC total jarak perpindahan material tata letak awal 63
Tabel 4.11 Perhitungan kebutuhan area setiap departemen 65
Tabel 4.12 Alternatif bentuk konfigurasi departemen 66
Tabel 4.13 FTC jarak antar departemen tata letak hasil optimasi 70
Tabel 4.14 FTC total jarak perpindahan antar departemen tata letak hasil optimasi 70
Tabel 4.15 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 10% 81
Tabel 4.16 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 20% 82
Tabel 4.17 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 30% 83
Tabel 4.18 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% 83
Tabel 4.19 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan10% 85
Tabel 4.20 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 20% 86
Tabel 4.21 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 30% 87
Tabel 4.22 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% 87
Tabel 4.23 Rangkuman posisi departemen pada analisis sensitivitas 94

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Contoh *Product Layout* 10
Gambar 2.2 Contoh *Process Layout* 11
Gambar 2.3 Contoh *Fixed Layout* 11
Gambar 2.4 Contoh Tata Letak *Group Technology* 12
Gambar 2.5 Pola aliran *straight line* 13
Gambar 2.6 Pola aliran *serpentine* 13
Gambar 2.7 Pola aliran *U-flow* 14
Gambar 2.8 Pola aliran *circular* 14
Gambar 2.9 Pola aliran *odd angle* 15
Gambar 2.10 *Layout* Lantai Produksi Dengan *Allowance* 17
Gambar 2.11 Langkah-langkah model simulasi 26
Gambar 2.12 Relasi verifikasi, validasi dan pembentukan model simulasi 30
Gambar 3.1 Tata letak awal 36
Gambar 3.2 Kerangka Penelitian 37
Gambar 3.3 *Flowchart* pengolahan data 50
Gambar 4.1 Hasil optimasi *python code solver* MILP 69
Gambar 4.2 *Build Location* simulasi tata letak awal 71
Gambar 4.3 *Build Entities* simulasi tata letak awal 72
Gambar 4.4 *Build Path Network* simulasi tata letak awal 72
Gambar 4.5 *Build Resources* simulasi tata letak awal 72
Gambar 4.6 *Build Processing* simulasi tata letak awal 73
Gambar 4.8 Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak awal pada SPSS . 74
Gambar 4.9 *Build Location* simulasi tata letak usulan 75
Gambar 4.10 *Build Entities* simulasi tata letak usulan 75
Gambar 4.11 *Build Path Network* simulasi tata letak usulan 76
Gambar 4.12 *Build Resources* simulasi tata letak usulan 76
Gambar 4.13 *Build Processing* simulasi tata letak usulan 76
Gambar 4.14 *Build Arrival* simulasi tata letak usulan 77

Gambar 4.15 Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak usulan pada SPSS 78
Gambar 4.16 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 10% 82
Gambar 4.17 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 20% 82
Gambar 4.18 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 30% 83
Gambar 4.19 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 40% 84
Gambar 4.20 Grafik analisis sensitivitas peningkatan permintaan 84
Gambar 4.21 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 10% 86
Gambar 4.22 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 20% 86
Gambar 4.23 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 30% 87
Gambar 4.24 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 40% 88
Gambar 4.25 Grafik analisis sensitivitas penurunan permintaan 88
Gambar 4.26 Tata letak usulan 91
Gambar 4.27 Grafik rangkuman analisis sensitivitas 93

DAFTAR NOTASI

f_{ij} : Frekuensi perpindahan dari departemen i ke j

x_i : Titik pusat koordinat sumbu x departemen i

x_j : Titik pusat koordinat sumbu x departemen j

y_i : Titik pusat koordinat sumbu y departemen i

y_j : Titik pusat koordinat sumbu y departemen j

T : Total jarak perpindahan *material handling*

d_{ij} : Jarak perpindahan dari departemen i ke j

n : Jumlah departemen

P_i : Panjang departemen i

L_i : Lebar departemen i

P_p : Panjang pabrik

L_p : Lebar pabrik

$z1_{ij}$: Variabel biner 1

$z2_{ij}$: Variabel biner 2

XF_i : Titik pusat koordinat sumbu x departemen i yang ditempatkan secara *fixed*

YF_i : Titik pusat koordinat sumbu y departemen i yang ditempatkan secara *fixed*

P_{ik} : Panjang konfigurasi bentuk lain departemen i

L_{ik} : Lebar konfigurasi bentuk lain departemen i

Y_{ik} : Variabel biner untuk memilih bentuk konfigurasi bentuk departemen i

K : Himpunan bentuk kofigurasi departemen n

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

LAMPIRAN A DOKUMENTASI STASIUN KERJA

Lampiran LA.1 Gambar lantai produksi LA-1
Lampiran LA.2 Gambar mesin potong LA-1
Lampiran LA.3 Gambar mesin *pond die cutting* LA-1
Lampiran LA.4 Gambar mesin *slotter* LA-1
Lampiran LA.5 Gambar mesin *pond* tumpul LA-2
Lampiran LA.6 Gambar meja Sablon LA-2
Lampiran LA.7 Gambar mesin *stapler* LA-2
Lampiran LA.8 Gambar meja pengeleman LA-2
Lampiran LA.9 Gambar mesin *straping* LA-2

LAMPIRAN B PERHITUNGAN JARAK TATA LETAK AWAL

Lampiran LB.1 Perhitungan jarak MP ke DC LB-2
Lampiran LB.2 Perhitungan jarak MP ke SL LB-2
Lampiran LB.3 Perhitungan jarak DC ke SB LB-2
Lampiran LB.4 Perhitungan jarak DC ke SP LB-2
Lampiran LB.5 Perhitungan jarak SL ke PT LB-3
Lampiran LB.6 Perhitungan jarak PT ke SB LB-3
Lampiran LB.7 Perhitungan jarak PT ke LM LB-3
Lampiran LB.8 Perhitungan jarak SB ke ST LB-3
Lampiran LB.9 Perhitungan jarak SB ke LM LB-4
Lampiran LB.10 Perhitungan jarak SB ke SP LB-4
Lampiran LB.11 Perhitungan jarak ST ke SP LB-4
Lampiran LB.12 Perhitungan jarak LM ke SP LB-4

LAMPIRAN C DATA FREKUENSI ALIRAN MATERIAL DAN PRODUKSI HARIAN

Lampiran LC.1 Data produksi harian LC-1

Lampiran LC.2 FTC frekuensi perpindahan tanggal 01/12/2025 .....LC-6
Lampiran LC.3 FTC frekuensi perpindahan tanggal 02/12/2025 .....LC-6
Lampiran LC.4 FTC frekuensi perpindahan tanggal 03/12/2025 .....LC-7
Lampiran LC.5 FTC frekuensi perpindahan tanggal 04/12/2025 .....LC-7
Lampiran LC.6 FTC frekuensi perpindahan tanggal 05/12/2025 .....LC-7
Lampiran LC.7 FTC frekuensi perpindahan tanggal 06/12/2025 .....LC-8
Lampiran LC.8 FTC frekuensi perpindahan tanggal 08/12/2025 .....LC-8
Lampiran LC.9 FTC frekuensi perpindahan tanggal 09/12/2025 .....LC-8
Lampiran LC.10 FTC frekuensi perpindahan tanggal 10/12/2025 .....LC-9
Lampiran LC.11 FTC frekuensi perpindahan tanggal 11/12/2025 .....LC-9
Lampiran LC.12 FTC frekuensi perpindahan tanggal 12/12/2025 .....LC-9
Lampiran LC.13 FTC frekuensi perpindahan tanggal 13/12/2025 .....LC-10
Lampiran LC.14 FTC frekuensi perpindahan tanggal 15/12/2025 .....LC-10
Lampiran LC.15 FTC frekuensi perpindahan tanggal 16/12/2025 .....LC-10
Lampiran LC.16 FTC frekuensi perpindahan tanggal 17/12/2025 .....LC-11
Lampiran LC.17 FTC frekuensi perpindahan tanggal 18/12/2025 .....LC-11
Lampiran LC.18 FTC frekuensi perpindahan tanggal 19/12/2025 .....LC-11
Lampiran LC.19 FTC frekuensi perpindahan tanggal 20/12/2025 .....LC-12
Lampiran LC.20 FTC frekuensi perpindahan tanggal 22/12/2025 .....LC-12
Lampiran LC.21 FTC frekuensi perpindahan tanggal 23/12/2025 .....LC-12
Lampiran LC.22 FTC frekuensi perpindahan tanggal 24/12/2025 .....LC-13
Lampiran LC.23 FTC frekuensi perpindahan tanggal 25/12/2025 .....LC-13
Lampiran LC.24 FTC frekuensi perpindahan tanggal 26/12/2025 .....LC-13
Lampiran LC.25 FTC frekuensi perpindahan tanggal 27/12/2025 .....LC-14
Lampiran LC.26 FTC frekuensi perpindahan tanggal 29/12/2025 .....LC-14
Lampiran LC.27 FTC frekuensi perpindahan tanggal 30/12/2025 .....LC-14
Lampiran LC.28 FTC frekuensi perpindahan tanggal 31/12/2025 .....LC-15

LAMPIRAN D GAMBAR, PYTHON *CODE*, DAN PERHITUNGAN JARAK TATA LETAK USULAN

Lampiran LD.1 *Template* tata letak usulan LD-1

Lampiran LD.2 *Python code solver* MILP.....LD-2
Lampiran LD.3 Perhitungan jarak MP ke DC.....LD-6
Lampiran LD.4 Perhitungan jarak MP ke SL.....LD-6
Lampiran LD.5 Perhitungan jarak DC ke SB LD-7
Lampiran LD.6 Perhitungan jarak DC ke SP.....LD-7
Lampiran LD.7 Perhitungan jarak SL ke PT.....LD-7
Lampiran LD.8 Perhitungan jarak PT ke SB LD-7
Lampiran LD.9 Perhitungan jarak PT ke LM LD-7
Lampiran LD.10 Perhitungan jarak SB ke ST LD-8
Lampiran LD.11 Perhitungan jarak SB ke LM LD-8
Lampiran LD.12 Perhitungan jarak SB ke SP.....LD-8
Lampiran LD.13 Perhitungan jarak ST ke SP LD-8
Lampiran LD.14 Perhitungan jarak LM ke SP LD-8

LAMPIRAN E *OUTPUT* SIMULASI TATA LETAK AWAL DAN SIMULASI TATA LETAK USULAN

Lampiran LE.1 Hasil *output running* produk *Die Cut Box* simulasi tata letak awal LE-1
Lampiran LE.2 Hasil *output running* produk *Carton Box* simulasi tata letak awal LE-2
Lampiran LE.3 Hasil *output running* produk *Die Cut Box* simulasi tata letak usulan LE-3
Lampiran LE.4 Hasil *output running* produk *Carton Box* simulasi tata letak usulan LE-3

ABSTRAK

Perusahaan manufaktur di industri kemasan karton menghadapi permasalahan tata letak lantai produksi yang kurang efisien, sehingga total jarak perpindahan material mencapai 3.472,633 meter per hari. Kondisi tersebut meningkatkan waktu perpindahan material dan memengaruhi kapasitas produksi harian. Penelitian ini bertujuan merancang ulang tata letak fasilitas untuk meminimalkan jarak perpindahan material dan mengevaluasi pengaruhnya terhadap peningkatan produksi.

Optimasi tata letak dilakukan menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Tata letak hasil optimasi kemudian dimodelkan menggunakan simulasi ProModel untuk mengevaluasi perubahan *output* produksi dan diuji secara statistik dengan *Paired Sample T-Test* pada SPSS. Selain itu, analisis feasibilitas digunakan untuk menghitung waktu pengembalian kerugian akibat relokasi fasilitas. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk menguji ketahanan tata letak terhadap perubahan intensitas aliran material.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa total jarak perpindahan material berhasil diturunkan dari 3.472,633 meter menjadi 1.780,03 meter. Perbaikan tersebut meningkatkan produksi harian *Die Cut Box* dari 1.401,48 pcs menjadi 1.800 pcs dan *Carton Box* dari 2.025,37 pcs menjadi 2.540,74 pcs. Kerugian produksi selama proses relokasi dapat dipulihkan dalam waktu 8,48 hari kerja. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa tata letak tetap mempertahankan bentuk yang sama pada perubahan permintaan yang turun sebesar 40% hingga naik sebesar 40%.

Kata kunci: Tata Letak Fasilitas, *Mixed Integer Linear Programming*, *Material Handling*, Simulasi *Discrete-Event*, Analisis Sensitivitas.

A Mixed Integer Linear Programming Approach for Production Floor Layout Improvement to Minimize Material Handling Distance

ABSTRACT

The production floor layout of a make-to-order carton packaging manufacturing company was not optimally arranged, resulting in a total material handling distance of 3,472.633 meters per day. This condition increases material transportation time and affects daily production capacity. This study aims to redesign the facility layout to minimize material handling distance and evaluate its impact on improving production performance.

The facility layout was optimized using the Mixed Integer Linear Programming (MILP) method. The optimized layout was then simulated in ProModel to evaluate improvements in production output and validated statistically using the Paired Sample T-Test with SPSS. A feasibility analysis was also performed to estimate the payback period for production losses caused by facility relocation, while sensitivity analysis was applied to evaluate the robustness of the proposed layout under varying material flow intensities.

The optimization results showed that the total material handling distance decreased from 3,472.633 m to 1,780.03 m. Consequently, the daily production capacity of Die Cut Box increased from 1,401.48 pcs to 1,800 pcs, while Carton Box production increased from 2,025.37 pcs to 2,540.74 pcs. The production losses incurred during the relocation process could be fully recovered within 8.48 working days. Furthermore, the sensitivity analysis indicated that the proposed layout maintained the same configuration under demand changes ranging from a 40% decrease to a 40% increase.

Keywords: *Facility Layout, Mixed Integer Linear Programming, Material Handling, Discrete-Event Simulation, Sensitivity Analysis.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perancangan tata letak fasilitas merupakan salah satu aspek fundamental dalam operasional perusahaan manufaktur untuk mengatur aliran material, informasi, dan aktivitas kerja agar proses produksi dapat berlangsung secara efisien. Tata letak fasilitas didefinisikan sebagai pengaturan fisik fasilitas produksi, mesin, area kerja, serta area penyimpanan yang dirancang untuk mendukung kelancaran aliran material dari awal hingga akhir proses produksi (Adiasa et al., 2020). Tata letak yang kurang tepat dapat menimbulkan permasalahan aliran material yang tidak teratur, meningkatnya jarak perpindahan, serta terjadinya *material handling* yang berulang dan tidak bernilai tambah. Kondisi tersebut dapat berdampak pada menurunnya efisiensi operasional (Tubagus et al., 2017).

Kegiatan produksi pada perusahaan produsen kemasan karton dilakukan menggunakan sistem *make to order* (MTO) yang menyesuaikan spesifikasi dan jumlah produk dengan permintaan pelanggan. Produk yang dihasilkan terbagi menjadi dua tipe, yaitu *industrial box* untuk konsumen B2B dan *food and beverage box* untuk konsumen B2C. *Industrial box* meliputi OEM *box* dengan spesifikasi sesuai permintaan pelanggan serta *standard pack* yang disesuaikan dengan kebutuhan industri. Sementara *food and beverage box* mencakup berbagai kemasan seperti *food box*, *handle box*, *pizza box*, *brownies box*, *catering premium box*, dan *cup holder.* Proses produksi diawali dengan penerimaan bahan baku berupa lembaran *corrugated board* dari pemasok. Tahap awal proses produksi dimulai pada departemen mesin potong untuk memotong lembaran karton sesuai dengan ukuran dasar produk yang dipesan oleh pelanggan. Setelah proses pemotongan awal selesai, dilakukan proses pemotongan lanjutan sesuai jenis produk yang dihasilkan. Untuk produk *corrugated carton box*, proses selanjutnya adalah pemotongan slot dan pembentukan lipatan awal menggunakan mesin *slotter*, kemudian dilanjutkan dengan proses pembentukan garis lipat menggunakan mesin *pond* tumpul. Setelah itu, produk langsung menuju proses pengeleman untuk merekatkan bagian sisi

kardus sesuai desain jika tahap penyablonan tidak diperlukan. Beberapa klien menginginkan produknya tidak menggunakan sistem lem sehingga pekerja menyatukan bagian sisi kardus melalui proses *stapling* menggunakan mesin *stapler*. Sementara itu, untuk produk *corrugated die cut box*, material dialirkan langsung ke mesin *pond die cutting* tanpa melalui mesin *slotter* lalu dilanjutkan ke mesin *pond* tumpul. Setelah itu, material untuk produk *corrugated die cut box* menuju proses penyablonan apabila produk memerlukan desain. Tahap terakhir adalah proses *strapping*, yaitu pengikatan produk jadi.

Tata letak lantai produksi perusahaan memiliki permasalahan pada jarak *material handling*. Evaluasi tata letak menunjukkan jarak perpindahan material dari mesin potong sejauh 13,85 meter ke mesin *pond die cutting* dengan frekuensi perpindahan 26 kali/hari dan 19,60 meter menuju mesin *slotter* dengan frekuensi perpindahan 37 kali/hari. Akumulasi pergerakan pada dua rute awal ini menghasilkan jarak tempuh *material handling* sebesar 1.085,60 meter per harinya. Jika dibandingkan dengan total jarak perpindahan material sebesar 3.472,63 meter per hari, nilai tersebut menunjukkan bahwa aktivitas perpindahan dari departemen mesin potong memberikan kontribusi hampir sepertiga dari total jarak perpindahan material di pabrik. Jarak tempuh harian tersebut tidak proporsional jika dibandingkan dengan luas total area produksi yang hanya sebesar 684 m^2. Situasi tersebut menjadi semakin tidak optimal akibat penumpukan material yang secara langsung menghambat aliran *material handling*.

Selain itu, permasalahan aliran material juga teridentifikasi pada penempatan mesin *stapler* yang berada di antara meja sablon dan meja pengeleman. Berdasarkan analisis frekuensi, aliran terbesar terjadi langsung dari meja sablon menuju meja pengeleman sebanyak 29 kali per hari, sementara aliran menuju mesin *stapler* hanya 1 kali per hari. Kondisi ini menjadikan mesin *stapler* sebagai penghalang fisik yang memisahkan dua departemen dengan hubungan aliran yang tinggi dan menyebabkan tambahan jarak perpindahan. Kendala lainnya adalah jalur *forklift* berada di antara lintasan *trolley* dan di tengah area produksi. Hal tersebut mengharuskan penempatan departemen lebih berjauhan untuk meminimalkan risiko kecelakaan kerja, sehingga rute perpindahan material menjadi lebih panjang.

Jarak perpindahan material tersebut dapat diminimasi melalui perancangan ulang tata letak dengan memperhatikan sumber daya yang dimiliki oleh perusahaan, seperti jumlah mesin, jenis *material handling* yang digunakan, serta luas area produksi secara keseluruhan. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan tersebut adalah *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), yaitu metode optimasi matematis yang menyusun fungsi tujuan untuk meminimasi jarak perpindahan material dengan memperhatikan berbagai kendala operasional yang mampu memberikan solusi optimal global sehingga memastikan tidak ada solusi yang lebih baik (Pérez-Gosende et al., 2021). MILP mengevaluasi bentuk, posisi, dan koordinat secara bersamaan dalam satu sistem persamaan. MILP tidak menggunakan unsur probabilitas/acak seperti metode metaheuristik, sehingga akan menghasilkan solusi yang sama untuk data dan model yang sama. Hasil tata letak usulan dibuat dalam model simulasi *discrete-event* untuk dilakukan validasi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka masalah yang dapat dirumuskan adalah Bagaimana rancangan tata letak lantai produksi yang optimal untuk meminimasi total jarak *material handling* pada perusahaan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang tata letak produksi agar meminimasi jarak *material handling.*

1.4 Batasan dan Asumsi

1.4.1 Batasan Masalah

Masalah penelitian perlu dibatasi agar terfokus dengan jelas dan tidak meluas. Batasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ukuran *layout* yang digunakan berdasarkan lahan pada perusahaan.
2. Tidak ada penambahan jumlah mesin selama penelitian dilaksanakan.

1.4.2 Asumsi

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin-mesin yang digunakan dalam kondisi baik sehingga tidak memerlukan *maintenance*.
2. Metode pengukuran jarak yang digunakan adalah *Rectilinear distance*
3. Material yang dipindahkan secara manual diberikan *allowance* untuk *material handling* sebesar 1 m.
4. *Material handling* tidak melewati depan mesin, sehingga jalur *material handling* hanya berada di samping kanan dan kiri area mesin.
5. Material yang akan diproses dan yang telah selesai diproses pada suatu stasiun kerja, ditempatkan pada pallet dengan ukuran panjang x lebar sebesar 1,2 m x 1,2 m, kecuali pada stasiun kerja penyablonan yang menggunakan meja dengan ukuran panjang x lebar sebesar 0,6 m x 1 m.
6. Operator mesin bertanggung jawab menjalankan proses produksi dan melakukan aktivitas *material handling*.
7. Implementasi tata letak usulan dilakukan pada 1 *shift* atau selama 8 jam kerja

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah meningkatkan produktivitas proses produksi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disusun untuk memberikan penjelasan mengenai tahapan pelaksanaan penelitian secara terstruktur yang disajikan melalui gambaran umum isi dari setiap bab. Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan uraian awal penelitian yang meliputi latar belakang permasalahan, perumusan masalah, batasan penelitian, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan skripsi.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini memuat kajian teoritis yang dijadikan sebagai dasar dan acuan dalam penelitian, yang diperoleh dari studi literatur berupa buku teks, jurnal ilmiah, serta sumber referensi lain yang relevan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci mengenai metode penelitian yang digunakan, meliputi objek penelitian, teknik pengumpulan data, kerangka penelitian, serta tahapan pengolahan dan analisis data hingga diperoleh hasil dan kesimpulan sementara.

BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini berisi penyajian data hasil penelitian, proses pengolahan data, serta analisis dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh berdasarkan metode yang telah ditetapkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, serta saran yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk perbaikan maupun pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II
LANDASAN TEORI

2.1 Tata Letak Fasilitas

Tata letak fasilitas atau *facility layout* didefinisikan sebagai pengaturan fisik dari mesin, peralatan, area kerja, area penyimpanan, serta fasilitas pendukung lainnya di dalam suatu sistem produksi atau layanan dengan tujuan mendukung kelancaran aliran material, manusia, dan informasi. Tata letak fasilitas berfungsi sebagai representasi fisik dari sistem produksi, karena susunan fasilitas mencerminkan urutan proses, tingkat keterkaitan aktivitas, serta pola aliran material yang terjadi di lantai produksi. Tata letak fasilitas juga berperan sebagai penghubung antara perencanaan proses dan pelaksanaan operasi harian, sehingga kualitas tata letak sangat memengaruhi performa operasional secara keseluruhan (Haleem et al., 2021). Pengaturan fasilitas yang tepat memungkinkan aliran material, informasi, dan tenaga kerja berlangsung secara sistematis, sehingga mendukung pencapaian efisiensi dan efektivitas operasi produksi (Mahmoudi et al., 2021).

Tujuan utama dari perancangan tata letak fasilitas adalah menciptakan sistem produksi yang mampu mengalirkan material dan aktivitas kerja secara efisien dengan meminimalkan pemborosan yang timbul akibat perpindahan yang tidak bernilai tambah. Tata letak fasilitas dirancang untuk mengurangi jarak dan frekuensi *material handling* sehingga waktu proses dan biaya operasional dapat ditekan. Tujuan tata letak fasilitas mencakup penciptaan aliran proses yang berurutan sesuai dengan tahapan produksi, sehingga dapat menghindari pergerakan yang berpotensi mengganggu kelancaran operasi (Moslemipour et al., 2021). Tata letak fasilitas juga bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang lantai produksi dengan memperhatikan kebutuhan area setiap departemen dan hubungan kedekatan antar aktivitas, sehingga ruang yang tersedia dapat dimanfaatkan secara maksimal dan fleksibel terhadap perubahan kebutuhan produksi. Tujuan lain dari tata letak fasilitas adalah meningkatkan keselamatan dan ergonomi kerja melalui pengaturan area kerja yang aman, mudah diakses, dan sesuai dengan kemampuan

fisik operator, sehingga mendukung keberlanjutan sistem produksi dalam jangka panjang.

Permasalahan pada tata letak fasilitas muncul ketika fasilitas tidak selaras dengan kebutuhan aliran proses dan karakteristik sistem produksi. Tata letak yang tidak terencana dengan baik dapat menyebabkan aliran material yang tidak teratur, peningkatan jarak perpindahan, serta terjadinya *backtracking* yang memperpanjang waktu proses dan meningkatkan beban *material handling*. Kondisi tersebut berdampak langsung pada peningkatan biaya operasional dan penurunan efisiensi sistem produksi (Singh et al., 2021). Masalah tata letak fasilitas juga berkaitan dengan kurangnya perhatian terhadap hubungan kedekatan antar aktivitas, sehingga fasilitas yang memiliki intensitas interaksi tinggi ditempatkan berjauhan dan menimbulkan lintasan perpindahan yang tidak efisien. Selain itu, tata letak yang kaku dan tidak fleksibel dapat menjadi kendala ketika perusahaan menghadapi perubahan permintaan, variasi produk, atau pengembangan kapasitas, karena memerlukan biaya dan waktu yang besar untuk dilakukan penyesuaian ulang.

2.2 Implementasi Tata Letak Usulan

Penerapan tata letak usulan akan menghasilkan biaya akibat proses relokasi fasilitas yang dapat mengganggu kegiatan operasional perusahaan. Biaya relokasi merupakan biaya yang timbul selama proses pemindahan mesin, peralatan, dan tenaga kerja dari tata letak awal menuju tata letak usulan. Perhitungan biaya ini bertujuan untuk mengestimasi investasi implementasi. Biaya relokasi meliputi biaya mesin atau alat, biaya tenaga kerja, serta biaya transportasi atau sewa peralatan yang digunakan selama proses pemindahan (Ostowska & Stryhunivska, 2025). Pada kondisi relokasi yang dilakukan selama satu shift (8 jam), biaya mesin dihitung berdasarkan upah pengawas produksi per jam (W_{spv}) dan biaya operasional forklift per jam (B_{fl}), yang masing-masing dikalikan dengan durasi relokasi selama delapan jam. Biaya mesin dapat dirumuskan sebagai berikut (Ostowska & Stryhunivska, 2025).

$$C_{mesin} = (W_{spv} \times 8) + (B_{fl} \times 8) \quad \text{.....(2.1)}$$

Sementara itu, biaya tenaga kerja dihitung berdasarkan upah operator per jam (W_{opr}), lama waktu relokasi selama delapan jam, dan jumlah operator yang terlibat (n). Biaya tenaga kerja dapat dirumuskan sebagai berikut (Ostowska & Stryhunivska, 2025).

$$C_{manual} = (W_{opr} \times 8 \times n) \quad \text{.....(2.2)}$$

Total biaya relokasi dapat dirumuskan sebagai berikut (Ostowska & Stryhunivska, 2025).

$$C_{total} = C_{mesin} + C_{manual} \quad \text{.....(2.3)}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya biaya implementasi dipengaruhi oleh sumber daya yang digunakan selama proses relokasi. Semakin banyak fasilitas dan tenaga kerja yang terlibat, semakin besar biaya yang harus dikeluarkan. Oleh karena itu, estimasi biaya relokasi menjadi salah satu pertimbangan dalam mengevaluasi kelayakan implementasi tata letak usulan.

Defisit volume produksi (D_{vol}) merupakan jumlah produk yang tidak dapat diproduksi akibat penghentian sementara aktivitas produksi selama relokasi. Apabila produksi dihentikan selama satu *shift*, kehilangan produksi sama dengan rata-rata *output* per *shift*. Kondisi ini sejalan dengan konsep *production loss* akibat *downtime*, yaitu hilangnya kapasitas produksi selama fasilitas tidak beroperasi. Defisit volume produksi dapat dirumuskan sebagai berikut (Mykhei et al., 2026).

$$D_{vol} = P_{shift} \quad \text{.....(2.4)}$$

Notasi (P_{shift}) merupakan jumlah rata-rata unit yang dihasilkan per shift kerja. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kehilangan produksi bergantung pada kapasitas produksi normal perusahaan. Semakin tinggi *output* per *shift*, semakin besar defisit produksi yang terjadi selama relokasi sehingga menjadi dasar dalam menentukan waktu pemulihan kapasitas produksi setelah implementasi tata letak.

Efisiensi waktu *material handling* menggambarkan penghematan waktu operasional akibat berkurangnya jarak perpindahan material pada tata letak usulan. Pengurangan jarak perpindahan akan menurunkan waktu transportasi antarstasiun kerja sehingga aliran produksi menjadi lebih efisien. Efisiensi waktu *material handling* dapat dirumuskan sebagai berikut (Mykhei et al., 2026).

$$\Delta t = (T_{awal} - T_{usulan})/v \quad \text{.....(2.5)}$$

Persamaan tersebut mengonversi pengurangan jarak perpindahan material menjadi penghematan waktu berdasarkan kecepatan perpindahan material (v). emakin besar pengurangan jarak, semakin besar penghematan waktu operasional sehingga aktivitas yang tidak memberikan nilai tambah (*non-value added activity*) dapat diminimalkan.

Surplus produksi harian merupakan tambahan kapasitas produksi yang diperoleh dari pemanfaatan waktu hasil penghematan setelah implementasi tata letak usulan. Waktu yang sebelumnya digunakan untuk perpindahan material dialokasikan untuk proses produksi sehingga meningkatkan output harian perusahaan. Surplus produksi harian dapat dirumuskan sebagai berikut (Mykhei et al., 2026).

$$S_{vol} = \Delta t / CT \quad \text{.....(2.6)}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa surplus produksi dipengaruhi oleh waktu yang dihemat dan *cycle time*. Semakin kecil nilai *cycle time*, semakin besar tambahan produk yang dapat dihasilkan sehingga kapasitas produksi meningkat.

Titik impas produksi (*payback period*) digunakan untuk menentukan waktu yang diperlukan hingga tambahan produksi setelah implementasi mampu menutupi kehilangan produksi selama proses relokasi. Indikator ini digunakan untuk mengevaluasi efektivitas implementasi tata letak usulan dalam memulihkan kapasitas produksi perusahaan. Titik impas produksi (*payback period*) dapat dirumuskan sebagai berikut (Mykhei et al., 2026).

$$PP_{vol} = D_{vol} / S_{vol} \quad \text{.....(2.7)}$$

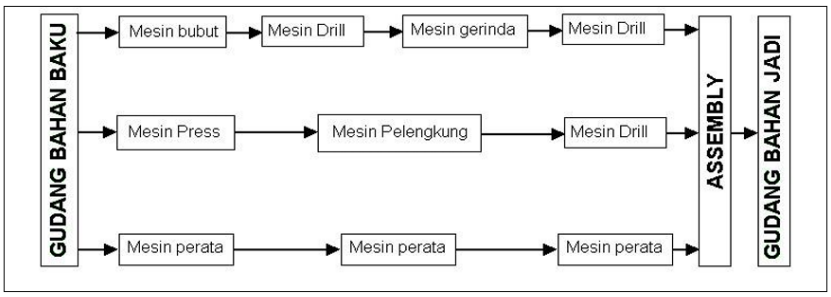
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa waktu pemulihan produksi ditentukan oleh perbandingan antara kehilangan produksi selama relokasi dan tambahan produksi harian setelah implementasi. Semakin kecil nilai *payback period*, semakin cepat manfaat tata letak usulan dapat diperoleh.

2.3 Jenis-Jenis Tata Letak

Jenis tata letak fasilitas harus menyesuaikan kebutuhan perusahaan agar produktivitas perusahaan lebih optimal. Jenis-jenis tata letak antara lain sebagai berikut.

1. *Product Layout*

   Tata letak berorientasi produk (*product layout*) merupakan pengaturan fasilitas produksi yang dirancang untuk mencapai efisiensi maksimum dalam produksi yang berlangsung secara kontinu atau berulang. Dalam sistem ini, mesin, peralatan, dan tenaga kerja ditempatkan dalam urutan yang mengikuti tahapan produksi dari bahan mentah hingga produk akhir. Tata letak ini sering digunakan dalam industri manufaktur dengan volume produksi tinggi, di mana aliran material berlangsung secara otomatis atau semi-otomatis tanpa banyak hambatan. Gambar contoh *product layout* dapat dilihat pada Gambar 2.1.

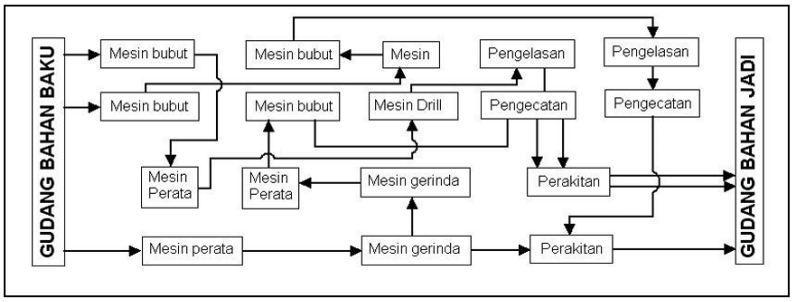


Gambar 2.1 Contoh *Product Layout*
Sumber: Ruhyat (2023)

2. *Process Layout*

   Tata letak berorientasi proses (*process layout*) digunakan dalam lingkungan produksi dengan volume rendah tetapi memiliki variasi produk yang tinggi. Dalam tata letak ini, fasilitas produksi dikelompokkan berdasarkan fungsi atau jenis proses yang dilakukan, bukan berdasarkan urutan aliran produk. Misalnya, dalam industri manufaktur yang memproduksi berbagai jenis suku cadang atau bengkel mesin yang menangani berbagai jenis pesanan pelanggan, peralatan seperti mesin bubut, mesin frais, dan mesin bor dikelompokkan dalam area kerja tersendiri. Tata letak ini sangat cocok untuk produksi yang bersifat fleksibel, seperti industri pesanan khusus (*job shop*), di mana setiap produk yang dibuat mungkin memiliki jalur produksi yang berbeda tergantung pada spesifikasi yang diminta. Aliran material dalam tata letak ini sering kali bersifat tidak teratur karena produk harus

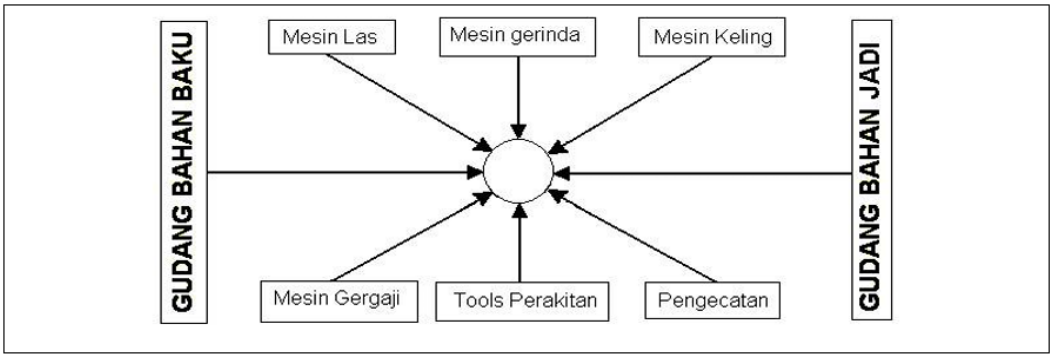
berpindah dari satu departemen ke departemen lain sesuai kebutuhan prosesnya. Gambar contoh *process layout* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Contoh *Process Layout*
Sumber: Ruhyat (2023)

3. *Fixed Layout*

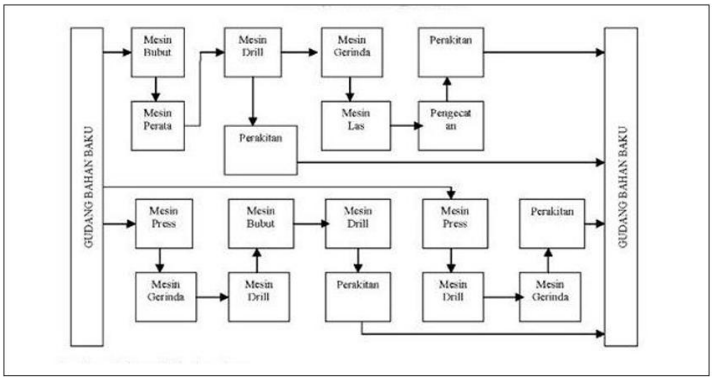
Tata letak posisi tetap dirancang untuk memenuhi kebutuhan proyek besar di mana produk atau objek kerja tetap berada di satu lokasi, sementara tenaga kerja, mesin, peralatan, dan bahan baku yang bergerak ke lokasi tersebut. Jenis tata letak ini umum digunakan dalam proyek konstruksi seperti pembangunan gedung, jembatan, pembuatan kapal, serta produksi pesawat terbang dan mesin besar lainnya. Karena ukuran produk yang dihasilkan terlalu besar atau berat untuk dipindahkan, maka seluruh aktivitas produksi harus berlangsung di sekitar lokasi tersebut. Gambar contoh *fixed layout* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Contoh *Fixed Layout*
Sumber: Ruhyat (2023)

4. *Group Technology*

Tata letak *group technology* adalah metode pengaturan fasilitas produksi yang mengelompokkan mesin, peralatan, dan tenaga kerja berdasarkan kesamaan karakteristik produk atau proses manufaktur yang dilakukan. hal ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi produksi dengan mengurangi perpindahan material, waktu tunggu, serta mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya. Dalam tata letak *group technology*, produk yang memiliki kesamaan desain atau proses diproduksi dalam sel manufaktur yang disebut *cellular layout*, di mana setiap sel berfungsi sebagai unit produksi yang relatif mandiri. Gambar contoh tata letak *group technology* dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Contoh Tata Letak *Group Technology*
Sumber: Ruhyat (2023)

2.4 Pola Aliran Material

Berikut adalah jenis-jenis pola aliran material yang di antaranya adalah sebagai berikut.

1. *Straight Line*

Pola *straight line* (*I-flow*) merupakan aliran material yang bergerak dalam satu garis lurus dari awal hingga akhir proses produksi dengan mengikuti urutan operasi. Pola ini digunakan ketika proses produksi bersifat linier dan tidak kompleks, serta ketika luas area produksi memadai untuk pengaturan linier panjang. Karena material bergerak lurus, total jarak perpindahan material dapat diminimalkan, dan *work in*

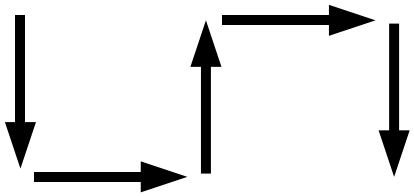
process dapat berpindah secara efisien dari satu stasiun kerja ke stasiun berikutnya tanpa perubahan arah yang signifikan (Wignjosoebroto, 2009). Gambar aliran *straight line* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pola aliran *straight line*
Sumber: Wignjosoebroto (2009)

2. *Serpentine* atau *Zig-Zag* (*S-Shape*)

   Pola *serpentine* atau *zig-zag* (*S-shape*) adalah variasi aliran garis lurus yang dibentuk secara patah-patah agar panjang lintasan dapat menyesuaikan dengan bentuk atau batasan area pabrik. Pola ini dijumpai ketika luas area produksi terbatas tetapi jumlah tahapan proses panjang. Jalur yang dibuat zig-zag tersebut membuat pabrik dapat mempertahankan urutan proses secara kontinu meskipun ruang yang tersedia tidak memungkinkan pola lurus panjang (Wignjosoebroto, 2009). Gambar pola aliran *serpentine* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

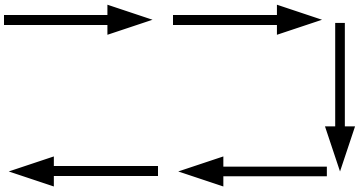


Gambar 2.6 Pola aliran *serpentine*
Sumber: Wignjosoebroto, 2009

3. *U-Flow*

   Pola *U-flow* menciptakan jalur aliran material yang berbentuk menyerupai huruf "U". Aliran material pada posisi awal dan akhir produksi berada pada sisi yang sama, sehingga memudahkan penanganan material, pengawasan jalur proses, serta aliran keluar-masuk material. Pola *U-flow* sering digunakan pada lini produksi sel atau lini produksi dengan urutan operasi yang saling berkaitan dan

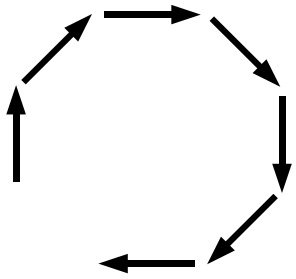
memerlukan koordinasi pekerja yang intensif (Wignjosoebroto, 2009). Gambar pola aliran *U-flow* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pola aliran *U-flow*
Sumber: Wignjosoebroto (2009)

4. *Circular* (*O-Flow*)

   Pola *circular* (*O-flow*) menggambarkan aliran yang membentuk lingkaran tertutup. Pola ini biasanya dipilih ketika aliran produksi memerlukan jalur yang kembali ke titik awal tertentu atau ketika area produksi memiliki bentuk melingkar. Karena aliran material dalam sistem tertutup, maka dapat mengurangi *cross-traffic* antarstasiun kerja dan memberikan jalur yang kontinu tanpa persimpangan silang yang kompleks (Wignjosoebroto, 2009). Gambar pola aliran *circular* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

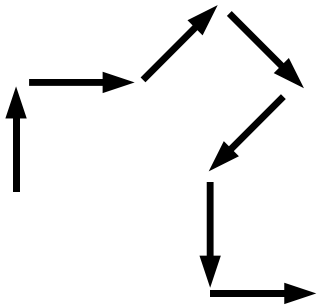


Gambar 2.8 Pola aliran *circular*
Sumber: Wignjosoebroto (2009)

5. *Odd Angle*

   Pola *odd angle* merupakan pola aliran yang tidak memiliki bentuk geometris yang khas seperti garis lurus, *U*, atau lingkaran. Pola ini biasanya diterapkan ketika bentuk area produksi tidak beraturan atau memiliki batasan ruang yang unik, sehingga aliran terpaksa menyesuaikan dengan bentuk area tersebut. Pola *odd angle* dapat

disesuaikan dengan kondisi ruang yang tidak memungkinkan pola biasa lainnya, tetapi memerlukan perancangan yang lebih hati-hati agar tetap menjaga urutan proses produksi (Wignjosoebroto, 2009). Gambar pola aliran *odd angle* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pola aliran *odd angle*
Sumber: Wignjosoebroto (2009)

2.5 Metode Pengukuran Jarak

Pengukuran jarak antar stasiun kerja menjadi aspek penting karena berpengaruh langsung terhadap perhitungan aliran material. Berikut adalah metode-metode pengukuran jarak yang biasa digunakan dalam perancangan tata letak fasilitas.

1. *Euclidean*

   Metode pengukuran jarak *Euclidean* merupakan pendekatan kuantitatif yang menghitung jarak linier langsung antara dua titik lokasi fasilitas berdasarkan koordinat pada bidang dua dimensi. Metode *Euclidean* dapat diterapkan pada model perancangan yang mempertimbangkan aliran material secara langsung dari satu titik ke titik lain tanpa memperhatikan batasan jalur fisik nyata yang mungkin ada (Pratiwi et al., 2012). Secara matematis, *Euclidean distance* dinyatakan dengan persamaan berikut.

   $$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad \text{.....(2.8)}$$

   dimana x_i, x_jdan y_i, y_jmasing-masing adalah koordinat fasilitas i dan fasilitas j, serta d_{ij}adalah jarak linier antara kedua fasilitas tersebut.

2. *Square Euclidean*

   Metode pengukuran jarak *Square Euclidean* merupakan variasi dari metode *Euclidean* dengan karakteristik utama yaitu pengkuadratan jarak linier antara dua lokasi fasilitas tanpa mengambil akar kuadrat dari jumlah kuadrat perbedaan koordinat. *Square Euclidean* digunakan sebagai fungsi objektif alternatif untuk meminimalkan dampak perpindahan material jarak jauh yang bersifat tidak bernilai tambah dan berpotensi meningkatkan biaya operasional (Singh et al., 2021). Secara matematis, metode ini dirumuskan sebagai berikut:

   $$d_{ij}^2 = \left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 \quad (2.9)$$

   dengan x_i, y_idan x_j, y_jmasing-masing menunjukkan koordinat lokasi fasilitas ke-i dan fasilitas ke-j. Metode ini memberi bobot yang lebih besar terhadap jarak yang lebih panjang, sehingga perbedaan posisi fasilitas yang lebih jauh antara satu sama lain akan menghasilkan kontribusi jarak yang lebih besar pada perhitungan total.

3. *Rectilinear*

   Metode pengukuran jarak *Rectilinear* merupakan pendekatan penghitungan jarak antar fasilitas yang didasarkan pada lintasan pergerakan horizontal dan vertikal, sehingga jarak dihitung sebagai jumlah selisih absolut koordinat pada sumbu x dan sumbu y. Persamaan jarak *Rectilinear* dapat dirumuskan sebagai berikut.

   $$d_{ij} = \left|x_i - x_j\right| + \left|y_i - y_j\right| \quad (2.10)$$

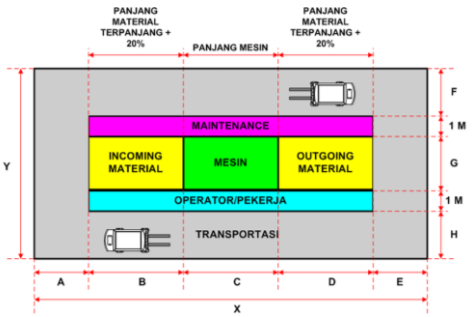
   di mana x_i, y_idan x_j, y_jmenunjukkan koordinat lokasi fasilitas ke-i dan ke-j. Metode ini merepresentasikan pola pergerakan material yang harus mengikuti jalur tegak lurus, seperti lorong produksi, *aisle*, atau jalur transportasi internal yang tidak memungkinkan perpindahan secara diagonal.

2.6 Perhitungan Luas Area Produksi

Lantai produksi merupakan area dalam suatu fasilitas manufaktur di mana berbagai aktivitas produksi berlangsung, mulai dari pengolahan bahan baku hingga menjadi produk jadi (Diniaty, 2016). Pada lantai produksi, terdapat berbagai elemen penting seperti mesin, tenaga kerja, bahan baku, dan aliran informasi yang saling berinteraksi untuk mencapai efisiensi dan efektivitas proses. Perencanaan dan pengelolaan lantai produksi bertujuan untuk memaksimalkan *output*, mengurangi pemborosan, dan memastikan kualitas produk sesuai standar. Menurut konsep *lean manufacturing*, pengaturan yang baik pada lantai produksi juga berperan dalam meningkatkan nilai tambah dan mengurangi aktivitas non-produktif seperti penumpukan barang atau pergerakan yang tidak perlu.

Selain itu, tata letak lantai produksi sangat memengaruhi kinerja dan kelancaran proses manufaktur. Pemilihan tata letak yang tepat, seperti tata letak produk, proses, atau seluler, didasarkan pada jenis produk dan volume produksi. Teori perencanaan fasilitas menekankan pentingnya aspek ergonomi, keamanan, dan kelancaran aliran material dalam desain lantai produksi. Apabila pengelolaan lantai produksi dilakukan dengan baik, dapat menciptakan lingkungan kerja yang optimal, mengurangi biaya osperasional, dan meningkatkan daya saing perusahaan di pasar (Pradana, 2018).

Luas lantai produksi yang ideal harus mempertimbangkan *allowance* yang diberikan agar penempatan mesin tidak menganggu akses *material handling*. *Allowance* tersebut diperlukan untuk operator, *maintenance*, *incoming material*, *outcoming material*, serta transportasi. Gambar *layout* lantai produksi dengan *allowance* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Layout* Lantai Produksi Dengan *Allowance*
Sumber: Sugiyono (2018)

Berikut merupakan keterangan pada Gambar 2.10:

A, E, F, H : Jalur *Material Handling*

B : Panjang Material Terpanjang

C : Panjang Mesin

D : Panjang Material Terpanjang

G : Lebar material/mesin

X : Panjang ruangan

Y : Lebar ruangan

Perhitungan luas lantai produksi serta penentuan *allowance* dibagi menjadi beberapa bagian yang akan dijelaskan lebih lanjut dibawah sebagai berikut:

1. *Allowance* operator

Allowance operator berfungsi sebagai area pergerakan operator selama proses permesinan. Lebar *allowance* ditentukan sebesar 1 m, sedangkan panjangnya dirumuskan:

$$\text{Panjang} = B + C + D \quad \text{..... (2.11)}$$

2. *Allowance* material

Allowance material dibagi menjadi *allowance* untuk *material incoming* dan *allowance* untuk *material outgoing*. Panjang *allowance* material ditentukan berdasarkan panjang maksimum dari komponen yang masuk dari sebuah mesin, sedangkan lebarnya (G) disesuaikan. Jika lebar maksimal material lebih kecil dari lebar mesin maka nilai G sama dengan lebar mesin, jika lebar maksimal material lebih besar dari lebar mesin maka nilai G sama dengan lebar maksimal material.

3. *Allowance* jalur *material handling* (transportasi)

Allowance jalur *material handling* ditetapkan sebesar 20% dari panjang material terpanjang yang dipindahkan. Jika panjang material terpanjang lebih kecil (<) dari panjang *material handling* maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A = \text{Panjang material terpanjang} + 20\% \quad \text{..... (2.12)}$$

$$A = E = F = H$$

4. *Allowance maintenance*

Allowance ini diberikan untuk area perawatan mesin/stasiun kerja. Perhitungannya sama dengan *allowance* orang. Lebarnya ditentukan sebesar 1 m didapatkan dari lebar bahu rata – rata pekerja, sedangkan panjangnya dirumuskan:

$$\text{Panjang} = \text{B} + \text{C} + \text{D} \quad \text{(2.13)}$$

5. Luas satuan mesin

   Luas satuan mesin dirumuskan:

   $$\text{Luas satuan mesin} = \text{Luas Mesin} + \text{Luas } \textit{Material incoming} + \text{Luas } \textit{Material outgoing} + \text{Luas } \textit{Allowance Maintenance} + \text{Luas } \textit{Allowance Operator} \quad \text{(2.14)}$$

6. Luas ruangan

   Luas ruangan dapat dirumuskan:

   $$\text{Luas ruangan} = \text{X} \times \text{Y} \quad \text{(2.15)}$$

   Dimana,

   X = A + B + C + D + E

   Y = F + 1 + G + 1 + H

7. Total luas ruangan

   Untuk menentukan luas ruangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

   $$\text{Total luas ruangan} = \text{Jumlah Mesin} \times \text{Luas Ruangan} \quad \text{(2.16)}$$

2.7 *From To Chart*

From-To Chart (FTC) merupakan alat kuantitatif yang digunakan untuk memetakan dan mengukur perpindahan material antar stasiun kerja di dalam fasilitas produksi dengan tujuan menentukan beban perpindahan sehingga dapat dibandingkan antar alternatif tata letak (Barbara & Cahyana, 2021). Proses pembuatan FTC dimulai dengan identifikasi semua elemen atau stasiun kerja yang relevan, pencatatan frekuensi perpindahan material antara setiap pasangan stasiun kerja untuk periode pengamatan tertentu dan penyusunan matriks frekuensi, lalu dilanjutkan dengan penghitungan jarak antarstasiun berdasarkan koordinat blok atau posisi aktual sehingga terbentuk *from-to distance matrix* yang merepresentasikan jarak fisik yang ditempuh material (Alghushan et al., 2022). Total beban perpindahan material atau momen perpindahan dihitung dengan

mengalikan frekuensi perpindahan f_{ij} dengan jarak antarstasiun d_{ij} untuk seluruh pasangan i, j sehingga diperoleh nilai dengan persamaan berikut

$$T = \sum_i \sum_j f_{ij} d_{ij} \quad (2.17)$$

dimana T adalah total jarak atau biaya relatif yang menjelaskan yang menjadi ukuran kunci efisiensi aliran material pada suatu tata letak (Rahayu et al., 2024). Contoh FTC dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Contoh FTC

F\T	i			j	Total
i					
j					
Total					

Sumber: Purnomo (2004)

Adapun manfaat atau kegunaan FTC dalam perancangan tata letak fasilitas adalah sebagai berikut (Heragu, 2016).

1. Mengidentifikasi pola dan intensitas aliran material antar stasiun kerja.
2. FTC berfungsi sebagai dasar perhitungan total jarak perpindahan material yang terjadi pada tata letak eksisting maupun tata letak usulan.
3. FTC dapat digunakan sebagai alat pembanding antara kondisi tata letak awal dan tata letak usulan, karena nilai total jarak yang dihasilkan dari masing-masing *layout* dapat dibandingkan secara langsung.
4. Membantu dalam mengidentifikasi pemborosan akibat perpindahan material yang tidak efisien, seperti lintasan yang terlalu panjang atau terjadinya *backtracking*, sehingga dapat menjadi dasar evaluasi kelemahan tata letak eksisting.

2.8 *Mixed Integer Linear Programming* (MILP)

2.8.1 Pengertian MILP

Mixed Integer Linear Programming (MILP) adalah teknik pemrograman matematis yang memformulasikan masalah pengambilan keputusan sebagai fungsi objektif linear yang harus diminimalkan atau dimaksimalkan dengan serangkaian kendala linear. Formulasi tersebut memiliki variabel keputusan dibatasi untuk

bernilai bilangan bulat (seringkali biner) sementara variabel lainnya boleh bernilai kontinu. MILP menggabungkan kekuatan *linear programming* untuk menyelesaikan permasalan pengambilan keputusan diskrit seperti penugasan, pemilihan lokasi, atau pemenuhan konfigurasi (Nemhauser & Wolsey, 1988).

Keunggulan utama MILP adalah kemampuannya secara eksplisit memodelkan keputusan diskrit (misalnya penempatan fasilitas ya/tidak), sekaligus mengintegrasikan kendala linier dan fungsi objektif kuantitatif dalam satu kerangka persamaan linear. Sifat linear pada model tersebut memungkinkan relaksasi *linear programming* untuk memperoleh batas bawah (*lower bound*) dan batas atas (*upper bound*) solusi. Dengan demikian, *solver* MILP dapat membuktikan optimalitas solusi atau menghitung *optimality gap*.

2.8.2 Unsur-Unsur Pada MILP

MILP tersusun dari unsur-unsur sebagai berikut:

1. Variabel keputusan

   Variabel keputusan adalah besaran yang akan ditentukan oleh model optimisasi untuk mencapai tujuan yang ditetapkan. Nilai optimal variabel keputusan inilah yang dicari untuk memaksimalkan atau meminimalkan fungsi objektif di bawah sekumpulan kendala. Penentuan nama, arti, dan satuan variabel harus jelas agar hasil solusi dapat diinterpretasikan langsung (Clautiaux & Ljubić, 2025).

2. Parameter

   Parameter adalah konstanta *input* yang diberikan ke model dan tidak diubah selama proses optimisasi. Kualitas dan ketepatan parameter memengaruhi validitas solusi sehingga proses pengumpulan data, verifikasi, dan dokumentasi sumber parameter menjadi bagian penting dari pembangunan model MILP (Louati et al., 2021).

3. Fungsi objektif

   Fungsi objektif adalah fungsi linear yang menunjukkan tujuan optimisasi, berupa kombinasi linear variabel keputusan dan parameter. Fungsi ini mengkuantifikasi kriteria yang ingin dioptimalkan, seperti memaksimalkan keuntungan atau meminimalkan biaya. Fungsi objektif menentukan arah

optimisasi (maksimum atau minimum) dan merupakan kombinasi linier variabel keputusan yang akan dicari nilainya.

4. Kendala

   Kendala (*constraints*) adalah persyaratan dalam bentuk persamaan atau pertidaksamaan linear yang membatasi nilai variabel keputusan. Kendala menggambarkan batasan fisik, ekonomi, atau teknis masalah, seperti kapasitas produksi, permintaan pasar, atau ketersediaan sumber daya.

2.8.3 Model MILP

Formulasi matematis MILP dinyatakan dalam bentuk fungsi tujuan linear yang dioptimalkan dengan sejumlah kendala linear. Sebagian variabel dibatasi sebagai bilangan bulat atau biner untuk merepresentasikan keputusan ya atau tidak (Nemhauser & Wolsey, 1988). Fungsi tujuan dalam model MILP dinyatakan sebagai proses minimisasi atau maksimisasi terhadap fungsi linear dari variabel keputusan.

Bentuk umum model MILP dapat dituliskan sebagai berikut:

Minimasi $Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$ .....(2.18)

dengan kendala:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \leq b_i \text{untuk } i = 1,2,\dots,m$$

$$x_j \geq 0 \text{untuk semua } j$$

$$x_j \in \mathbb{Z} \text{untuk } j \in J$$

$$x_j \in \mathbb{R} \text{untuk } j \notin J$$

di mana Z merupakan nilai fungsi tujuan yang akan dioptimalkan, c_j adalah koefisien keuntungan yang terkait dengan variabel keputusan ke-j, dan x_j merupakan variabel keputusan yang dapat berupa bilangan kontinu maupun bilangan bulat. Sementara a_{ij} adalah koefisien kendala, dan b_i adalah batasan sumber daya.

2.8.4 Implementasi MILP Pada Perancangan Ulang Tata Letak

Formulasi MILP dalam perancangan tata letak fasilitas merepresentasikan permasalahan untuk menentukan koordinat penempatan stasiun kerja paling optimal. Pendekatan ini memformulasikan lantai produksi sebagai ruang geometris dua dimensi. Pemodelan matematis tata letak menggunakan variabel keputusan kontinu untuk mendefinisikan titik koordinat pusat departemen (X_i, Y_i) dan variabel biner untuk mengatur orientasi fisik serta posisi relatif antarfasilitas.

Formulasi matematis MILP untuk tata letak fasilitas mensyaratkan representasi jarak antarfasilitas yang dapat dieksekusi secara efisien oleh algoritma komputasi linear. Kalkulasi selisih koordinat aktual antara pusat fasilitas i dan j pada kuadran dua dimensi sering kali menghasilkan nilai negatif yang secara matematis membutuhkan fungsi nilai mutlak (Retnowati & Fudhla, 2017). Fungsi nilai mutlak merupakan persamaan matematis *non-linear*. Algoritma pencarian eksak untuk programa linear, seperti algoritma simpleks, tidak memiliki kapabilitas komputasional untuk memproses atau meminimasi fungsi objektif yang mengandung elemen non-linearitas. Pada model *linear programming*, seluruh persamaan yang digunakan harus berbentuk linear sehingga operasi nilai mutlak tidak dapat digunakan secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan proses transformasi matematis (*linearization*) untuk mengubah bentuk non-linear menjadi persamaan linear. Salah satu prinsip dalam aljabar linear menyatakan bahwa setiap bilangan riil dapat dinyatakan sebagai selisih dari dua variabel yang bernilai tidak negatif. Berdasarkan prinsip tersebut, selisih jarak dipecah menjadi variabel deviasi positif $\left(X_{ij}^{+}, Y_{ij}^{+}\right)$ dan deviasi negatif $\left(X_{ij}^{-}, Y_{ij}^{-}\right)$ (Retnowati & Fudhla, 2017). Formulasi hubungan koordinat antarstasiun kerja dinyatakan melalui persamaan berikut (Retnowati & Fudhla, 2017).

$$X_i - X_j = X_{ij}^{+} - X_{ij}^{-} \quad \forall i < j \qquad \text{.....(2.19)}$$

$$Y_i - Y_j = Y_{ij}^{+} - Y_{ij}^{-} \quad \forall i < j \qquad \text{.....(2.20)}$$

Linierisasi jarak dilakukan dengan mendefinisikan variabel keputusan baru yang dapat merepresentasikan pergeseran posisi antar fasilitas pada sumbu koordinat tanpa menggunakan tanda mutlak. Persamaan non-linier dari selisih koordinat pusat antara fasilitas i dan j dijabarkan menjadi dua komponen variabel positif, yakni

komponen simpangan arah kanan/atas $(+)$ dan komponen simpangan arah kiri/bawah $(-)$. Definisi variabel variabel dekomposisi pada sumbu horisontal (X) dijabarkan melalui persamaan berikut (Retnowati & Fudhla, 2017).

$$X_{ij}^{+} = \begin{cases} (X_i - X_j) & \text{jika } (X_i - X_j) > 0 \\ 0 & \text{jika } (X_i - X_j) \leq 0 \end{cases} \quad \text{.....(2.21)}$$

$$X_{ij}^{-} = \begin{cases} -(X_i - X_j) & \text{jika } (X_i - X_j) < 0 \\ 0 & \text{jika } (X_i - X_j) \geq 0 \end{cases} \quad \text{.....(2.22)}$$

Persamaan serupa juga diterapkan pada komponen sumbu vertikal (Y) untuk memecah arah simpangannya:

$$Y_{ij}^{+} = \begin{cases} (Y_i - Y_j) & \text{jika } (Y_i - Y_j) > 0 \\ 0 & \text{jika } (Y_i - Y_j) \leq 0 \end{cases} \quad \text{.....(2.23)}$$

$$Y_{ij}^{-} = \begin{cases} -(Y_i - Y_j) & \text{jika } (Y_i - Y_j) < 0 \\ 0 & \text{jika } (Y_i - Y_j) \geq 0 \end{cases} \quad \text{.....(2.24)}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa selisih koordinat pada masing-masing sumbu dipecah menjadi dua variabel deviasi yang mewakili arah positif dan arah negatif. Salah satu variabel akan bernilai positif sesuai dengan arah selisih koordinat, sedangkan variabel lainnya bernilai nol. Oleh karena itu, penjumlahan kedua variabel deviasi menghasilkan nilai jarak absolut pada sumbu horizontal dan sumbu vertikal dalam bentuk yang tetap memenuhi sifat linear yang matematis dapat diformulasikan sebagai berikut (Retnowati & Fudhla, 2017).

$$d_{ij}^{x} = X_{ij}^{+} + X_{ij}^{-} \quad \text{.....(2.25)}$$

$$d_{ij}^{y} = Y_{ij}^{+} + Y_{ij}^{-} \quad \text{.....(2.26)}$$

Kemapuan model MILP dalam memecahkan masalah tata letak sangat bergantung pada penyusunan fungsi kendala (*constraints*) yang ketat. Kendala operasional paling krusial adalah pencegahan tumpang tindih (*non-overlapping constraints*) antarstasiun kerja atau mesin (Retnowati & Fudhla, 2017). Kondisi ini dimodelkan menggunakan logika *Big M* dengan melibatkan variabel biner p_{ij}dan q_{ij}, serta konstanta penalti *M* bernilai sangat besar. Untuk memastikan tidak adanya tumpang tindih antarfasilitas produksi, model ini mengadaptasi logika konstrain dari literatur rujukan, namun dengan penyesuaian parameter konstanta pada ruas

kanan persamaan. Konstanta statis pada model referensi digantikan dengan dimensi fisik fasilitas, yaitu panjang (l) dan lebar (w) aktual dari masing-masing stasiun kerja, ditambah dengan kelonggaran area (*allowance*) a_{ij}. Formulasinya direpresentasikan sebagai berikut (Retnowati & Fudhla, 2017).

$$X_i - X_j + M \cdot p_{ij} + M \cdot q_{ij} \geq \frac{l_i + l_j}{2} + a_{ij} \quad \forall i = 1,2,\dots,n-1;\ j = i + 1 \quad (2.27)$$

$$-(X_i - X_j) + M \cdot p_{ij} + M(1 - q_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} + a_{ij} \quad \forall i = 1,2,\dots,n-1;\ j = i + 1 \quad (2.28)$$

$$Y_i - Y_j + M(1 - p_{ij}) + M \cdot q_{ij} \geq \frac{w_i + w_j}{2} + a_{ij} \quad \forall i = 1,2,\dots,n-1;\ j = i + 1 \quad (2.29)$$

$$-(Y_i - Y_j) + M(1 - p_{ij}) + M(1 - q_{ij}) \geq \frac{w_i + w_j}{2} + a_{ij} \quad \forall i = 1,2,\dots,n-1;\ j = i + 1 \quad (2.30)$$

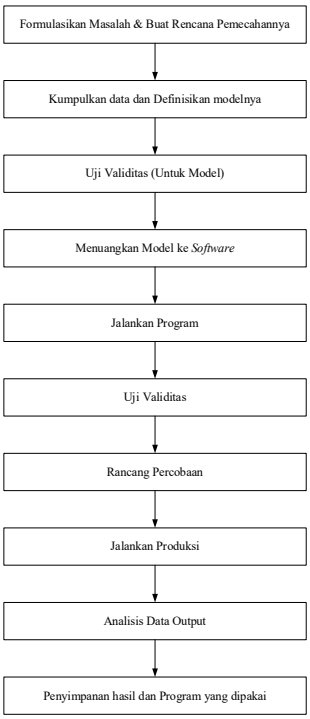
Semua variabel yang digunakan untuk menghitung posisi pusat fasilitas, deviasi jarak horizontal dan vertikal, serta estimasi jarak di dalam model optimasi. Sementara itu, variabel indikator yang menunjukkan hubungan posisi antarstasiun kerja didefinisikan sebagai variabel biner dengan nilai 0 atau 1 untuk memastikan setiap fasilitas ditempatkan pada posisi yang jelas sesuai hasil optimasi (Retnowati & Fudhla, 2017).

2.9 Simulasi *Discrete-Event*

Simulasi adalah teknik pemodelan dan analisis yang merepresentasikan perilaku sistem nyata secara *time-based* sehingga dinamika aliran material, waktu proses, antrian, dan interaksi sumber daya dapat dipelajari tanpa mengganggu operasi pabrik yang sebenarnya (Banks et al., 2010). Simulasi *discrete-event* merupakan pendekatan yang paling umum dipakai untuk memodelkan sistem manufaktur karena objek-objek sistem (mis. *batch* material, mesin, operator) berubah status pada peristiwa diskrit yang terjadi seiring. Tahapan pengembangan model simulasi meliputi perumusan masalah dan tujuan, pembangunan *conceptual model*, penentuan parameter *input*, implementasi komputasi model, verifikasi dan validasi, perancangan eksperimen, serta analisis hasil dan pelaporan, yang

seluruhnya membentuk siklus iteratif sampai model memenuhi tujuan keputusan yang diinginkan (Foncesa, 2023).

Tahap pengembangan model simulasi diawali dengan penetapan tujuan dan batasan sistem yang akan dimodelkan, sehingga ruang lingkup analisis menjadi jelas dan selaras dengan permasalahan yang dikaji. Tahap berikutnya adalah penyusunan model skenario awal yang merepresentasikan sistem nyata ke dalam elemen-elemen utama, seperti entitas, sumber daya, atribut, aturan *routing*, waktu proses, serta mekanisme antrian. Setelah model skenario awal tersusun, dilakukan pengumpulan dan pengolahan data *input* yang meliputi waktu proses, waktu perpindahan, kapasitas sumber daya, serta pola kedatangan material. Tahap terakhir adalah verifikasi dan validasi model, di mana verifikasi memastikan bahwa model telah dibangun sesuai dengan konsep dan logika yang dirancang, sedangkan validasi bertujuan memastikan bahwa perilaku dan keluaran model simulasi cukup merepresentasikan kondisi sistem nyata sehingga hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan (Banks et al., 2010). Tahapan-tahapan tersebut dapat digambarkan dalam alur yang tersaji pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Langkah-langkah model simulasi
Sumber: Siringoringo (2010)

2.10 Promodel

ProModel merupakan *software* simulasi *discrete-event* yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem manufaktur, proses bisnis, serta sistem layanan. ProModel membantu pengguna menganalisis rancangan sistem atau perubahan proses sebelum diterapkan pada kondisi nyata sehingga potensi permasalahan dapat diketahui lebih awal (Adedeji et al., 2021). Melalui simulasi tersebut, pengguna dapat memperkirakan dampak suatu perubahan terhadap kinerja sistem tanpa mengganggu aktivitas operasional yang sedang berjalan. Simulasi dari ProModel menghasilkan berbagai laporan dan statistik yang menggambarkan kondisi sistem selama proses simulasi berlangsung. Informasi tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam mengevaluasi aliran proses dan menentukan alternatif perbaikan untuk meningkatkan efisiensi sistem (Haekal, 2022).

ProModel memiliki beberapa elemen utama yang saling berhubungan dalam membentuk suatu model simulasi. Setiap elemen pada ProModel memiliki fungsi tertentu yang saling mendukung dalam penyusunan model simulasi. Berikut adalah elemen-elemen yang terdapat pada ProModel (Zhang, 2010).

1. *Entities*

   Entitas (*entities*) adalah objek yang bergerak dan diproses di dalam model simulasi, seperti produk, bahan baku, atau pelanggan. Setiap entitas dapat memiliki atribut tertentu dan mengikuti urutan proses sesuai logika yang telah ditentukan.

2. *Attributes*

   Atribut (*attributes*) merupakan informasi yang melekat pada setiap entitas untuk membedakan karakteristiknya, seperti jenis produk, ukuran, atau prioritas. Nilai atribut digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan selama proses simulasi.

3. *Variable*

   Variabel (*variable*) adalah penyimpan data yang bersifat global dan tidak dimiliki oleh entitas tertentu. Variabel digunakan untuk mendukung logika model serta menyimpan informasi, seperti jumlah produk yang diproses atau total waktu produksi.

4. *Resources*

   Sumber daya (*resources*) merupakan elemen yang digunakan untuk melayani atau memproses entitas, seperti operator, mesin, forklift, maupun peralatan lainnya. Entitas hanya dapat diproses apabila sumber daya yang dibutuhkan tersedia.

5. *Queue*

   Antrian (*queue*) adalah tempat menunggu sementara bagi entitas ketika sumber daya atau lokasi masih digunakan oleh entitas lain. Pengelolaan antrian umumnya mengikuti aturan tertentu sehingga urutan pelayanan dapat dikendalikan dengan baik.

6. Location

   Lokasi (*location*) merupakan tempat berlangsungnya aktivitas dalam model simulasi, seperti stasiun kerja, gudang, atau area penyimpanan. Setiap lokasi memiliki kapasitas tertentu dan menjadi tujuan perpindahan entitas selama proses simulasi berlangsung.

7. Process

   Proses (*process*) adalah rangkaian aktivitas yang dilakukan terhadap entitas pada suatu lokasi dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia. Setiap proses dapat mencakup waktu pelayanan, perubahan atribut, maupun perpindahan entitas ke proses berikutnya.

8. *Schedule*

   Jadwal (*schedule*) digunakan untuk mengatur waktu kedatangan entitas, waktu operasi sumber daya, maupun durasi aktivitas dalam simulasi. Pengaturan jadwal membantu model menggambarkan kondisi operasional yang mendekati keadaan sebenarnya.

9. *Events*

   Peristiwa (*event*) adalah kejadian yang mengubah kondisi model simulasi, seperti kedatangan entitas, dimulainya proses, atau selesainya suatu aktivitas. Setiap peristiwa akan memicu perubahan status sistem sesuai logika yang telah ditentukan.

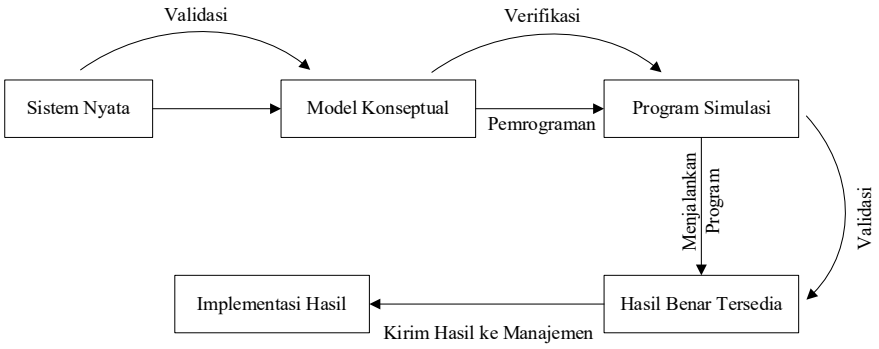
10. *Logics*

    Logika (*logic*) merupakan aturan yang mengatur aliran entitas selama simulasi berlangsung. Aturan ini digunakan untuk menentukan urutan proses, pengambilan keputusan, prioritas pelayanan, maupun kondisi tertentu sesuai kebutuhan sistem.

Analisis sistem pada ProModel memanfaatkan teori antrian untuk menggambarkan bagaimana entitas bergerak dan menunggu selama proses produksi. Salah satu konsep yang digunakan adalah *Little's Law* yang menjelaskan keterkaitan antara jumlah entitas di dalam sistem, laju kedatangan, dan waktu penyelesaian proses (Little, 2011). Pada sistem antrian M/M/1, analisis dilakukan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan sumber daya serta memperkirakan jumlah dan waktu tunggu entitas di dalam sistem. Pada sistem antrian M/M/1, analisis dilakukan untuk mengetahui tingkat pemanfaatan sumber daya serta memperkirakan jumlah dan waktu tunggu entitas di dalam sistem. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi sistem tanpa harus mengubah proses produksi yang sedang berjalan.

2.11 Verifikasi dan Validasi Model

Validasi dan verifikasi model adalah bagian dari proses simulasi yang menjamin bahwa model terkontruksi secara benar sesuai spesifikasi konseptual dan keluaran model dapat dipercaya untuk tujuan pengambilan keputusan dan bukti kesesuaian hasil model terhadap data lapangan. Verifikasi adalah proses memastikan bahwa model komputer telah diimplementasikan secara benar sesuai dengan spesifikasi konseptual dan logika yang telah dirancang model sehingga keluaran model mencerminkan apa yang dimaksudkan oleh perancang model. Sementara, validasi adalah proses menilai sejauh mana model merepresentasikan sistem nyata untuk tujuan yang telah ditetapkan, termasuk pemeriksaan kesesuaian keluaran model terhadap data sistem nyata, kesesuaian terhadap asumsi konseptual, dan relevansi perilaku model dalam rentang kondisi operasi yang diharapkan (Foncesa, 2023). Keterkaitan antara verifikasi dan validasi model dalam model simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Relasi verifikasi, validasi dan pembentukan model simulasi
Sumber: Hasad (2011)

Langkah verifikasi dalam pemodelan simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dibangun sesuai dengan yang telah dirumuskan sebelumnya. Tahapan ini mencakup kegiatan *review* terhadap konsistensi struktur logika dan hubungan antarobjek, dilanjutkan dengan *unit testing* untuk memeriksa fungsi masing-masing modul agar tidak terjadi kesalahan implementasi. Kemudian dilakukan proses *trace* dan *debugging* untuk menelusuri jalur logika model secara runtut sehingga setiap perubahan status entitas dan kejadian dapat dipastikan berlangsung sesuai aturan yang ditetapkan (Meyer et al., 2023).

Validasi model simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dibangun mampu menggambarkan kondisi operasional yang sebenarnya. Tahap ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data aktual yang diperoleh dari proses operasional. Jika perbedaan antara kedua data tidak signifikan, maka model dianggap telah mampu menggambarkan kondisi sebenarnya (Ruane et al., 2022).

Salah satu metode yang umum digunakan dalam validasi model adalah *paired sample t-test*, karena pengujian ini membandingkan dua kelompok data yang saling berpasangan, seperti hasil simulasi dan data aktual pada kondisi yang sama. Sebelum pengujian dilakukan, data terlebih dahulu diperiksa untuk memastikan telah memenuhi asumsi normalitas. Jika data berdistribusi normal, maka *paired sample t-test* dapat digunakan untuk menguji apakah perbedaan rata-rata kedua kelompok data bersifat signifikan atau tidak (Fonseca, 2023). Analisis data dilakukan menggunakan *software* SPSS yang mampu menghasilkan berbagai parameter statistik secara otomatis. Beberapa *output* yang digunakan antara lain

nilai rata-rata, standar deviasi, nilai t, derajat kebebasan, nilai signifikansi, dan interval kepercayaan. *Output* tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi tingkat akurasi model simulasi (Arsyad & Suryaningsih, 2024). Interpretasi hasil dilakukan berdasarkan nilai signifikansi (*p-value*). Jika nilai *p-value* ≥ 0,05, maka model simulasi dinyatakan valid karena tidak terdapat perbedaan yang signifikan dengan data aktual. Sebaliknya, jika nilai *p-value* < 0,05, maka model perlu diperbaiki agar mampu menggambarkan kondisi sistem secara lebih akurat (Smith & Sturrock, 2024).

2.12 Penelitian Terdahulu

Terdapat referensi dari penelitian terdahulu mengenai perancangan ulang tata letak produksi dengan pendekatan MILP. Penelitian yang sudah ada sebelumnya digunakan sebagai bahan referensi dalam melakukan penelitian. Penelitian terdahulu terakit dengan topik yang relevan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

Penelitian Mengenai Tata Letak dengan Pendekatan MILP		Parameter Pembanding								
		Studi Kasus	Metode Pengukuran Jarak	Fungsi Kendala					Simulasi	Hasil
				Non-Overlapping	Pemilihan Bentuk Konfigurasi	Rotasi Konfigurasi	Departemen *Fix*	Jalur *Material Handling*		
Penelitian Terdahulu (Penulis, Tahun)	(Anjos & Vieira, 2020)	Tata letak multi lantai	*Euclidean*	✓	-	-	-	-	-	Memberikan solusi optimal hingga 13 departemen dan mampu menangani hingga 100 departemen.
	(Coppe et al., 2022)	*Single-Row Facility Layout Problem*	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	*Decision diagram* lebih efektif untuk kendala posisi, sedangkan MIP lebih sesuai untuk kendala urutan.
	(Dahlbeck, 2021)	Tata Letak Fasilitas Baris-T	*Rectilinear*	✓	-	-	-	✓	-	Menyelesaikan tata letak *T-row* (18 departemen) dan 3-bay (17 departemen) secara optimal.
	(Retnowati & Fudhla, 2017)	Tata letak manufaktur	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	Meningkatkan kapasitas produksi 71,3% dan menurunkan biaya 38,5%.
	(Sampurno & Sudiarso, 2018)	Tata letak pabrik baru	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	✓	Menurunkan jarak aliran material sebesar 63,40%.
	(Che et al., 2017)	Tata letak multi lantai	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	Mengurangi biaya material handling dengan penggunaan area 1.194–1.222 m².

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu (lanjutan)

Penelitian Mengenai Tata Letak dengan Pendekatan MILP		Parameter Pembanding								
		Studi Kasus	Metode Pengukuran Jarak	Fungsi Kendala					Simulasi	Hasil
				Non-Overlapping	Pemilihan Bentuk Konfigurasi	Rotasi Konfigurasi	Departemen *Fix*	Jalur *Material Handling*		
Penelitian Terdahulu (Penulis, Tahun)	(Ejeh et al., 2018)	Tata letak multi lantai	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	Menekan total biaya menjadi 66.262,0 rmu pada lahan 20 × 20 m.
	(Guan et al.,2019)	Tata letak workshop	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	Menghasilkan total biaya 9.130,00 dengan tingkat utilitas 0,5069 pada dua bengkel.
	(Domínguez-Casasola et al., 2023)	*Unequal Area Facility Layout Problem*	*Rectilinear*	✓	-	✓	✓	-	-	Menurunkan biaya pengendalian bahan harian sebesar 25,49%–31,62%.
	(Secchin & Amaral, 2018)	*Double Row Layout Problem*	*Rectilinear*	✓	-	-	-	-	-	Meningkatkan efisiensi komputasi dengan memangkas waktu proses dari 89.923,20 detik menjadi 15.585,71 detik.
Penelitian ini		Tata letak manufaktur	*Rectilinear*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Diharapkan dapat meminimasi jarak material handling dan meningkatkan output produksi perusahaan

Penelitian terdahulu mengenai tata letak masih memakai metode heuristik biasa yang belum dapat memastikan solusi optimal global dan cenderung hanya menitikberatkan pada penghematan Ongkos *Material Handling* (OMH). Penelitian ini menggunakan MILP yang diselesaikan menggunakan *solver Python* untuk memperoleh solusi optimal pada lantai produksi. Total jarak perpindahan material dihitung menggunakan pendekatan jarak *Rectilinear* yang telah dilinearisasi tanpa mengubahnya ke dalam bentuk biaya. Pendekatan ini dipakai untuk menekan jarak perpindahan agar waktu kerja lebih efisien dan *output* produksi dapat meningkat.

Model yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk memberikan gambaran tata letak yang lebih sesuai dengan kondisi operasional di lantai produksi dibandingkan pendekatan pada penelitian sebelumnya. Formulasi model menggabungkan beberapa kendala, seperti batas area produksi, kendala *non-overlapping* menggunakan metode *Big*-M, dan kendala *fixed location* untuk mempertahankan posisi departemen tertentu. Penelitian ini juga memberikan beberapa alternatif konfigurasi dimensi sehingga algoritma dapat memilih orientasi

yang paling sesuai untuk memanfaatkan ruang produksi sekaligus meminimalkan total jarak perpindahan material.

Hasil optimasi pada penelitian terdahulu kurang dilakukan pengujulan melalui simulasi operasional sehingga penerapannya di lapangan belum dapat dipastikan. Penelitian ini melengkapi proses tersebut dengan simulasi *discrete-event* menggunakan ProModel untuk mengevaluasi kondisi operasional secara nyata. Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah frekuensi aliran material harian untuk mengevaluasi kemampuan tata letak usulan dalam menghadapi perubahan kondisi operasional. Hasil pengujian tersebut diharapkan dapat memberikan keyakinan bahwa tata letak yang dihasilkan dapat memberikan gambaran yang lebih nyata mengenai kinerja tata letak ketika diterapkan pada kondisi operasional yang berbeda.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada perusahaan produsen kemasan karton yang berlokasi di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pengumpulan data dilakukan selama periode 28 Agustus 2025 sampai 5 Januari 2026 melalui observasi langsung dan dokumentasi perusahaan. Seluruh data tersebut digunakan untuk memahami kondisi produksi, pola aliran material, dan kendala operasional yang terjadi. Fokus penelitian berada pada area lantai produksi seluas 684 m² yang digunakan untuk seluruh kegiatan manufaktur. Area tersebut meliputi mesin potong, mesin slotter, mesin pond *die cutting*, mesin pond tumpul, meja sablon, meja pengeleman, mesin stapler, dan stasiun *strapping* yang tersusun mengikuti urutan proses produksi. Penelitian juga mengamati jalur perpindahan material untuk mengetahui pola pergerakan material antar departemen. Penelitian ini berfokus pada perancangan ulang tata letak fasilitas untuk meminimalkan jarak perpindahan material. Model yang dikembangkan tetap mengikuti batasan fisik bangunan sehingga hasil yang diperoleh diharapkan dapat diterapkan secara nyata karena telah disesuaikan dengan kondisi operasional perusahaan.

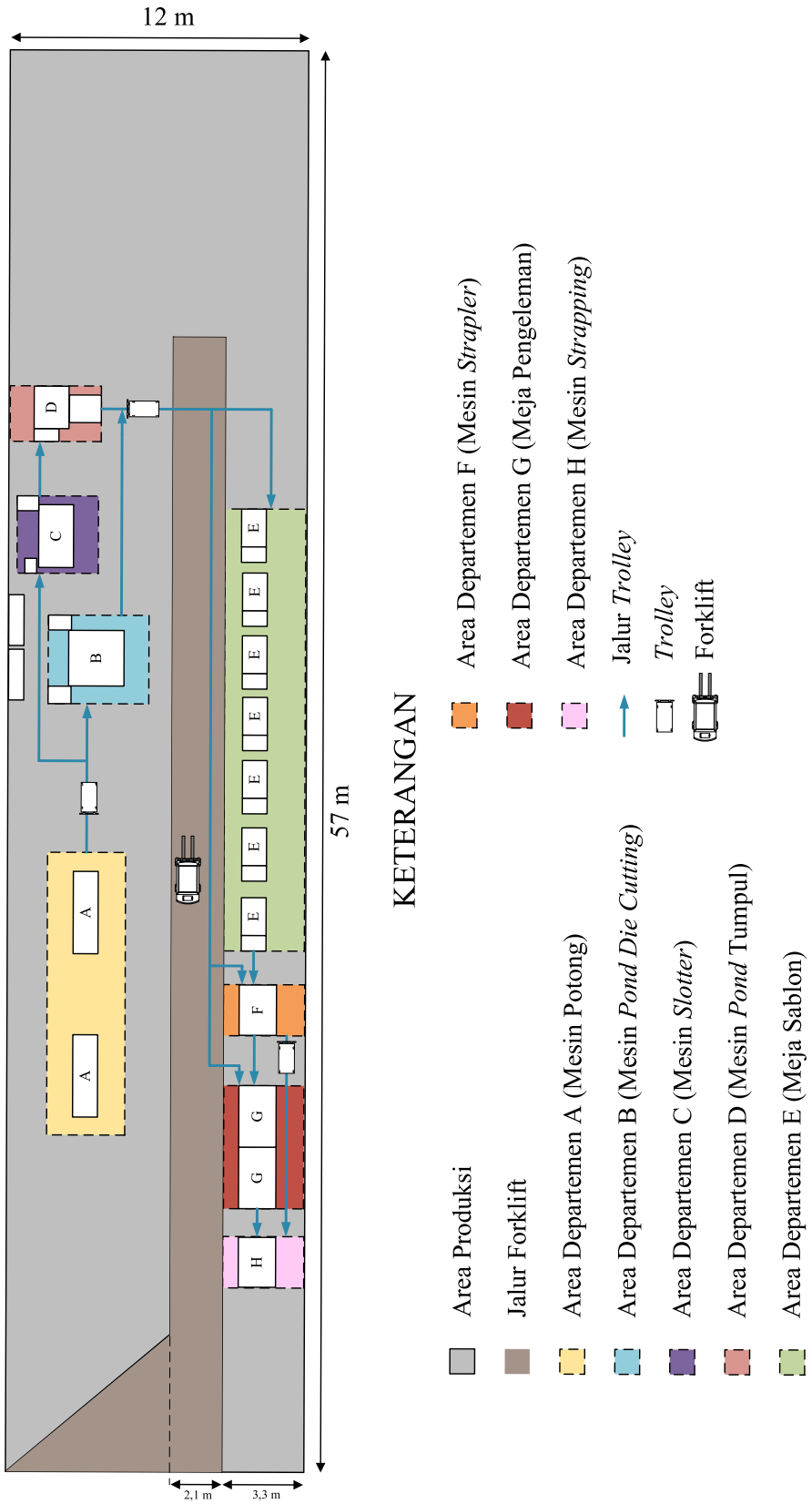
3.2 Deskripsi Sistem

Sistem produksi *job shop* diterapkan oleh perusahaan dan dijalankan dengan pendekatan *make to order* (MTO). Sistem ini dirancang untuk mengolah bahan baku berupa lembaran *corrugated board* menjadi berbagai jenis kemasan karton. Setiap produk dibuat sesuai ukuran, bentuk, dan desain yang diminta pelanggan. Setiap pesanan dapat memiliki spesifikasi yang berbeda-beda. Perbedaan tersebut menyebabkan alur produksi tidak selalu sama. Material setengah jadi berpindah ke beberapa stasiun kerja sesuai kebutuhan proses masing-masing produk. Hal tersebut membuat aliran material di lantai produksi menjadi lebih bervariasi.

Fasilitas produksi terdiri atas berbagai proses mekanis, manual, dan semimanual. Mesin yang digunakan meliputi mesin potong, mesin *slotter*, mesin

pond tumpul, dan mesin *pond die cutting*. Tahap penyelesaian dilakukan melalui meja sablon, meja pengeleman, mesin *stapler*, dan mesin *strapping*. Masing-masing fasilitas tersebut berfungsi mendukung tahapan produksi hingga menghasilkan kemasan karton sesuai pesanan. Perpindahan material antarstasiun kerja didukung oleh fasilitas *material handling* sebagai sarana distribusi di dalam pabrik. Pergerakan bahan baku *corrugated board* dengan ukuran atau volume besar dilakukan menggunakan *forklift*. Sementara itu, perpindahan material hasil pemotongan dengan kapasitas kecil hingga sedang dilakukan menggunakan *trolley* manual karena lebih sesuai untuk perpindahan antarstasiun kerja yang berdekatan.

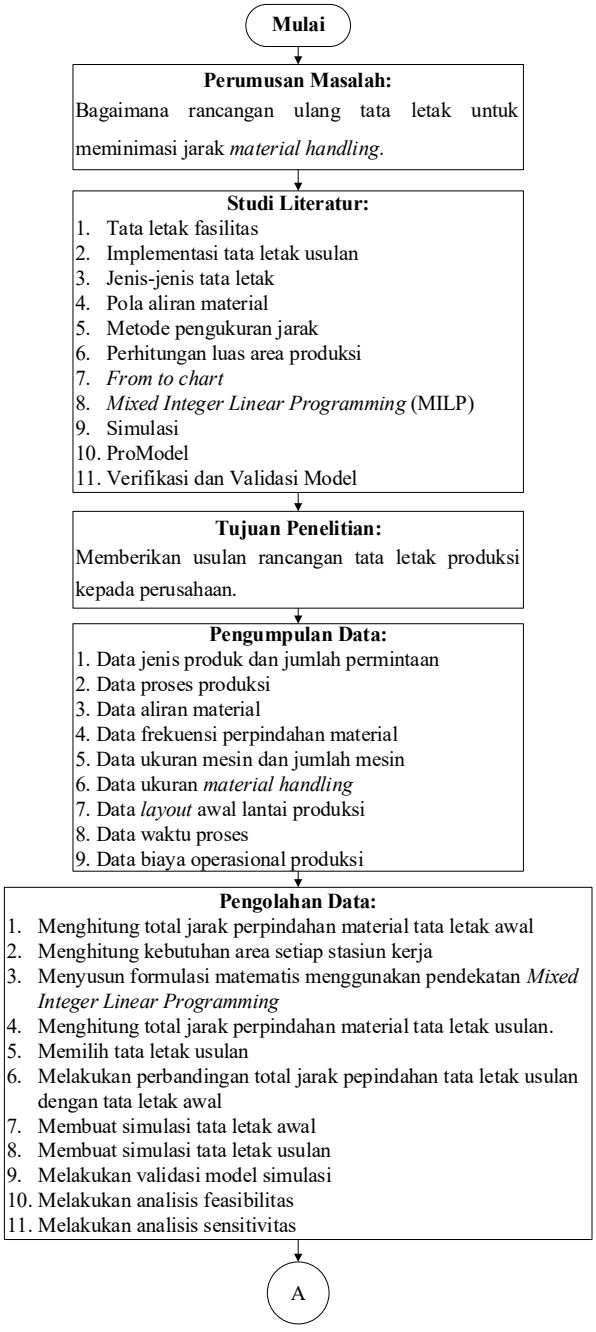
Proses produksi dimulai dengan memindahkan bahan baku dari area penyimpanan menuju mesin potong. Tahap awal ini bertujuan untuk memotong lembaran *corrugated board* sesuai dengan ukuran dasar produk yang akan dibuat. Setelah itu, alur produksi terbagi menjadi dua jalur sesuai dengan jenis produk yang diproses. Pada produk *corrugated carton box*, material diproses secara berurutan melalui mesin *slotter* untuk membuat garis lipatan dan celah, kemudian dilanjutkan ke mesin *pond* tumpul. Sementara itu, pada produk *corrugated die cut box*, material langsung dipindahkan ke mesin *pond die cutting* untuk membentuk pola kemasan sesuai desain yang diinginkan. Seluruh produk selanjutnya bertemu pada proses *finishing*. Produk akan melalui meja sablon apabila pelanggan menginginkan tambahan desain pada kemasan. Setelah itu, proses penyatuan dilakukan menggunakan meja pengeleman atau mesin *stapler*, kemudian diakhiri dengan mesin *strapping* sebelum produk disimpan di gudang barang jadi. Perbedaan jalur proses dan waktu produksi pada setiap jenis kemasan menyebabkan aliran material tidak selalu sama. Kondisi tersebut mengakibatkan pergerakan *material handling* saling melintasi antarstasiun kerja, sedangkan tata letak awal seluruh departemen ditunjukkan pada Gambar 3.1.



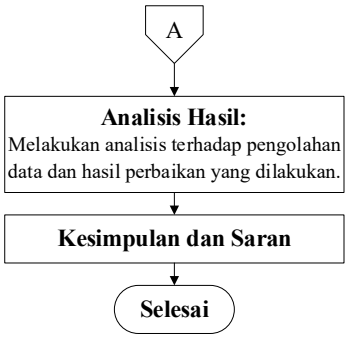
Gambar 3.1 Tata letak awal

3.3 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian berfungsi sebagai acuan dalam menyusun dan melaksanakan setiap tahapan penelitian secara sistematis. Kerangka tersebut memudahkan penulis dalam mengarahkan setiap tahapan penelitian agar sesuai dengan tujuan yang telah ditentukan. Kerangka penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Kerangka Penelitian



Gambar 3.2 Kerangka Penelitian (lanjutan)

3.4 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini dilakukan pengumpulan data-data yang diperlukan dengan tujuan memperoleh informasi untuk proses penelitian yang dilakukan di perusahan. Data-data yang diperlukan adalah sebagai berikut:

a. Data jenis produk dan jumlah permintaan

   Data jenis produk dan jumlah permintaan diperoleh dari laporan harian yang disusun oleh supervisor produksi. Data tersebut menggambarkan jumlah pesanan yang diterima perusahaan pada setiap periode produksi. Karena perusahaan menggunakan sistem *Make-to-Order* (MTO), maka proses produksi dilakukan berdasarkan pesanan pelanggan.

b. Data aliran material

   Data aliran material merupakan data yang menjelaskan urutan perpindahan material dari satu departemen ke departemen lainnya selama proses produksi berlangsung. Data ini menggambarkan urutan proses yang dilalui oleh material sejak awal hingga menjadi produk akhir. Data ini diperoleh melalui observasi dan wawancara dengan supervisor produksi.

c. Data produksi harian

   Data produksi harian merupakan data yang memuat produk yang berhasil diproduksi dalam satu hari. Data ini diperolah dari buku laporan supervisor produksi.

d. Data frekuensi perpindahan material

   Data frekuensi perpindahan material adalah data yang menyatakan banyaknya perpindahan material dari suatu departemen ke departemen lain. Data ini diperoleh dari buku laporan setiap departemen.

e. Data ukuran mesin dan jumlah mesin

   Data ukuran mesin dan jumlah mesin merupakan data yang menggambarkan dimensi setiap mesin produksi beserta jumlah unit mesin yang digunakan pada masing-masing departemen. Data ini diperoleh dengan melakukan pengukuran secara langsung.

f. Data ukuran *material handling*

   Data ukuran *material handling* merupakan data yang menunjukkan dimensi sarana pemindahan material yang digunakan di lantai produksi. Data ukuran *material handling* digunakan untuk menentukan lebar jalur transportasi. Data ini diperoleh dengan melakukan pengukuran pada *material handling* yang digunakan di lantai produksi perusahan.

g. Data *layout* awal lantai produksi

   Data *layout* lantai produksi merupakan gambaran tata letak awal area produksi pada perusahaan. Data ini memuat ukuran lantai produksi dan ukuran fasilitas produksi secara keseluruhan. Data ini digunakan sebagai pembanding untuk usulan tata letak yang diberikan. Data ini diperoleh dari observasi pada lantai produksi.

h. Data waktu proses

   Data waktu proses merupakan data waktu pengerjaan material pada departemen. Data ini diperoleh dengan melakukan pengukuran langsung dari pekerja pada setiap departemen. Data waktu proses digunakan sebagai *input* untuk model simulasi.

i. Data biaya operasional produksi

   Data biaya operasional produksi adalah data yang digunakan dalam analisis secara ekomonis penerapan tata letak usulan. Data ini mencakup gaji/upah supervisor produksi, operator produksi, dan biaya pengoperasian *forklift.* Data ini diperoleh melalui wawancara.

3.5 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* dalam merancang tata letak fasilitas lantai produksi. Adapun tahapan pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menghitung total jarak perpindahan material tata letak *awal.*

   Tahap pertama adalah menghitung total jarak perpindahan material pada tata letak *awal.*

   a. Membuat *From To Chart* (FTC) frekuensi perpindahan material yang menggambarkan intensitas perpindahan material antar departemen berdasarkan aliran proses produksi.
   b. Menghitung jarak antar setiap departemen menggunakan persamaan (2.10).
   c. Membuat *From To Chart* (FTC) jarak berdasarkan perhitungan jarak yang dilakukan pada langkah sebelumnya
   d. Membuat *From To Chart* (FTC) total jarak perpindahan material dengan mengalikan frekuensi perpindahan material dan jarak antar departemen menggunakan Persamaan (2.17).

2. Menghitung kebutuhan area setiap departemen.

   Tahap selanjutnya adalah menentukan area yang diperlukan untuk setiap departemen. Pada tahap ini dilakukan perhitungan kebutuhan ruang untuk memastikan bahwa setiap stasiun departemen memiliki luas yang memadai agar proses produksi dapat berjalan dengan aman, nyaman, dan efisien.

   a. Menghitung *allowance* operator menggunakan Persamaan (2.11).
   b. Menentukan *allowance* untuk material *incoming* dan *outgoing*.
   c. Menghitung *allowance* jalur *material handling* menggunakan Persamaan (2.12).
   d. Menghitung luas satuan mesin menggunakan Persamaan (2.14).
   e. Menghitung luas ruangan menggunakan Persamaan (2.15).
   f. Menghitung total luas ruangan menggunakan Persamaan (2.16).

3. Menyusun formulasi matematis menggunakan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming*.
    a. Menentukan variabel keputusan

        Variabel keputusan adalah entitas matematis yang belum diketahui nilainya dan akan dicari oleh *solver* pada optimasi fungsi tujuan. Pemodelan MILP pada penelitian ini memiliki variabel keputusan sebagai berikut.

        1) Titik pusat koordinat departemen

            Titik pusat koordinat departemen merupakan variabel yang dihasilkan dari proses optimasi tata letak pada penelitian ini. Variabel tersebut menunjukkan posisi setiap departemen pada area lantai produksi. Algoritma akan mencari berbagai alternatif posisi dan memilih susunan yang paling optimal.

        2) Dimensi panjang dan lebar departemen

            Dimensi panjang dan lebar departemen menggambarkan ukuran fisik yang diperlukan oleh setiap departemen. Nilai dimensi tersebut dapat berubah karena model memberikan pilihan untuk menentukan konfigurasi departemen. Dengan adanya pemilihan konfigurasi tersebut, pemanfaatan ruang menjadi lebih optimal dan tata letak dapat diatur secara lebih efisien.

        3) Jarak antar departemen

            Jarak antar departemen enggambarkan panjang lintasan yang ditempuh material saat berpindah dari satu departemen ke departemen lainnya. Variabel ini digunakan sebagai ukuran untuk menilai kinerja tata letak hasil optimasi. Semakin kecil jarak yang dihasilkan, semakin baik nilai fungsi tujuan

    b. Menentukan fungsi tujuan

        Perumusan fungsi tujuan dalam penelitian ini difokuskan pada upaya minimasi total jarak perpindahan *material handling* di lantai produksi. Total jarak perpindahan material dihitung dengan mempertimbangkan frekuensi aliran material antar departemen dan

jarak perpindahannya sesuai dengan Persamaan (2.10). karena lebih mampu menggambarkan kondisi perpindahan material yang sebenarnya. Fungsi jarak *Rectilinear* tidak dapat langsung digunakan karena mengandung operasi akar kuadrat yang menghasilkan bentuk non-linear. Oleh sebab itu, diterapkan metode *tangent-plane approximation* untuk mengubahnya menjadi bentuk linear yang dapat diolah oleh *solver*. Variabel estimasi jarak *Rectilinear* yang telah dilinearisasi (d_{ij}) dikombinasikan dengan frekuensi aliran material untuk membentuk fungsi tujuan utama penelitian. Persamaan (2.17) menjadi Fungsi tujuan pada formulasi matematis berbasis jarak perpindahan *material handling* dan frekuensi perpindahan material yang dirumuskan menggunakan notasi T sebagai berikut:

Minimasi $T = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} f_{ij}\, d_{ij}$.....(3.1)

Variabel (T) menyatakan total jarak perpindahan material yang akan diminimalkan oleh model optimasi. Nilai (f_{ij}) menunjukkan frekuensi perpindahan material antara departemen (i) dan (j). Variabel (d_{ij}) menyatakan hasil pendekatan linear dari jarak *Rectilinear* antar departemen.

c. Menetapkan fungsi kendala

Fungsi kendala yang dipertimbangkan dalam merancang ulang tata letak adalah sebagai berikut.

1) Formulasi variabel deviasi perhitungan jarak horizontal dan vertikal

Perhitungan jarak antar departemen memerlukan nilai yang selalu bernilai positif. dari selisih koordinat pada arah horizontal dan vertikal. Penggunaan fungsi nilai mutlak untuk memperoleh jarak tersebut tidak dapat diterapkan secara langsung karena menghasilkan fungsi non-linear. Oleh karena itu, setiap selisih koordinat dipecah menjadi variabel deviasi positif (x_{ij}^{+}, y_{ij}^{+}) dan

variabel deviasi negatif $\left(x_{ij}^{-}, y_{ij}^{-}\right)$. Pendekatan ini mengadaptasi formulasi pada Persamaan (2.19) dan Persamaan (2.20) dengan menyesuaikan notasi koordinat dari. (X_i, Y_i) mejadi (x_i, y_i) untuk mempertahankan konsistensi definisi variabel. Variabel deviasi horizontal bekerja berdasarkan posisi relatif antar departemen. Apabila departemen (i) berada di sebelah kanan departemen (j), maka nilai selisih koordinat akan direpresentasikan oleh (x_{ij}^{+}), sedangkan $\left(x_{ij}^{-}\right)$ bernilai nol. Sebaliknya, jika departemen (i) berada di sebelah kiri departemen (j), maka (x_{ij}^{-}) akan merepresentasikan selisih koordinat tersebut dan (x_{ij}^{+}) bernilai nol. Secara matematis pernyataan tersebut mengadopsi dari Persamaan (2.21) dan (2.22). Pendekatan yang sama digunakan pada koordinat vertikal. Variabel (y_{ij}^{+})akan bernilai positif apabila departemen (i) berada di atas departemen (j), sedangkan variabel (y_{ij}^{-})digunakan ketika departemen (i) berada di bawah departemen (j). Secara matematis pernyataan tersebut mengadopsi dari Persamaan (2.23) dan (2.24). Karena setiap pasangan variabel hanya memiliki satu variabel yang aktif pada satu kondisi, penjumlahan $\left(x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-}\right)$ dan $\left(y_{ij}^{+} + y_{ij}^{-}\right)$ menghasilkan menghasilkan nilai jarak secara horizontal (d_{ij}^{x}) dan vertikal (d_{ij}^{y}) yang positif dan dapat digunakan dalam model optimasi. Hubungan tersebut dinyatakan melalui formulasi matematis yang diadopsi dari persamaan (2.25) dan (2.26).

2) Formulasi kendala linear pada jarak *Rectilinear*

Perhitungan jarak pada fungsi tujuan dilakukan menggunakan variabel d_{ij} yang merepresentasikan jarak *Rectilinear*. Pendekatan ini menggambarkan perpindahan material handling yang mengikuti jalur horizontal dan vertikal di lantai produksi sehingga sesuai dengan kondisi operasional sebenarnya. Selisih

koordinat antar departemen diubah menjadi komponen positif dan negatif pada sumbu X dan Y melalui proses linierisasi sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (2.25) dan (2.26). Proses tersebut memastikan bahwa nilai variabel d_{ij} selalu berada pada solusi yang valid dengan menjumlahkan seluruh komponen perpindahan secara mutlak. Persamaan yang digunakan untuk menghitung total jarak *Rectilinear* ditunjukkan sebagai berikut.

$$d_{ij} = x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-} + y_{ij}^{+} + y_{ij}^{-} \quad \forall i < j \quad \text{..... (3.2)}$$

Persamaan tersebut memastikan bahwa hanya satu arah perpindahan pada setiap sumbu yang memiliki nilai, sedangkan arah lainnya akan bernilai nol secara otomatis. Pendekatan tersebut menjaga model tetap linier sehingga proses optimasi MILP dapat dilakukan dengan lebih efisien dan menghasilkan solusi tata letak terbaik.

3) Setiap departemen harus berada di dalam area pabrik

Penempatan departemen pada model optimasi harus memperhatikan batas ruang lantai produksi agar tidak ada bagian fasilitas yang berada di luar area pabrik. Posisi setiap departemen dinyatakan oleh koordinat pusat (x_i, y_i), sedangkan ukuran fisiknya ditentukan berdasarkan setengah panjang $(P_i/2)$ dan setengah lebar $(L_i/2)$ yang diukur dari titik pusat tersebut. Untuk menjaga agar departemen tidak melewati batas kiri dan batas bawah area produksi, titik pusat setiap departemen harus berada pada jarak tertentu dari kedua sisi tersebut. Nilai jarak tersebut disesuaikan dengan ukuran departemen sehingga seluruh bagian departemen tetap berada di dalam area produksi. Formulasi matematis untuk batas kiri dan batas bawah dinyatakan sebagai berikut.

$$x_i \geq \frac{P_i}{2} \quad \forall i \text{.....(3.3)}$$

$y_i \geq \frac{L_i}{2} \quad \forall i$.....(3.4)

Penempatan departemen pada sisi kanan dan sisi atas dibatasi oleh ukuran keseluruhan lantai produksi yang dinyatakan melalui parameter panjang pabrik (P_p) dan lebar pabrik (L_p). jalur khusus untuk *forklift* disediakan oleh perusahan selebar 2,1 meter yang akan ditempatkan pada sisi atas lantai produksi. Penyediaan jalur ini menyebabkan area yang dapat digunakan untuk menempatkan departemen pada arah vertikal menjadi berkurang. Untuk menyesuaikan kondisi tersebut, fungsi kendala disusun agar seluruh departemen tetap berada di dalam batas kanan pabrik dan tidak memasuki jalur *forklift* yang telah ditentukan. Formulasi matematis fungsi kendala tersebut ditunjukkan pada persamaan berikut.

$x_i + \frac{P_i}{2} \leq P_p \quad \forall i$.....(3.5)

$y_i + \frac{L_i}{2} \leq L_p - 2{,}1 \quad \forall i$.....(3.6)

4) Setiap departemen tidak boleh tumpang tindih (*overlapping*)

Penempatan departemen pada model tata letak harus memperhatikan dimensi ruang yang tersedia di lantai produksi. Oleh karena itu, model matematis harus memastikan bahwa setiap departemen ditempatkan tanpa saling bertumpang tindih (*overlapping*). Pendekatan ini mengadopsi konsep yang diformulasikan pada Persamaan (2.27) sampai Persamaan (2.30). Posisi suatu departemen terhadap departemen lainnya dapat berada di sebelah kiri, sebelah kanan, di atas, atau di bawah. Jika departemen i berada di sebelah kiri departemen j, maka berlaku $x_j - x_i \geq \frac{P_i + P_j}{2}$, sedangkan jika berada di sebelah kanan berlaku $x_i - x_j \geq \frac{P_i + P_j}{2}$. Persamaan tersebut memastikan bahwa kedua departemen tidak saling bertumpang tindih pada arah horizontal. Pada arah vertikal, penempatan departemen di

bawah memenuhi persamaan $y_j - y_i \geq \frac{L_i+L_j}{2}$, sedangkan penempatan di atas memenuhi $y_i - y_j \geq \frac{L_i+L_j}{2}$. Nilai P menunjukkan dimensi panjang dan nilai L menunjukkan dimensi lebar dari masing-masing departemen. Persamaan tersebut memastikan bahwa jarak antar departemen cukup sesuai ukuran fisiknya. Karena hanya satu posisi relatif yang diperlukan untuk membedakan dua departemen, model menggunakan logika "ATAU" yaitu berupa variabel biner $(z1_{ij}$dan $z2_{ij})$ dan konstanta *Big M*. Formulasi kendala *non-overlapping* dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$x_j - x_i + M(z1_{ij} + z2_{ij}) \geq \frac{P_i+P_j}{2} \quad \forall i < j \text{.....(3.7)}$$

$$x_i - x_j + M(1 - z1_{ij} + z2_{ij}) \geq \frac{P_i+P_j}{2} \quad \forall i < j \text{.....(3.8)}$$

$$y_j - y_i + M(z1_{ij} + 1 - z2_{ij}) \geq \frac{L_i+L_j}{2} \quad \forall i < j \text{.....(3.9)}$$

$$y_i - y_j + M(1 - z1_{ij} + 1 - z2_{ij}) \geq \frac{L_i+L_j}{2} \quad \forall i < j \text{.....(3.10)}$$

5) Penempatan departemen yang tetap (*fixed*)

Beberapa fasilitas di lantai produksi akan ditempatkan pada posisi yang tidak dapat diubah karena menyesuaikan kondisi aktual di lapangan. Kondisi tersebut membuat model optimasi harus mempertahankan letak fasilitas tersebut agar tidak berpindah ketika proses pencarian solusi dilakukan. Seluruh fasilitas dengan karakteristik tersebut dikelompokkan ke dalam Himpunan F. Formulasi matematis yang digunakan untuk mengunci posisinya diberikan sebagai berikut.

$$x_i = XF_i \quad \forall i \in F \text{.....(3.11)}$$

$$y_i = YF_i \quad \forall i \in F \text{.....(3.12)}$$

Variabel x_i dan y_i menyatakan koordinat fasilitas yang digunakan dalam model optimasi. Sementara itu, parameter XF_i dan YF_i merupakan koordinat tetap yang dijadikan acuan.

6) Pemilihan bentuk konfigurasi departemen

Untuk memanfaatkan ruang lantai produksi secara lebih optimal, setiap stasiun kerja dapat ditempatkan dengan orientasi yang berbeda, misalnya diputar sehingga posisi panjang dan lebarnya saling bertukar. Seluruh kemungkinan perubahan posisi panjang dan lebar dikumpulkan dalam Himpunan K_i. Pemilihan bentuk konfigurasi dilakukan menggunakan variabel biner Y_{ik}, sehingga model hanya dapat memilih satu konfigurasi untuk setiap stasiun kerja. Ketentuan tersebut dirumuskan sebagai berikut.

$\sum_{k \in K_i} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N$ .....(3.13)

Himpunan N merepresentasikan seluruh stasiun kerja yang dianalisis dalam proses optimasi tata letak. Konfigurasi yang terpilih akan menentukan dimensi panjang aktual (P_i) dan lebar aktual (L_i) dari stasiun kerja. Nilai P_i dan L_i dihitung berdasarkan ukuran masing-masing konfigurasi yang dikalikan dengan variabel biner yang bernilai satu. Perhitungan tersebut dinyatakan melalui persamaan berikut.

$P_i = \sum_{k \in K_i} P_{ik} \cdot Y_{ik} \quad \forall i \in N$ .....(3.14)

$L_i = \sum_{k \in K_i} L_{ik} \cdot Y_{ik} \quad \forall i \in N$ .....(3.15)

d. Menyelesaikan formulasi matematis menggunakan *python*.

Formulasi matematis yang telah dibuat, kemudian diselesaikan dengan menggunakan bahasa pemrograman *Python* untuk mengetahui jarak optimal dari tata letak baru yang dihasilkan.

4. Menghitung total jarak perpindahan material tata letak hasil optimasi.

Tahap selanjutnya adalah menghitung total jarak perpindahan material pada tata letak alternatif yang disusun secara manual.

a. Membuat *From To Chart* (FTC) frekuensi perpindahan material yang menggambarkan intensitas perpindahan material antar departemen berdasarkan aliran proses produksi.

b. Menghitung jarak antar departemen menggunakan persamaan (2.8).

c. Membuat *From To Chart* (FTC) jarak berdasarkan perhitungan jarak yang dilakukan pada langkah sebelumnya
d. Membuat *From To Chart* (FTC) total jarak perpindahan material dengan mengalikan frekuensi perpindahan material dan jarak antar departemen menggunakan Persamaan (2.17).

5. Melakukan perbandingan total jarak perpindahan tata letak usulan dengan tata letak awal.

   Tahap selanjutnya adalah melakukan perbandingan antara total jarak perpindahan material pada tata letak usulan dan tata letak *awal*. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat perbaikan yang dihasilkan oleh tata letak usulan.
6. Membuat simulasi tata letak awal menggunakan *software* Promodel.
   a. Membangun model simulasi menggunakan *software* Promodel.

      Tahap selanjutnya adalah membangun model simulasi dengan menggunakan *input* data waktu proses mesin/stasiun kerja dan jarak antar departemen berdasarkan tata letak awal.
   b. Melakukan uji verifikasi untuk untuk memastikan bahwa model simulasi yang dibuat di dalam *software* telah berjalan sesuai dengan logika sistem yang sebenarnya dan terbebas dari kesalahan program.
   c. Melakukan uji validasi hasil simulasi tata letak *awal*

      Tahap berikutnya adalah melakukan uji validasi dengan membandingkan *output* hasil *running* simulasi terhadap data historis dari sistem nyata. Validasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi tata letak awal sudah valid dan dapat merepresentasikan kondisi aktual di lapangan.
7. Membuat simulasi tata letak usulan menggunakan *software* Promodel.
   a. Membangun model simulasi menggunakan *software* Promodel.

      Tahap selanjutnya adalah membangun model simulasi dengan menggunakan *input* sama dengan tata letak awal dengan perbedaan terletak pada penggunaan *input* jarak antar departemen yang disesuaikan dengan rancangan tata letak usulan yang terpilih.

b. Melakukan uji verifikasi hasil simulasi tata letak usulan

   Tahap berikutnya adalah melakukan uji verifikasi untuk memastikan bahwa logika pemodelan pada *software* telah berjalan dengan benar.

8. Melakukan validasi model simulasi untuk mengetahui signifikansi perbedaan antara tata letak awal dengan tata letak usulan.

   Tahap selanjutnya adalah melakukan validasi model dengan membandingkan hasil simulasi tata letak *awal* dengan tata letak usulan. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui signifikansi perbedaan antara tata letak awal dengan tata letak usulan.

9. Melakukan analisis feasibilitas untuk memastikan bahwa tata letak usulan dapat diterapkan di lantai produksi.

   Tahap ini menjelaskan apakah tata letak usulan dapat diterapkan karena memenuhi persyaratan fisik serta fisik sekaligus menguntungkan dari sisi biaya implementasi.

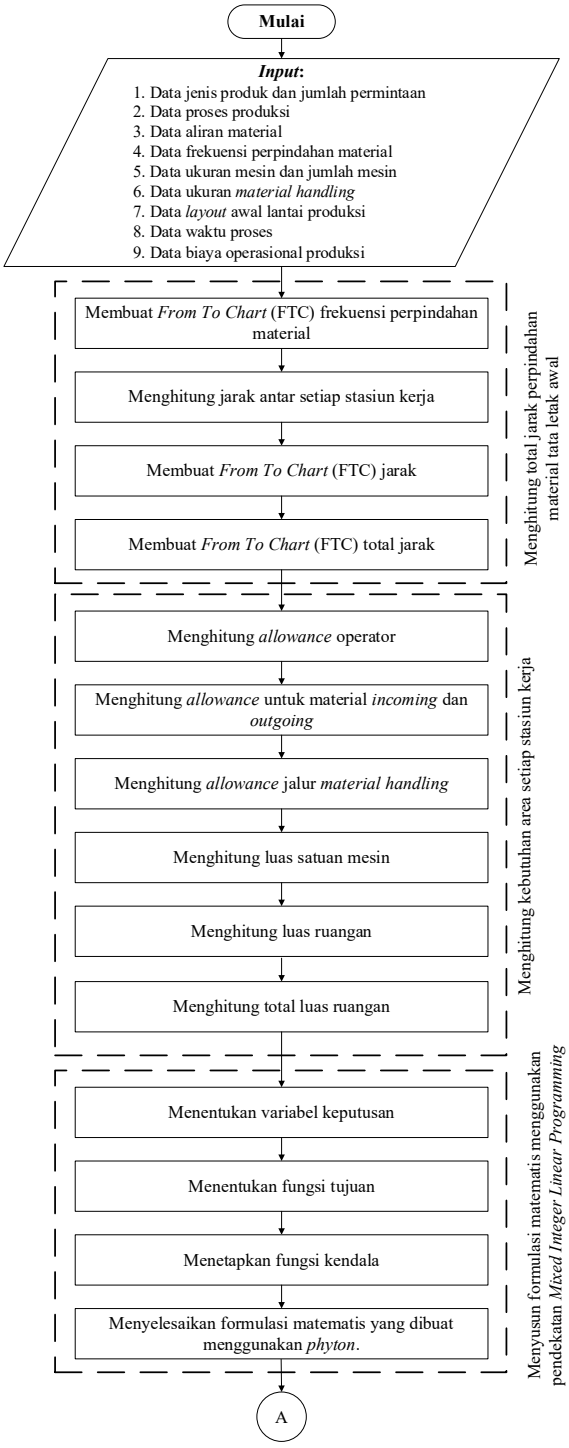
   a. Menghitung biaya relokasi departemen permesinan dengan Persamaan (2.1) dan departemen tanpa mesin atau manual dengan Persamaan (2.2). Setelah itu, kedua biaya tersebut dijumlahkan menggunakan Persamaan (2.3).
   b. Menghitung volume defisit produksi untuk mengetahui kerugian absolut saat proses relokasi menggunakan Persamaan (2.4).
   c. Menghitung efisiensi waktu *material handling* setelah perbaikan tata letak menggunakan persamaan (2.5).
   d. Menghitung surplus produksi harian akibat efisiensi jarak menggunakan Persamaan (2.6).
   e. Menghitung titik impas akibat deifisit selama proses relokasi departemen dan surplus setelah relokasi departemen menggunakan Persamaan (2.7).

10. Melakukan analisis sensitivitas terhadap model tata letak usulan

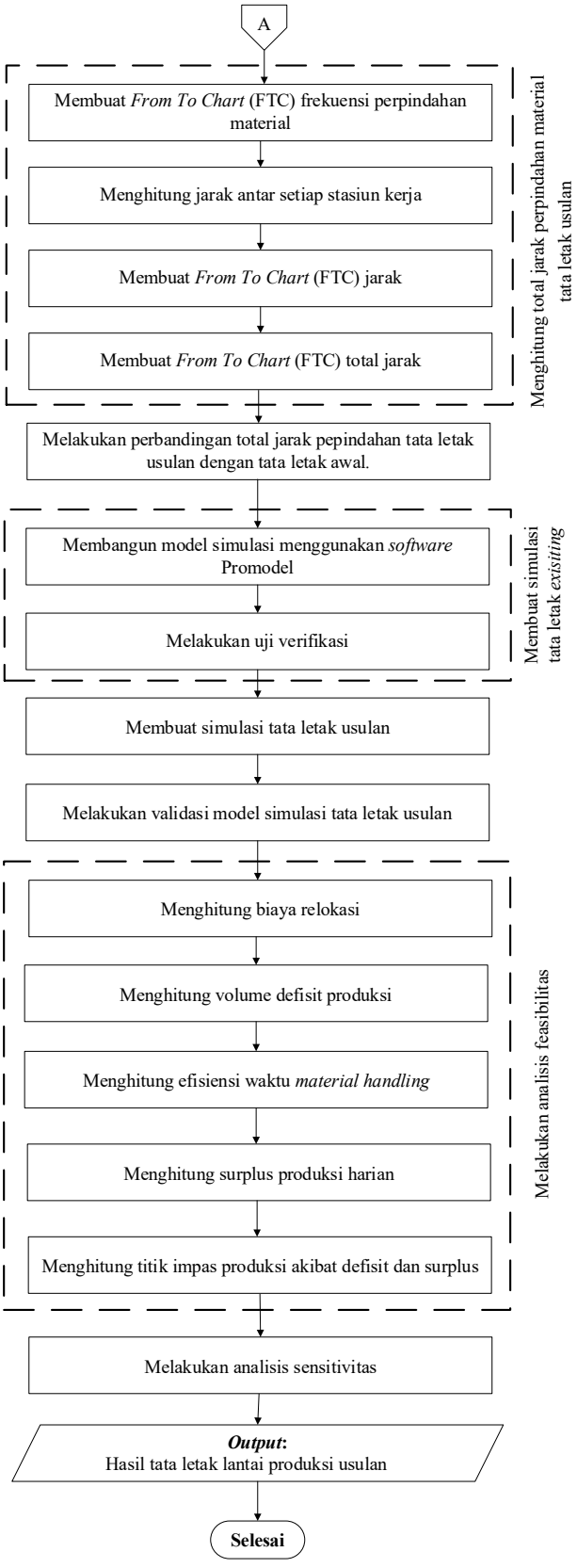
    Tahapan terakhir dalam pengolahan data adalah melakukan analisis sensitivitas dengan memvariasikan nilai parameter frekuensi aliran

perpindahan material sebagai variabel *input*, sehingga model dapat diuji pada kondisi operasional yang berbeda.

Berikut adalah *flowchart* dari langkah pengolahan data yang dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.3 *Flowchart* pengolahan data



Gambar 3.3 *Flowchart* pengolahan data (lanjutan)

3.6 Analisis Hasil

Analisis hasil merupakan tahap yang digunakan untuk menilai *output* pengolahan data setelah proses perancangan selesai dilakukan. Hasil evaluasi tersebut digunakan sebagai dasar untuk menilai efektivitas rancangan tata letak usulan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil secara matematis, melakukan validasi simulasi operasional, dan melakukan analisis sensitivitas terhadap model yang dikembangkan.

Analisis dimulai dengan membandingkan total jarak perpindahan material antara tata letak awal dan tata letak hasil optimasi menggunakan model MILP. Perhitungan jarak dilakukan dengan metode *Rectilinear* karena sesuai dengan pola perpindahan material di lantai produksi yang mengikuti jalur tegak lurus antar departemen. Hasil optimasi kemudian dievaluasi berdasarkan tingkat penurunan total jarak perpindahan material yang dicapai dibandingkan tata letak awal.

Tahap analisis selanjutnya dilakukan melalui validasi model simulasi *discrete-event* setelah perbandingan jarak perpindahan material selesai dilakukan. Validasi dilakukan dengan membandingkan model simulasi tata letak awal, model simulasi tata letak usulan hasil optimasi MILP, dan tata letak dengan penempatan manual. Analisis simulasi berfokus untuk melihat apakah pengurangan jarak perpindahan material mampu mengurangi waktu yang digunakan untuk aktivitas *material handling* sehingga waktu produktif dan *output* produksi dapat meningkat.

Analisis feasibilitas pada penelitian ini difokuskan pada pengkajian aspek ekonomi yang berkaitan dengan pelaksanaan relokasi tata letak fasilitas. Analisis dilakukan terhadap dampak ekonomi yang dapat timbul selama proses pemindahan berlangsung. Melalui analisis ini, tata letak usulan diharapkan dapat diterapkan secara realistis tanpa memberikan beban biaya yang berlebihan bagi perusahaan.

Analisis sensitivitas dilakukan pada tahap akhir penelitian untuk mengevaluasi keandalan tata letak usulan terhadap perubahan kondisi operasional. Analisis ini dilakukan dengan mengubah variabel *input* frekuensi perpindahan material. Hasil yang diperoleh digunakan untuk menilai apakah tata letak hasil optimasi MILP mampu memberikan kinerja yang baik ketika perusahaan menghadapi perubahan kondisi produksi atau peningkatan kapasitas di masa depan.

3.7 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran disusun berdasarkan seluruh hasil analisis yang diperoleh selama penelitian. Kesimpulan diperoleh dari hasil analisis dan validasi yang telah dilakukan untuk menjawab tujuan penelitian terkait minimasi jarak *material handling* serta peningkatan *output* produksi. Bagian ini juga memuat rekomendasi praktis bagi pihak manajemen perusahaan mengenai penerapan tata letak usulan serta saran bagi penelitian selanjutnya untuk mengembangkan metode dan parameter penelitian.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan

Data jenis produk dan jumlah permintaan digunakan sebagai dasar untuk memahami kondisi operasional di lantai produksi. Jumlah permintaan produk *Carton Box* dan *Die Cut Box* digunakan untuk mengidentifikasi tingkat aliran material pada setiap departemen. Data jenis produk dan jumlah permintaan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan

No	Jenis Produk	Kategori Produk	Jumlah Permintaan (Pcs)
1	AFM-25	*Carton Box*	900
2	BAKERY BOX	*Carton Box*	2000
3	BLCH-200	*Carton Box*	400
4	BLDC-200	*Carton Box*	735
5	BLOD-235	*Carton Box*	560
6	BLP-200	*Carton Box*	365
7	BLP-250	*Carton Box*	965
8	BOX AIR MINERAL	*Carton Box*	5950
9	BOX ANTISEPTIK	*Carton Box*	430
10	BOX APRON	*Carton Box*	700
11	BOX CAT	*Carton Box*	600
12	BOX CRACKER	*Carton Box*	525
13	BOX KOSMETIK B	*Carton Box*	500
14	BOX MASKER	*Carton Box*	650
15	BOX PECI	*Carton Box*	3950
16	BOX SEREAL	*Carton Box*	700
17	BOX-2433	*Carton Box*	540
18	BOX-6040	*Carton Box*	500
19	DL-10	*Carton Box*	1320
20	DL-10,5	*Carton Box*	770
21	DL-12,5	*Carton Box*	1515
22	DL-13,5	*Carton Box*	905
23	DL-14	*Carton Box*	405
24	DL-2030	*Carton Box*	950
25	DL-24	*Carton Box*	340

Tabel 4.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan (lanjutan)

No	Jenis Produk	Kategori Produk	Jumlah Permintaan (Pcs)
26	DL-28	*Carton Box*	230
27	DL-2830	*Carton Box*	340
28	DL-3,5	*Carton Box*	2570
29	DL-30	*Carton Box*	300
30	DL-32	*Carton Box*	430
31	DL-4	*Carton Box*	1370
32	DL-4,5	*Carton Box*	1040
33	DL-40	*Carton Box*	260
34	DL-5,5	*Carton Box*	2170
35	DL-6,5	*Carton Box*	1995
36	DL-7,5	*Carton Box*	2085
37	DL-8,5	*Carton Box*	2200
38	DL-9,5	*Carton Box*	685
39	FC-5,5	*Carton Box*	650
40	HR-7	*Carton Box*	650
41	LD-10	*Carton Box*	1800
42	LD-12	*Carton Box*	820
43	LD-1420	*Carton Box*	560
44	LD-1730	*Carton Box*	230
45	LD-5	*Carton Box*	460
46	LD-5,5	*Carton Box*	1080
47	LD-6,5	*Carton Box*	1505
48	LD-7,5	*Carton Box*	390
49	ME-045	*Carton Box*	150
50	ME-047	*Carton Box*	235
51	ME-048	*Carton Box*	200
52	OT-15	*Carton Box*	135
53	OT-225	*Carton Box*	570
54	OT-30	*Carton Box*	120
55	PH-10	*Carton Box*	450
56	PH-18	*Carton Box*	455
57	PH-20	*Carton Box*	560
58	R-2030	*Carton Box*	1220
59	SB-6100	*Carton Box*	1600
60	SG-330	*Carton Box*	2780
61	TP-25	*Carton Box*	425
62	VT-20	*Carton Box*	600
63	VT-25	*Carton Box*	1015

Tabel 4.1 Data jenis produk dan jumlah permintaan (lanjutan)

No	Jenis Produk	Kategori Produk	Jumlah Permintaan (Pcs)
64	VT-30	*Carton Box*	590
65	BF-1220	*Die Box*	1800
66	BK-8510	*Die Box*	450
67	BOX BANDANA	*Die Box*	500
68	BOX BOLU	*Die Box*	500
69	BOX CUP	*Die Box*	500
70	BOX HANDLE	*Die Box*	5610
71	BOX KOSMETIK K	*Die Box*	2000
72	BOX MAKAN	*Die Box*	1400
73	BOX PIZZA	*Die Box*	7000
74	BOX RESTO	*Die Box*	700
75	BOX SC	*Die Box*	900
76	BOX SEDOTAN	*Die Box*	500
77	BOX SUPLEMEN	*Die Box*	500
78	CC-10,5	*Die Box*	450
79	CC-11,5	*Die Box*	2505
80	CC-12,5	*Die Box*	3190
81	CC-6	*Die Box*	2610
82	CC-6,6	*Die Box*	890
83	CC-7,5	*Die Box*	1385
84	CC-8,5	*Die Box*	760
85	CC-9,5	*Die Box*	2015
86	CL-274	*Die Box*	2500
87	KT-10	*Die Box*	300
88	LP-17	*Die Box*	920
89	OT-16	*Die Box*	520
90	OT-25	*Die Box*	1200
91	OT-6,7	*Die Box*	1700

4.1.2 Data aliran material

Data aliran material menggambarkan bagaimana material berpindah dari satu stasiun kerja ke stasiun kerja lainnya selama proses manufaktur berlangsung. Pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung di area produksi dan wawancara dengan supervisor produksi. Pemetaan aliran material tersebut digunakan untuk menentukan titik asal (i) dan titik tujuan (j) dalam model matematis. Data aliran material dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data aliran material

Departemen Awal	Departemen Tujuan	*Material Handling* yang Digunakan
MP	MP-DC	*Hand Pallet*
	MP-SL	*Hand Pallet*
DC	DC-MS	*Hand Pallet*
	DC-LM	*Hand Pallet*
	DC-ST	*Hand Pallet*
	DC-SP	*Hand Pallet*
SL	SL-PT	*Hand Pallet*
PT	PT-MS	*Hand Pallet*
	PT-LM	*Hand Pallet*
	PT-ST	*Hand Pallet*
	PT-SP	*Hand Pallet*
MS	MS-LM	Manual
	MS-ST	Manual
	MS-SP	Manual
LM	LM-ST	Manual
	LM-SP	Manual
ST	ST-SP	Manual

4.1.3 Data produksi harian

Data produksi harian berisi informasi mengenai jumlah produk yang berhasil diproses dalam satu hari yang disusun berdasarkan rekapitulasi pesanan pada Tabel 4.1. Data tersebut digunakan untuk menunjukkan kondisi awal sebelum dilakukan perbaikan. Data tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi ProModel untuk mengevaluasi apakah simulasi tata letak awal dapat merepresentasikan kondisi nyata dan untuk mengetahui besarnya peningkatan *output* produksi setelah tata letak usulan diterapkan. Rincian *output* produksi harian dapat dilihat pada Lampiran LC.1. Rangkuman produksi harian dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data produksi harian

No	Tanggal	Jumlah Produksi (Pcs)/Hari	
		Carton Box	***Die Box***
1	1/12/2025	1400	1700
2	2/12/2025	2050	1600
3	3/12/2025	2390	1700

Tabel 4.3 Data produksi harian (lanjutan)

No	Tanggal	Jumlah Produksi (Pcs)/Hari	
		Carton Box	***Die Box***
4	4/12/2025	-	3500
5	5/12/2025	2510	1400
6	6/12/2025	3600	-
7	8/12/2025	3830	1200
8	9/12/2025	1590	2450
9	10/12/2025	3500	-
10	11/12/2025	2030	1400
11	12/12/2025	1740	1700
12	13/12/2025	1800	1550
13	15/12/2025	3860	2650
14	16/12/2025	1600	1550
15	17/12/2025	2210	1300
16	18/12/2025	2750	1805
17	19/12/2025	1675	1800
18	20/12/2025	1900	2500
19	22/12/2025	1520	1750
20	23/12/2025	1590	1200
21	24/12/2025	4090	-
22	25/12/2025	3620	1000
23	26/12/2025	1250	1800
24	27/12/2025	1750	1070
25	29/12/2025	3485	2570
26	30/12/2025	2650	1550
27	31/12/2025	1710	1600
	Total	62100	42345

4.1.4 Data frekuensi perpindahan material

Data frekuensi perpindahan material digunakan untuk menunjukkan tingkat perpindahan material antar departemen dalam satu periode produksi. Data tersebut digunakan sebagai variabel pengali (f_{ij}) dalam fungsi tujuan model MILP. Parameter frekuensi dikalikan dengan jarak perpindahan untuk mengukur efisiensi jarak operasional, serta sebagai variabel yang divariasikan pada analisis sensitivitas. Rincian frekuensi perpindahan material harian disajikan pada Lampiran LC.2 sampai LC.28. Data frekuensi perpindahan material dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data frekuensi perpindahan material

Departemen Awal	Departemen Tujuan	Frekuensi Perpindahan/Hari
MP	MP-DC	26
	MP-SL	37
DC	DC-SB	20
	DC-LM	-
	DC-ST	-
	DC-SP	19
SL	SL-PT	34
PT	PT-SB	31
	PT-LM	3
	PT-ST	-
	PT-SP	-
SB	SB-ST	1
	SB-LM	29
	SB-SP	1
ST	ST-SP	1
LM	LM-SP	32
Total		234

4.1.5 Data ukuran mesin dan jumlah mesin

Data ukuran dan jumlah mesin merupakan parameter fisik yang merepresentasikan dimensi panjang, dimensi lebar, dan jumlah unit fasilitas pada masing-masing departemen. Pengumpulan data dilakukan dengan cara mengukur langsung kondisi aktual di lantai produksi. Data dimensi yang diperoleh kemudian digunakan sebagai masukan awal (P_i dan L_i) pada model MILP serta digunakan sebagai dasar matematis untuk mengaktifkan variabel biner dalam kendala pemilihan konfigurasi. Data ukuran mesin dan jumlah mesin dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data ukuran mesin dan jumlah mesin

No.	Nama Departemen	Kode	Ukuran		Jumlah Mesin/Meja
			Panjang (m)	Lebar (m)	
1	Mesin Potong	MP	3,3	1	2
2	Mesin *Pond Die Cutting*	DC	2,17	2,14	1
3	Mesin *Slotter*	SL	2,57	1,1	1

Tabel 4.5 Data ukuran mesin dan jumlah mesin (lanjutan)

No.	Nama Departemen	Kode	Ukuran		Jumlah Mesin/Meja
			Panjang (m)	Lebar (m)	
4	Mesin *Pond* Tumpul	PT	1,9	1,63	1
5	Meja Sablon	SB	1,5	1	7
6	Mesin *Stapler*	ST	1,58	0,55	1
7	Meja Pengeleman	LM	2,46	1,22	2
8	Mesin *Strapping*	SP	1,5	0,59	1

4.1.6 Data ukuran *material handling*

Data ukuran *material handling* berisi informasi mengenai ukuran fisik alat angkut yang digunakan di lantai produksi. Adapun *material handling* yang digunakan yaitu *hand trolley, hand pallet*, dan *forklift*. Hasil pengukuran setiap alat digunakan untuk menentukan kebutuhan ruang gerak (*allowance*) setiap departemen. Data ukuran *material handling* dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data ukuran *material handling*

Nama *Material Handling*	Ukuran *Material Handling*	
	P (m)	L (m)
Forklift	3,48	1,1
Hand Pallet	1,5	0,55

4.1.7 Data *layout* awal lantai produksi

Data tata letak awal menunjukkan posisi fasilitas yang digunakan saat ini pada lantai produksi dengan luas 684 m². Data tata letak awal digunakan sebagai kondisi awal untuk membandingkan efisiensi tata letak hasil optimasi dan sumber untuk menentukan koordinat titik pusat setiap departemen. Data *layout* awal lantai produksi dapat dilihat pada Gambar 3.1.

4.1.8 Data waktu proses

Data waktu proses digunakan untuk mengetahui lama pengerjaan materia1 pada setiap departemen selama proses produksi berlangsung. Data ini diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan metode *stopwatch time study* terhadap aktivitas operator di lapangan. Data tersebut digunakan sebagai salah satu parameter utama dalam membangun model simulasi *discrete-event* pada *software* ProModel. Karena operator juga bertugas melakukan *material handling*, data waktu

proses dibandingkan dengan efisiensi waktu perpindahan material untuk melihat pengaruhnya terhadap peningkatan waktu produktif dan *output* produksi. Data waktu proses setiap stasiun kerja dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data waktu proses

No	Departemen	Waktu Proses/Produk (detik)
1	Mesin Potong	8,6
2	Mesin *Slotter*	11,2
3	Mesin *Pond Die Cutting*	5,62
4	Meja Sablon	3,7
5	Mesin *Pond* Tumpul	3,2
6	Meja Pengeleman	1,7
7	Mesin *Stapler*	7,88
8	Mesin *Strapping*	1,2

4.1.9 Data biaya operasional produksi

Data biaya operasional produksi dikumpulkan untuk menghitung biaya yang berkaitan dengan aktivitas produksi di lantai produksi yang terdiri dari gaji supervisor produksi, gaji operator produksi, dan bahan bakar *forklift* yang berupa gas LPG 5,5 kg. dengan harga Rp103.000. Berdasarkan data dari perusahaan, gaji bulanan supervisor produksi sebesar Rp3.600.000 dan operator produksi sebesar Rp2.400.000. Jika diasumsikan terdapat empat minggu kerja efektif dalam satu bulan dan terdapat enam hari kerja setiap minggu dengan delapan jam kerja per hari, maka total waktu kerja mencapai 192 jam per bulan. Hasil konversi menunjukkan bahwa tarif upah per jam sebesar Rp18.750 untuk supervisor produksi dan Rp12.500 untuk operator produksi. Sementara itu, *forklift* menghabiskan 3,5 kg gas LPG dalam 1 jam operasi maka biaya operasi *forklift* adalah Rp56.181,82 perjam.

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Menghitung total jarak perpindahan material tata letak awal

a. Membuat *From To Chart* (FTC) frekuensi perpindahan material

FTC frekuensi perpindahan material disusun berdasarkan rata-rata perpindahan material dari satu departemen ke departemen lain seperti

yang terdapat pada Tabel 4.4. Kemudian penyusunannya disesuaikan dengan Tabel 2.1 agar dapat menggambarkan aliran material dengan lebih detail. FTC frekuensi perpindahan material dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 FTC perpindahan material tata letak awal

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
MP		26	37						63
DC					20			19	39
SL				34					34
PT					31		3		34
SB						1	29	1	31
ST								1	1
LM								32	32
SP									0
Total	0	26	37	34	51	1	32	53	234

b. Menghitung jarak antar setiap departemen

Perhitungan jarak antar departemen pada tata letak awal dimulai dengan menetapkan titik di sudut kiri bawah denah lantai produksi sebagai titik acuan koordinat kartesius $(0, 0)$. Ukuran panjang dan lebar setiap departemen diperoleh dari hasil konversi skala denah, yaitu 1cm pada gambar merepresentasikan 1m pada kondisi nyata di lantai produksi. Hasil konversi tersebut digunakan untuk menentukan titik koordinat pusat setiap departemen. Koordinat tersebut kemudian digunakan untuk menghitung jarak perpindahan material antar departemen menggunakan Persamaan (2.1). Perhitungan jarak setiap departemen dapat dilihat pada Lampiran LB.2 sampai LB.13.

c. Membuat *From To Chart* (FTC) jarak

Hasil perhitungan jarak antar departemen tata letak awal kemudian disusun dalam bentuk FTC. Pengisian nilai jarak pada FTC dilakukan pada pasangan departemen yang memiliki aliran material. Jika tidak terdapat aliran material, maka nilai frekuensinya adalah nol. Perhitungan jarak pada departemen yang tidak saling berhubungan akan

menghasilkan data yang tidak digunakan dalam proses optimasi. FTC jatak antar departemen dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 FTC jarak antar departemen tata letak awal

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
MP		13,855	19,605						33,460
DC					9,497			30,837	40,334
SL				4,946					4,946
PT					21,101		37,828		58,929
SB						11,235	16,727	21,341	49,303
ST								10,106	10,106
LM								4,614	4,614
SP									0
Total	0	13,855	19,605	4,946	30,598	11,235	54,555	66,898	202

d. Membuat *From To Chart* (FTC) total jarak perpindahan material

Evaluasi terhadap tata letak awal dilakukan dengan menghitung total jarak perpindahan material pada seluruh proses produksi. Perhitungan tersebut menggunakan FTC frekuensi aliran material dan FTC jarak antar departemen. Proses perhitungan ini dilakukan sesuai dengan Persamaan (2.10). Hasil perkalian ini menunjukkan besarnya beban perpindahan material pada setiap lintasan yang digunakan. FTC total perpindahan material dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 FTC total jarak perpindahan material tata letak awal

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
MP		360,235	725,370						1085,605
DC					189,930			585,909	775,839
SL				168,161					168,161
PT					654,137		113,485		767,622
SB						11,235	485,083	21,341	517,659
ST								10,106	10,106
LM								147,642	147,642
SP									
Total	0	360,235	725,370	168,161	844,067	11,235	598,568	764,997	3472,633

4.2.2 Menghitung kebutuhan area setiap departemen

Perhitungan kebutuhan area lantai produksi dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi fisik mesin dan *allowance* yang diperlukan. Penambahan *allowance* ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap fasilitas memiliki ruang yang cukup untuk mendukung aktivitas selama kegiatan produksi berlangsung. Perhitungan untuk menentukan *allowance* operator dihitung menggunakan Persamaan (2.11) dan digunakan untuk menyediakan ruang gerak yang memadai bagi operator saat bekerja. Selain ruang untuk operator, perhitungan juga memperhitungkan kebutuhan area sebagai tempat penyimpanan sementara material. Area tersebut dibedakan menjadi *incoming* yang berfungsi sebagai tempat penampungan material sebelum diproses dan *outgoing* yang digunakan untuk menyimpan produk atau material yang telah selesai diproses sebelum dipindahkan ke stasiun kerja berikutnya. Penyediaan area ini bertujuan untuk menjaga kelancaran aliran material dan menghindari terjadinya penumpukan yang dapat menghambat proses produksi apabila terjadi perbedaan kecepatan kerja antar departemen. Selanjutnya, dilakukan perhitungan *allowance* jalur *material handling* menggunakan Persamaan (2.12) untuk mempertimbangkan kebutuhan ruang yang digunakan alat *material handling* saat melakukan proses pemindahan material. Setelah seluruh komponen *allowance* dihitung, langkah berikutnya adalah menentukan luas area untuk mesin menggunakan Persamaan (2.14) berdasarkan dimensi panjang dan lebar mesin yang digunakan pada masing-masing departemen. Kebutuhan luas operasional efektif untuk setiap departemen dihitung menggunakan Persamaan (2.15) dengan menjumlahkan luas mesin dan seluruh kebutuhan ruang tambahan. Perhitungan terakhir dilakukan dengan mengalikan luas operasional efektif setiap mesin dengan jumlah mesin yang terdapat pada masing-masing departemen menggunakan Persamaan (2.18). Nilai hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai parameter dimensi panjang (P_i dan L_i) dalam penyusunan kendala *non-overlapping* pada model optimasi tata letak perusahaan. Perhitungan luas area yang diperlukan untuk setiap stasiun kerja dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perhitungan kebutuhan area setiap departemen

No.	Nama Departemen	Kode	Ukuran		Jumlah Mesin/Meja	Luas Mesin (m²)	*Allowance*									Transportasi	Luas Fasilitas (m²)	Luas Departemen (m²)	Total Luas Departemen (m²)
							Incoming			*Outgoing*			Operator						
			Panjang (m)	Lebar (m)			P (m)	L (m)	Luas (m²)	P (m)	L (m)	Luas (m²)	P (m)	L (m)	Luas (m²)				
1	Mesin Potong	MP	3,3	1	2	3,3	1,2	1,2	1,44	1,2	2	2,4	4,2	1	4,2	4,176	11,34	43,8	87,514
2	Mesin *Pond Die Cutting*	DC	2,17	2,14	1	4,6438	2,14	1,2	2,568	2,14	1,2	2,568	4,57	1	4,57	1,8	14,3498	25,654	25,654
3	Mesin *Slotter*	SL	2,57	1,1	1	2,827	2,1	1,2	2,52	2,1	1,2	2,52	2,57	1	2,57	1,8	10,437	17,997	17,997
4	Mesin *Pond* Tumpul	PT	1,9	1,63	1	3,097	1,9	1,2	2,28	1,9	1,2	2,28	4,03	1	4,03	1,8	11,687	22,127	22,127
5	Meja Sablon	SB	1,5	1	7	1,5	1	0,6	0,6	1	0,6	0,6	2,7	1	2,7	1	5,4	9,4	65,800
6	Mesin *Stapler*	ST	1,58	0,55	1	0,869	1,58	1,2	1,896	1,58	1,2	1,896	2,95	1	2,95	1	7,611	12,771	12,771
7	Meja Pengeleman	LM	2,46	1,22	2	3,0012			0	1,2	1,2	1,44	3,66	1	3,66	1	8,1012	12,565	25,130
8	Mesin *Strapping*	SP	1,5	0,59	1	0,885	1,2	1,2	1,44	1,5	1,2	1,8	3,9	1	3,9	1,8	8,025	18,750	18,750

Penentuan dimensi departemen dilakukan berdasarkan total luas departemen yang telah ditentukan pada Tabel 4.9. Nilai luas tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan alternatif bentuk konfigurasi untuk masing-masing departemen. Alternatif konfigurasi tersebut diperoleh melalui berbagai kombinasi panjang dan lebar departemen ang berbeda. Kumpulan alternatif tersebut kemudian dimasukkan ke dalam Himpunan K. Penyusunan beberapa alternatif konfigurasi bertujuan agar proses optimasi tidak terbatas pada satu bentuk departemen saja dalam menentukan tata letak terbaik. Alternatif bentuk konfigurasi departemen dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Alternatif bentuk konfigurasi departemen

No.	Nama Departemen	Kode	Konfigurasi Departemen (P; L)
1	Mesin Potong	MP	(10,976;8,600), (20,152;4,300), (20,992;4,300)
2	Mesin Pond *Die Cutting*	DC	(8,120;3,140), (3,140;8,120)
3	Mesin *Slotter*	SL	(8,570;2,100), (2,100;8,570)
4	Mesin *Pond* Tumpul	PT	(7,630;2,900), (2,900;7,630)
5	Meja Sablon	SB	(26,900;2,000), (32,900;2,000), (10,000;6,700), (10,400;6,000), (11,400;6,000), (8,700;8,000), (8,000;8,700)
6	Mesin *Stapler*	ST	(4,950;2,580), (2,580;4,950)
7	Meja Pengeleman	LM	(5,660;4,440), (4,440;5,660), (10,320;2,220), (11,320;2,220)
8	Mesin *Strapping*	SP	(6,360;2,500), (2,500;6,360)

4.2.3 Menyusun formulasi matematis menggunakan pendekatan *Mixed Integer Linear Programming*

a. Menentukan variabel keputusan

Variabel keputusan yang digunakan dalam model MILP pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

x_i :Titik pusat koordinat stasiun kerja i pada sumbu X.

y_i :Titik pusat koordinat stasiun kerja i pada sumbu Y.

P_i :Dimensi panjang aktual dari stasiun kerja i setelah dievaluasi oleh algoritma.

L_i :Dimensi lebar aktual dari stasiun kerja i setelah dievaluasi oleh algoritma.

Y_{ik} :Variabel biner yang bernilai 1 jika konfigurasi dimensi k terpilih untuk stasiun kerja i, dan bernilai 0 jika tidak terpilih.

$z1_{ij}$:Variabel biner pengatur posisi absolut pertama untuk mencegah tumpang tindih (*non-overlapping*) antara stasiun kerja i dan stasiun kerja j.

$z2_{ij}$:Variabel biner pengatur posisi absolut kedua untuk mencegah tumpang tindih (*non-overlapping*) antara stasiun kerja i dan stasiun kerja j.

d_{ij} :Jarak perpindahan material akhir antara stasiun kerja i dan stasiun kerja j.

d_{ij}^{x} :Jarak rektilinear antara stasiun kerja $i$dan stasiun kerja j pada sumbu X.

d_{ij}^{y} :Jarak *rectilinear* antara stasiun kerja i dan stasiun kerja j pada sumbu Y.

x_{ij}^{+} :Variabel bantuan non-negatif penampung nilai deviasi positif selisih koordinat stasiun kerja i dan j pada sumbu X.

x_{ij}^{-} :Variabel bantuan non-negatif penampung nilai deviasi negatif selisih koordinat stasiun kerja i dan j pada sumbu X.

y_{ij}^{+} :Variabel bantuan non-negatif penampung nilai deviasi positif selisih koordinat stasiun kerja i dan j pada sumbu Y.

y_{ij}^{-} :Variabel bantuan non-negatif penampung nilai deviasi negatif selisih koordinat stasiun kerja i dan j pada sumbu Y.

b. Menentukan fungsi tujuan

Minimasi $T = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} f_{ij}\, d_{ij}$

c. Menetapkan fungsi kendala

$$x_{ij}^{+} = \begin{cases} (x_i - x_j), & \text{jika } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & \text{jika } (x_i - x_j) \leq 0 \end{cases}$$

$$x_{ij}^{-} = \begin{cases} -(x_i - x_j), & \text{jika } (x_i - x_j) \leq 0 \\ 0, & \text{jika } (x_i - x_j) > 0 \end{cases}$$

$$y_{ij}^{+} = \begin{cases} (y_i - y_j), & \text{jika } (y_i - y_j) > 0 \\ 0, & \text{jika } (y_i - y_j) \leq 0 \end{cases}$$

$$y_{ij}^{-} = \begin{cases} -(y_i - y_j), & \text{jika } (y_i - y_j) \leq 0 \\ 0, & \text{jika } (y_i - y_j) > 0 \end{cases}$$

$$x_i - x_j = x_{ij}^{+} - x_{ij}^{-} \quad \forall i < j$$

$$y_i - y_j = y_{ij}^{+} - y_{ij}^{-} \quad \forall i < j$$

$$d_{ij}^{x} = x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-} \quad \forall i < j$$

$$d_{ij}^{y} = y_{ij}^{+} + y_{ij}^{-} \quad \forall i < j$$

$$d_{ij} = x_{ij}^{+} + x_{ij}^{-} + y_{ij}^{+} + y_{ij}^{-} \quad \forall i < j$$

$$x_i \geq \frac{P_i}{2} \quad \forall i$$

$$y_i \geq \frac{L_i}{2} \quad \forall i$$

$$x_i + \frac{P_i}{2} \leq P_p \quad \forall i$$

$$y_i + \frac{L_i}{2} \leq L_p - 2{,}1 \quad \forall i$$

$$x_j - x_i + M(z1_{ij} + z2_{ij}) \geq \frac{P_i + P_j}{2} \quad \forall i < j$$

$$x_i - x_j + M(1 - z1_{ij} + z2_{ij}) \geq \frac{P_i + P_j}{2} \quad \forall i < j$$

$$y_j - y_i + M(z1_{ij} + 1 - z2_{ij}) \geq \frac{L_i + L_j}{2} \quad \forall i < j$$

$$y_i - y_j + M(1 - z1_{ij} + 1 - z2_{ij}) \geq \frac{L_i + L_j}{2} \quad \forall i < j$$

$$x_i = XF_i \quad \forall i \in F$$

$$y_i = YF_i \quad \forall i \in F$$

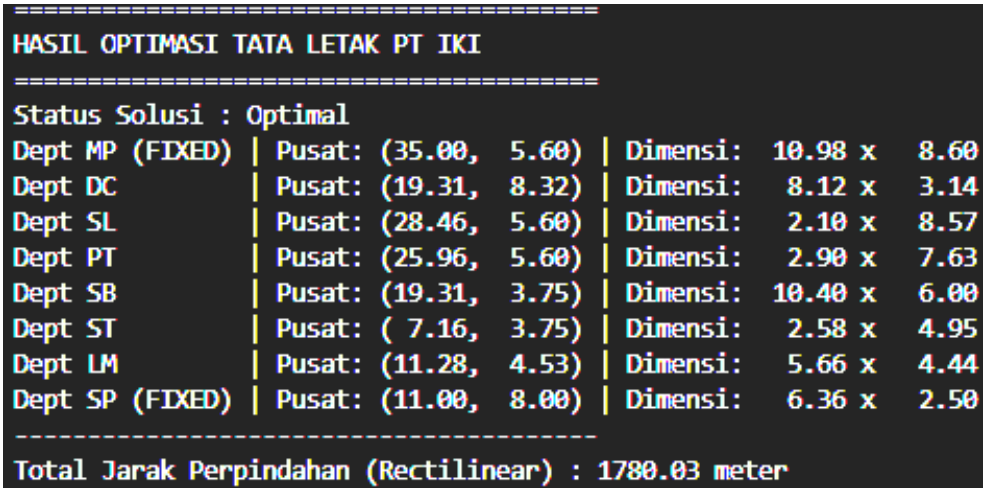
$$\sum_{k \in K_i} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N$$

$$P_i = \sum_{k \in K_i} P_{ik} \cdot Y_{ik} \quad \forall i \in N$$

$$L_i = \sum_{k \in K_i} L_{ik} \cdot Y_{ik} \quad \forall i \in N$$

d. Menyelesaikan formulasi matematis yang dibuat menggunakan *Python*
Formulasi matematis yang telah dibangun selanjutnya dijalankan menggunakan *solver* komputasi untuk mendapatkan konfigurasi tata letak yang paling baik. Penyelesaian model MILP dilakukan dengan bantuan bahasa pemrograman *Python* untuk melakukan komputasi yang

melibatkan banyak variabel dan kendala. Kode program yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran LE.2. Hasil optimasi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil optimasi *python code solver* MILP

Hasil tersebut menunjukkan total jarak perpindahan material yang didapatkan adalah 1780,03 meter.

4.2.4 Menghitung total jarak perpindahan material tata letak hasil optimasi

a. Menghitung jarak antar setiap departemen

Jarak antar departemen tata letak hasil optimasi dihitung dengan menggunakan titik sudut kiri bawah sebagai titik acuan koordinat. Panjang dan lebar setiap departemen digunakan untuk menentukan posisi titik pusat setiap departemen. Koordinat pusat tersebut digunakan untuk menghitung jarak dengan Persamaan (2.1). Perhitungan jarak setiap departemen dapat dilihat pada Lampiran LE.2 sampai LE.13.

b. Membuat *From To Chart* (FTC) jarak

Hasil perhitungan jarak antar departemen disusun dalam bentuk FTC untuk mempermudah analisis. Pasangan departemen yang tidak memiliki hubungan aliran, nilainya adalah nol sehingga tidak berpengaruh terhadap hasil perhitungan. FTC jarak antar departemen tata letak alternatif hasil optimasi ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 FTC jarak antar departemen tata letak hasil optimasi

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
MP		18,410	6,540						24,950
DC					4,570			8,316	12,886
SL				2,500					2,500
PT					8,500		15,750		24,250
SB						12,150	8,810	12,560	33,520
ST								8,090	8,090
LM								3,750	3,750
SP									0
Total	0	18,410	6,540	2,500	13,070	12,150	24,560	32,716	110

c. Membuat *From To Chart* (FTC) total jarak perpindahan material

Analisis tata letak hasil optimasi dilakukan dengan menghitung total jarak perpindahan material. Perhitungan ini menggunakan kombinasi data FTC frekuensi perpindahan dan FTC jarak antar departemen dengan Persamaan (2.10). Hasil perhitungan menunjukkan perpindahan material pada tata letak hasil optimasi. FTC total perpindahan material tata letak hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 FTC total jarak perpindahan antar departemen tata letak hasil optimasi

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
MP		478,660	241,980						720,640
DC					91,400			158,007	249,407
SL				85,000					85,000
PT					263,500		47,250		310,750
SB						12,150	255,490	12,560	280,200
ST								8,090	8,090
LM								120,000	120,000
SP									
Total	0	478,660	241,980	85,000	354,900	12,150	302,740	298,657	1774,087

4.2.5 Melakukan perbandingan total jarak perpindahan tata letak usulan dengan tata letak awal

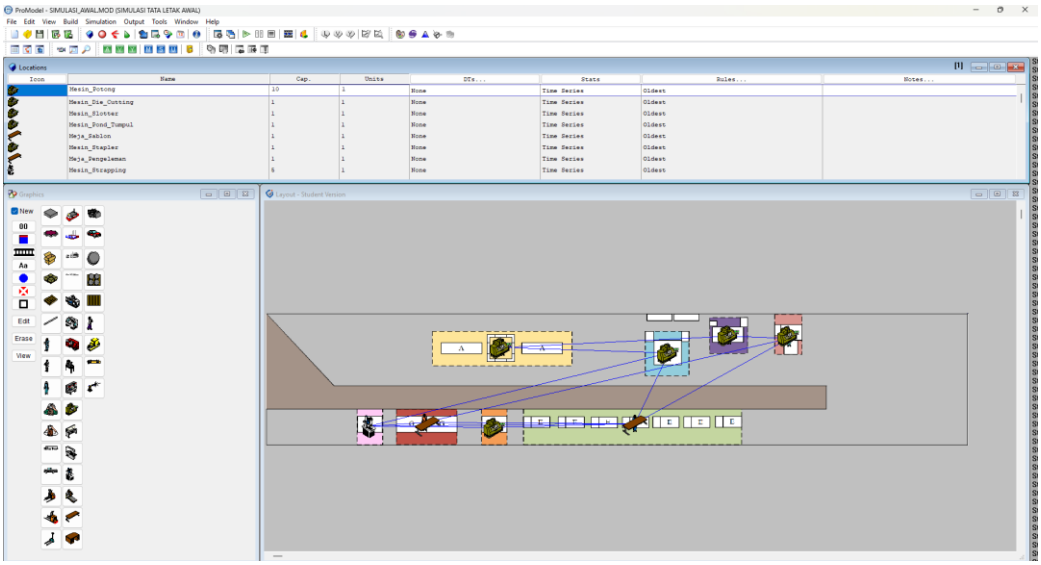
Penilaian terhadap tata letak dilakukan melalui perbandingan total jarak perpindahan material antara tata letak awal dan tata letak usulan. Tata letak awal

menghasilkan total jarak perpindahan sebesar 3.472,633 meter. Setelah dilakukan optimasi, didapatkan tata letak usulan yang menghasilkan total jarak perpindahan sebesar 1.774,087 meter. Hasil tersebut menunjukkan adanya pengurangan jarak perpindahan sebesar 1698,546 meter atau 48,91% lebih efisien dari tata letak awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa tata letak usulan mampu menurunkan jarak tempuh *material handling* sehingga perpindahan material menjadi lebih efisien. Gambar *template* rancangan tata letak usulan dapat dilihat pada Lampiran LD.1.

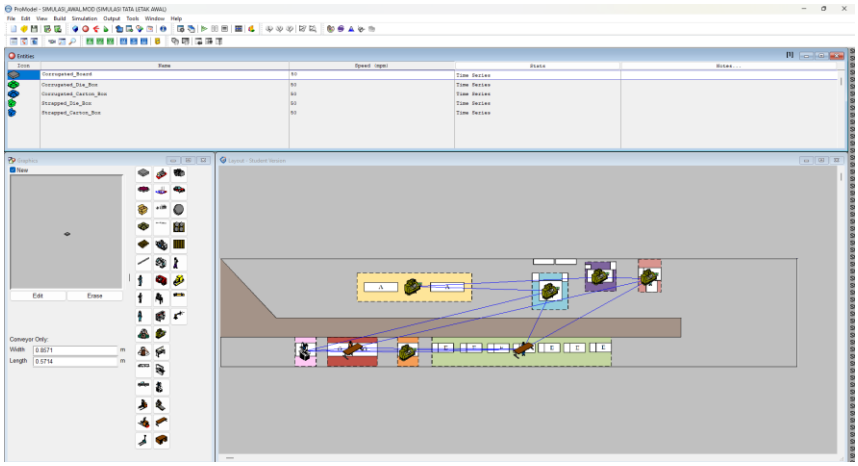
4.2.6 Membuat simulasi tata letak awal

a. Membangun model simulasi menggunakan *software* Promodel

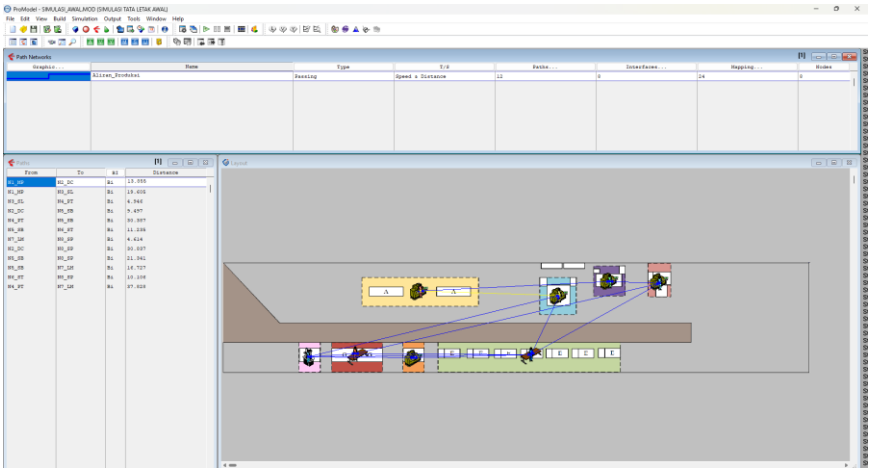
Model simulasi dibangun menggunakan *software* Promodel untuk menggambarkan kondisi nyata di lantai produksi. Pengembangan model dilakukan dengan berdasarkan dua data utama yaitu data waktu proses pada setiap departemen yang terdapat pada Tabel 4.7 serta data jarak perpindahan material pada tata letak awal yang terdapat pada Tabel 4.8. Model simulasi tata letak awal dapat dilihat pada Gambar 4.2 sampai 4.7.



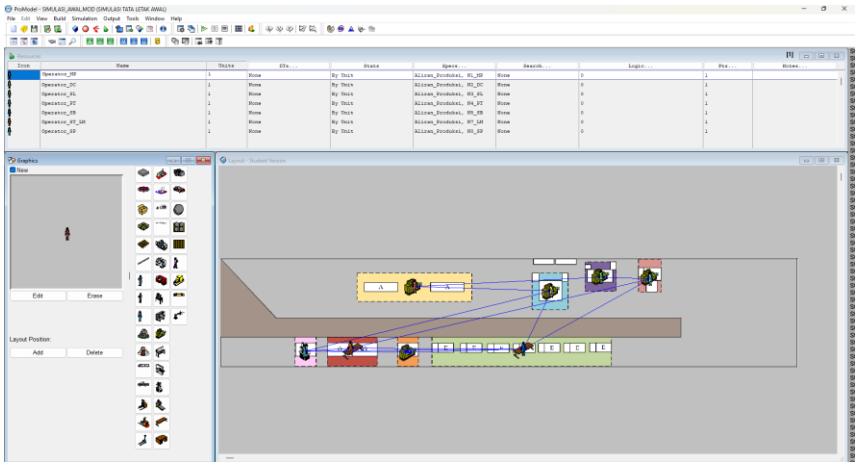
Gambar 4.2 *Build Location* simulasi tata letak awal



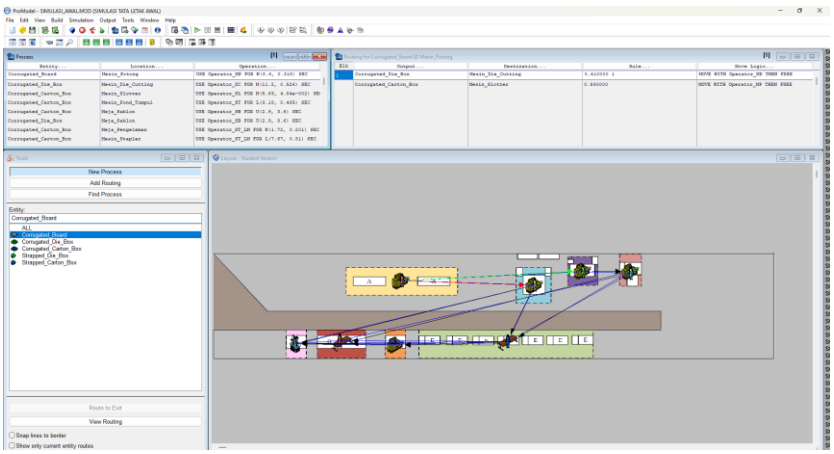
Gambar 4.3 *Build Entities* simulasi tata letak awal



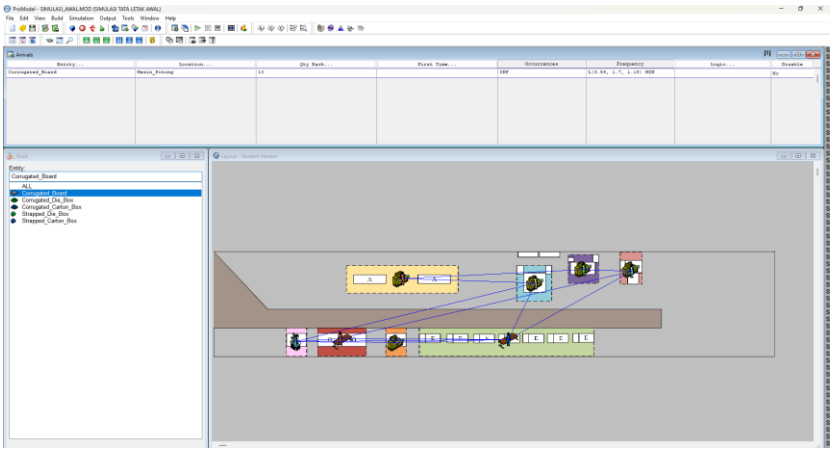
Gambar 4.4 *Build Path Network* simulasi tata letak awal



Gambar 4.5 *Build Resources* simulasi tata letak awal



Gambar 4.6 *Build Processing* simulasi tata letak awal



Gambar 4.7 *Build Arrival* simulasi tata letak awal

b. Melakukan uji verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa model simulasi telah disusun dengan benar sebelum digunakan dalam analisis. Pemeriksaan dilakukan terhadap aliran material, urutan proses produksi, dan logika pemrograman dalam ProModel.

c. Melakukan uji validasi

Uji validasi dilakukan dengan menggunakan *software* SPSS melalui pendekatan *Paired Sample T-Test* yang membandingkan dua kelompok data yang saling berpasangan. Perbandingan dilakukan antara data produksi harian perusahaan yang tertera pada Tabel 4.3 dengan data *output* yang dihasilkan oleh simulasi ProModel yang dapat dilihat pada

Lampiran LE.1 dan LE.2. Pengujian dievaluasi menggunakan nilai *p-value* sebagai dasar pengambilan keputusan. Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak awal pada SPSS dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Data_DB_Historis	1568.3333	27	788.17584	151.68451
	Data_DB_Simulasi_Awal	1401.4815	27	51.39992	9.89192
Pair 2	Data_CB_Historis	2300.0000	27	997.10832	191.89359
	Data_CB_Simulasi_Awal	2025.3704	27	57.36063	11.03906

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	Data_DB_Historis & Data_DB_Simulasi_Awal	27	-.318	.106
Pair 2	Data_CB_Historis & Data_CB_Simulasi_Awal	27	-.020	.919

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference Lower	Upper			
Pair 1	Data_DB_Historis - Data_DB_Simulasi_Awal	166.85185	805.98142	155.11120	-151.98378	485.68748	1.076	26	.292
Pair 2	Data_CB_Historis - Data_CB_Simulasi_Awal	274.62963	999.92973	192.43657	-120.92940	670.18866	1.427	26	.165

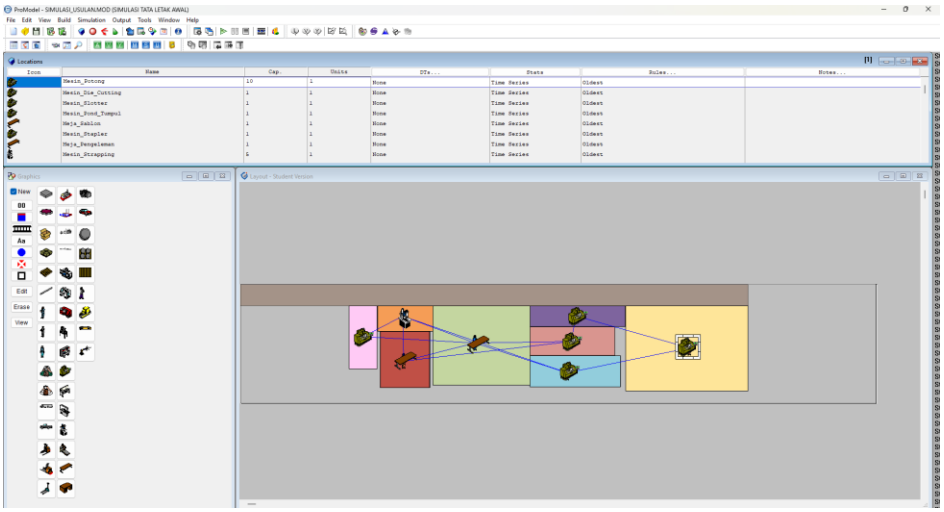
Gambar 4.8 Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak awal pada SPSS

Hasil uji *Paired Samples T-Test* tersebut menunjukkan rata-rata produksi harian *Die Cut Box* sebesar 1568,33 unit, sedangkan data simulasi menghasilkan rata-rata sebesar 1401,48 unit. Selisih tersebut diuji secara statistik dan menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,292. Karena nilai *Sig. (2-tailed)* tersebut lebih besar dari batas kritis 0,05 (0,292 > 0,05), maka dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi dengan data historis di lapangan, sehingga model simulasi untuk produk *Die Cut Box* dinyatakan valid. Sementara itu, pada pengujian produk *Carton Box*, diperoleh nilai rata-rata produksi historis sebesar 2300,00 unit dibandingkan dengan rata-rata *output* simulasi sebesar 2025,37 unit. Melalui tabel *Paired Samples Test*, uji signifikansi untuk produk *Carton Box* menghasilkan nilai *Sig. (2-tailed)* sebesar 0,165. Karena nilai signifikansi tersebut berada di atas 0,05 (0,165 > 0,05), maka dapat dinyatakan bahwa tidak ada perbedaan nyata antara performa model simulasi dengan sistem nyata di pabrik.

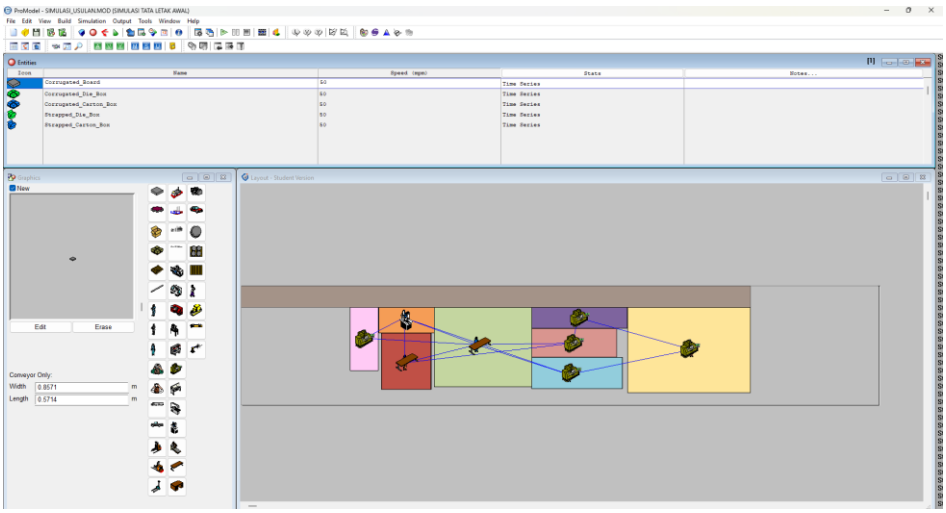
4.2.7 Membuat simulasi tata letak usulan

a. Membangun model simulasi menggunakan *software* Promodel

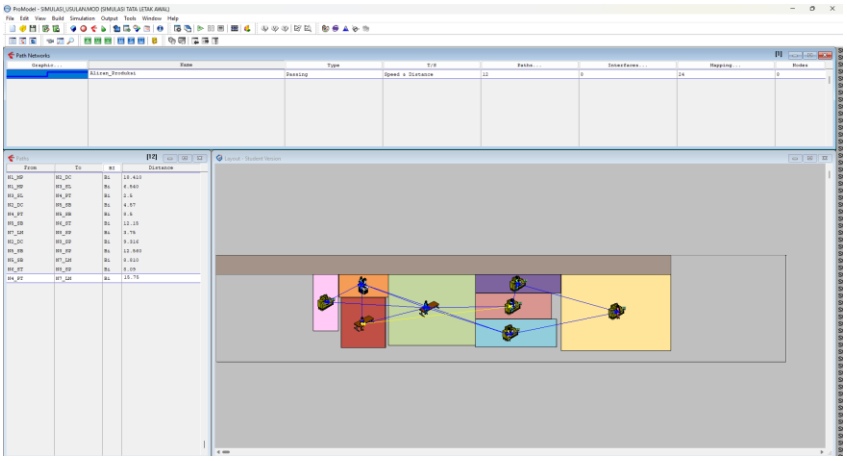
Pembangunan model simulasi tata letak usulan dilakukan dengan engan memperbarui posisi setiap departemen pada ProModel sesuai hasil optimasi MILP. Data waktu proses tetap menggunakan data pada kondisi awal sebagaimana tercantum pada Tabel 4.7. Sementara itu, data jarak perpindahan material diperbarui sesuai dengan hasil optimasi tata letak yang dapat dilihat pada Tabel 4.13. Model simulasi tata letak usulan dapat dilihat pada Gambar 4.9 sampai 4.14.



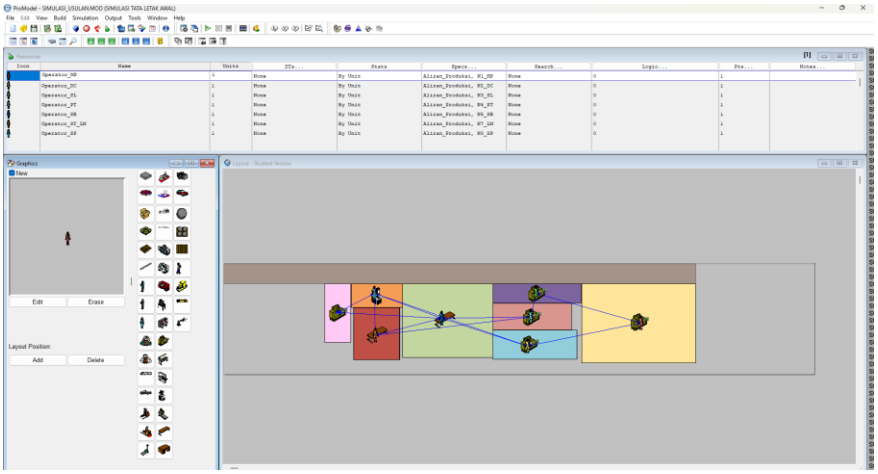
Gambar 4.9 *Build Location* simulasi tata letak usulan



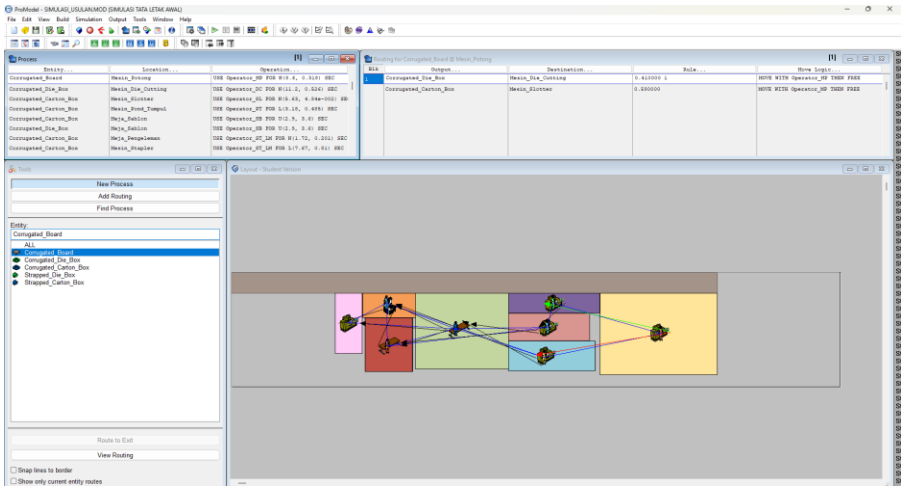
Gambar 4.10 *Build Entities* simulasi tata letak usulan



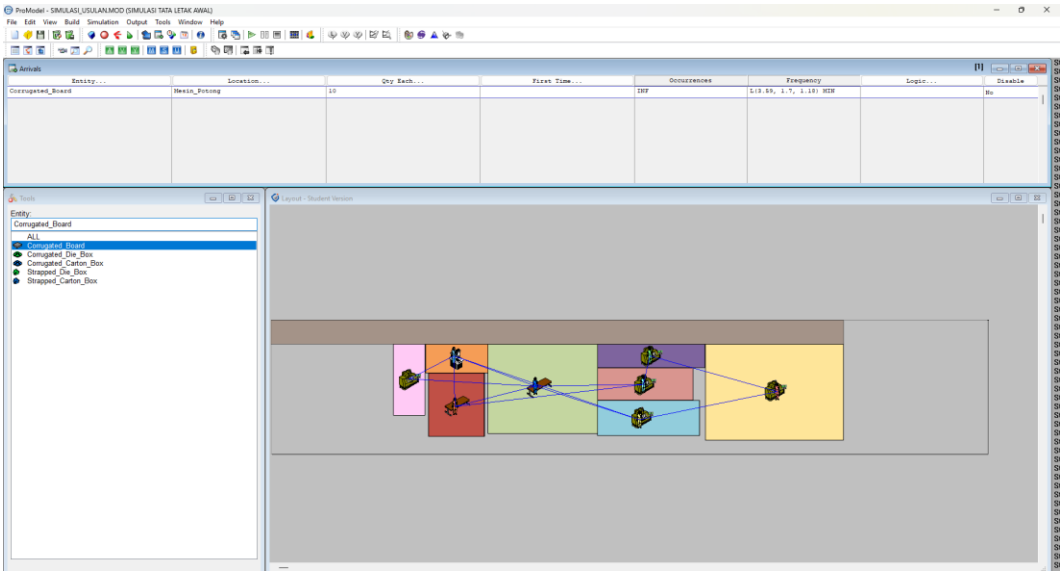
Gambar 4.11 *Build Path Network* simulasi tata letak usulan



Gambar 4.12 *Build Resources* simulasi tata letak usulan



Gambar 4.13 *Build Processing* simulasi tata letak usulan



Gambar 4.14 *Build Arrival* simulasi tata letak usulan

b. Melakukan uji verifikasi

Pengujian verifikasi dilakukan kembali untuk memastikan bahwa model simulasi usulan telah sesuai dengan perubahan tata letak yang dirancang. Pemeriksaan dilakukan pada jalur perpindahan material, posisi setiap entitas, dan logika pemrograman yang telah disesuaikan dengan tata letak baru. Pengujian ini seluruh perubahan telah diterapkan secara tepat dan model dapat berjalan sesuai rancangan.

4.2.8 Melakukan uji validasi simulasi tata letak usulan

Pengujian validasi pada tata letak usulan dilakukan dengan menggunakan *software* SPSS melalui uji *Paired Sample T-Test*. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui apakah perubahan tata letak memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan tata letak awal. Perbandingan dilakukan antara data produksi harian perusahaan hasil simulasi tata letak awal yang tertera pada Lampiran LE.1 dan LE.2 dengan data *output* yang dihasilkan oleh simulasi tata letak usulan yang dapat dilihat pada Lampiran LE.3 dan LE.4. Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak usulan pada SPSS dapat dilihat pada Gambar 4.15.

Paired Samples Statistics

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Data_DB_Simulasi_Awal	1401.4815	27	51.39992	9.89192
	Data_DB_Simulasi_Usulan	1810.0000	27	96.90400	18.64918
Pair 2	Data_CB_Simulasi_Awal	2025.3704	27	57.36063	11.03906
	Data_CB_Simulasi_Usulan	2540.7407	27	90.78402	17.47139

Paired Samples Correlations

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	Data_DB_Simulasi_Awal & Data_DB_Simulasi_Usulan	27	.044	.827
Pair 2	Data_CB_Simulasi_Awal & Data_CB_Simulasi_Usulan	27	.074	.714

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference Lower	Upper			
Pair 1	Data_DB_Simulasi_Awal - Data_DB_Simulasi_Usulan	-408.51852	107.67486	20.72204	-451.11327	-365.92376	-19.714	26	.000
Pair 2	Data_CB_Simulasi_Awal - Data_CB_Simulasi_Usulan	-515.37037	103.74642	19.96601	-556.41109	-474.32965	-25.812	26	.000

Gambar 4.15 Hasil uji *Paired Sample T-Test* simulasi tata letak usulan pada SPSS

Hasil uji *Paired Samples T-Test* menunjukkan adanya peningkatan rata-rata produksi harian *Die Cut Box* dari 1401,48 unit pada kondisi awal menjadi 1800 unit pada kondisi usulan. Melalui tabel *Paired Samples Test*, diperoleh nilai *Sig. (2-tailed)* sebesar 0,000, yang berada jauh di bawah ambang batas statistik 0,05 (0,000 < 0,05). Hal tersebut membuktikan bahwa terdapat perbedaan nyata yang sangat signifikan antara kedua kondisi tersebut. Produk *Carton Box* juga menunjukkan adanya peningkatan produksi dari 2025,37 unit pada kondisi awal menjadi 2540,74 unit pada kondisi usulan. Hasil uji signifikansi untuk produk *Carton Box* juga menunjukkan nilai *Sig. (2-tailed)* sebesar 0,000. Karena nilai signifikansi berada di bawah 0,05 (0,000 < 0,05), maka terdapat perbedaan nyata yang sangat signifikan antara kedua kondisi tersebut. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa skenario perubahan tata letak baru berhasil meningkatkan produktivitas untuk produk *Die Cut Box* dan *Carton Box.*

4.2.9 Melakukan analisis feasibilitas

Analisis feasibilitas difokuskan pada penilaian aspek ekonomi yang berkaitan dengan pelaksanaan relokasi tata letak fasilitas. Evaluasi dilakukan untuk menilai seluruh biaya dan dampak ekonomi yang mungkin muncul selama proses pemindahan setiap departemen di lantai produksi. Penilaian ini bertujuan untuk memastikan bahwa tata letak usulan dapat diterapkan secara nyata di perusahaan. Pertimbangan biaya relokasi menjadi dasar untuk memastikan bahwa proses perubahan tata letak tidak memberikan beban biaya yang berlebihan bagi pihak manajemen perusahaan. Analisis feasibilitas dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

a. Menghitung biaya relokasi departemen

   Perhitungan biaya relokasi dimulai dengan menentukan biaya pemindahan lima departemen mesin menggunakan Persamaan (2.1). Perhitungan ini mempertimbangkan upah *supervisor* produksi (W_{spv}),biaya penggunaan *forklift* (B_{fl}), dan durasi pekerjaan selama satu *shift* (8 jam), sehingga diperoleh biaya sebesar Rp599.454,55. Selanjutnya, biaya pemindahan tiga departemen non-mesin dihitung menggunakan Persamaan (2.2). Perhitungan ini mempertimbangkan upah operator (W_{opr}), jumlah operator yang bertugas (n),serta waktu pelaksanaan pekerjaan, sehingga menghasilkan biaya sebesar Rp300.000. Seluruh biaya relokasi kemudian digabungkan menggunakan Persamaan (2.3). Berdasarkan hasil tersebut, total biaya relokasi departemen (C_{total}) yang diperlukan untuk penerapan tata letak usulan adalah sebesar Rp899.454,55.

b. Menghitung volume defisit produksi akibat relokasi departemen

   Perhitungan defisit volume produksi (D_{vol}) dilakukan untuk mengetahui jumlah produksi yang hilang selama proses relokasi fasilitas berlangsung. Analisis ini menggunakan data historis rata-rata produksi per *shift* (P_{shift})pada kondisi tata letak awal perusahaan sebagai dasar perhitungan. Berdasarkan Persamaan (2.4), jumlah kehilangan produksi yang diperoleh adalah sebesar 3.904 pcs produk. Nilai tersebut

digunakan sebagai gambaran besarnya penurunan output yang harus ditanggung perusahaan selama penghentian sementara aktivitas produksi untuk pelaksanaan relokasi.

c. Menghitung efisiensi waktu *material handling*

Pengukuran efisiensi waktu *material handling* dilakukan dengan mengubah selisih jarak *Rectilinear* menjadi satuan waktu menggunakan Persamaan (2.5). Perhitungan ini menggunakan total jarak tata letak awal sebesar 3.472,633 meter, jarak tata letak usulan sebesar 1.774,087 meter, serta kecepatan *material handling* sebesar 0,5 meter per detik. Hasil perhitungan menunjukkan penghematan waktu operasional (Δt) sebesar 3.397,092 detik untuk setiap *shift* kerja. Nilai tersebut menunjukkan waktu yang berhasil dihemat melalui pengurangan jarak perpindahan material di lantai produksi.

d. Menghitung surplus produksi harian setelah relokasi departemen

Waktu yang telah dihemat kemudian dikonversi menjadi tambahan kapasitas produksi menggunakan Persamaan (2.6). Perhitungan dilakukan dengan membandingkan total penghematan waktu (Δt) terhadap rata-rata waktu siklus produksi sebesar 7,377 detik per pcs. Hasilnya menunjukkan potensi tambahan produksi (S_{vol})sebesar 460,51 pcs setiap *shift*. Peningkatan kapasitas tersebut membuktikan bahwa tata letak usulan mampu meningkatkan produktivitas serta membantu mengganti kehilangan produksi selama proses relokasi fasilitas.

e. Menghitung titik impas akibat defisit produksi dan surplus produksi

Perhitungan titik impas produksi dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan perusahaan dalam menutup kehilangan produksi setelah proses relokasi tata letak selesai menggunakan Persamaan (2.7). Perhitungan ini membandingkan jumlah kehilangan produksi (D_{vol})sebesar 3.904 pcs dengan tambahan kapasitas produksi harian (S_{vol})sebesar 460,51 pcs yang diperoleh dari tata letak usulan. Berdasarkan hasil perhitungan, titik impas produksi dapat dicapai dalam waktu 8,48 hari kerja. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan

kapasitas produksi dari tata letak usulan dapat menutup seluruh kehilangan produksi akibat proses relokasi dalam waktu kurang dari sembilan hari.

4.2.10 Melakukan analisis sensitivitas terhadap model tata letak usulan

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi kemampuan model matematis dalam menghadapi perubahan permintaan produksi. Pengujian dilakukan pada kondisi peningkatan dan penurunan permintaan yang menggambarkan kegiatan produksi saat permintaan meningkat maupun menurun. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui apakah fluktuasi permintaan dapat diterapkan pada tata letak usulan. Berikut analisis sensitivitas untuk kondisi ketika permintaan meningkat dan ketika permintaan menurun.

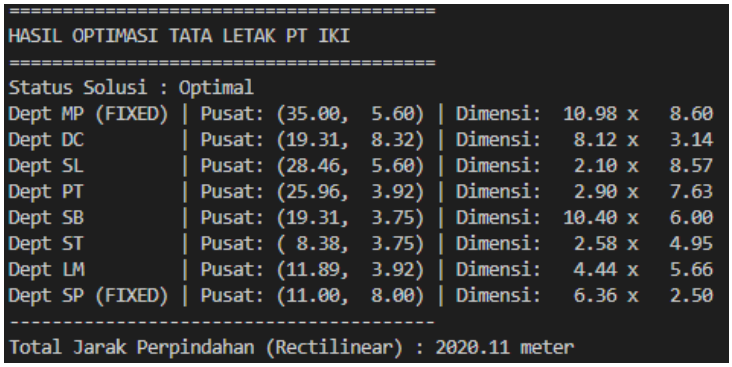
a. Kondisi permintaan mengalami peningkatan

Peningkatan permintaan pada analisis sensitivitas disusun dengan menaikkan permintaan poduk sebanyak 10%, 20%, 30%, dan 40%. Persentase tersebut digunakan sebagai dasar penentuan kenaikan nilai frekuensi perpindahan material antar departemen. Nilai tersebut kemudian dimasukkan sebagai *input* pada *solver* MILP untuk mengetahui apakah posisi dan dimensi setiap departemen tetap sama. FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 10% dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 10%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		29	41						70
DC					22			21	43
SL				38					38
PT					35		4		39
SB						2	32	2	36
ST								2	2
LM								36	36
SP									0
Total	0	29	41	38	57	2	36	61	264

Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 10% dapat dilihat pada Gambar 4.16.



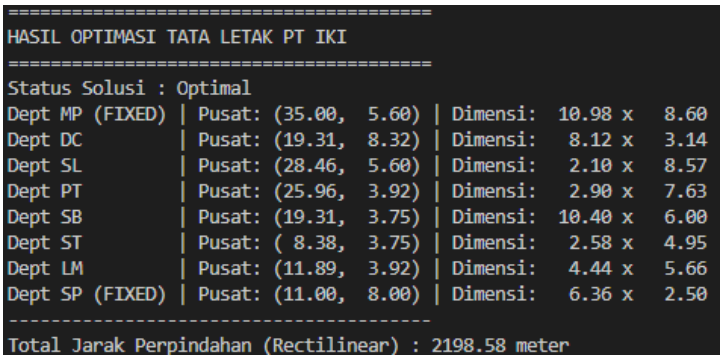
Gambar 4.16 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 10%

FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 20% dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 20%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		32	45						77
DC					24			23	47
SL				41					41
PT					38		4		42
SB						2	35	2	39
ST								2	2
LM								39	39
SP									0
Total	0	32	45	41	62	2	39	66	287

Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 20% dapat dilihat pada Gambar 4.17.



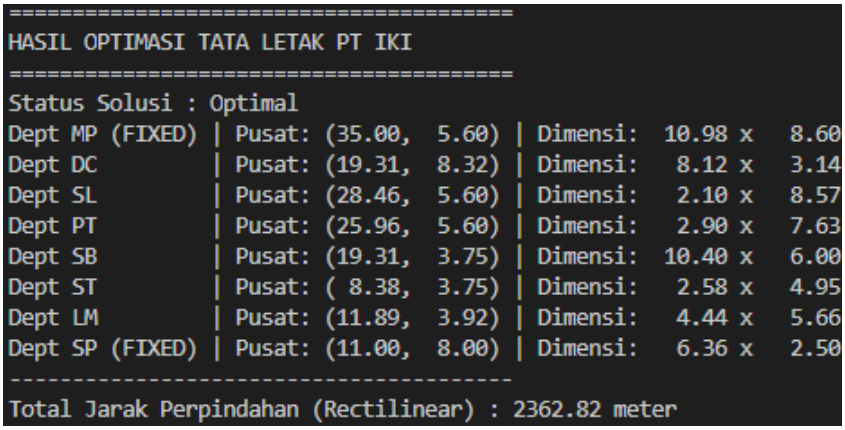
Gambar 4.17 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 20%

FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 30% dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 30%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		34	49						83
DC					26			25	51
SL				45					45
PT					41		4		45
SB						2	38	2	42
ST								2	2
LM								42	42
SP									0
Total	0	34	49	45	67	2	42	71	310

Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 30% dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 30%

FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		37	52						89
DC					28			27	55
SL				48					48
PT					44		5		49
SB						2	41	2	45

Tabel 4.18 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% (lanjutan)

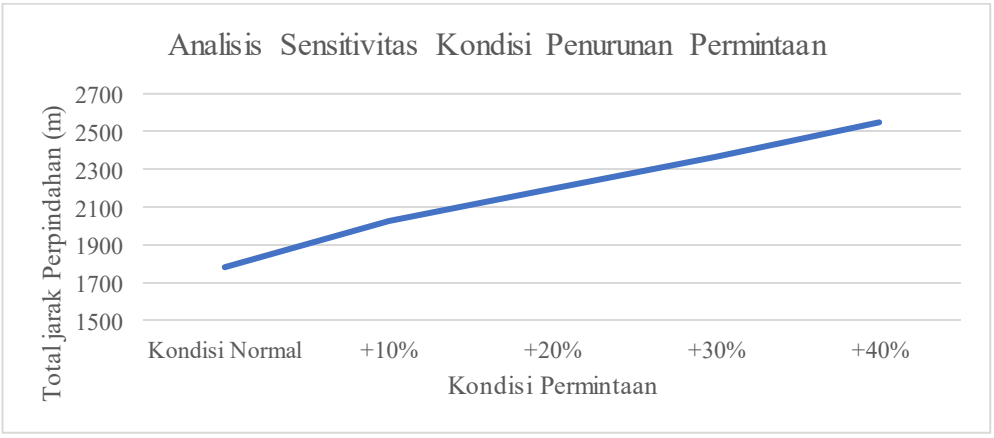
F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
ST								2	2
LM								45	45
SP									0
Total	0	37	52	48	72	2	46	76	333

Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 40% dapat dilihat pada Gambar 4.19.

```
======================================
HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI
======================================
Status Solusi : Optimal
Dept MP (FIXED) | Pusat: (35.00,  5.60) | Dimensi:  10.98 x   8.60
Dept DC         | Pusat: (19.31,  8.32) | Dimensi:   8.12 x   3.14
Dept SL         | Pusat: (28.46,  5.60) | Dimensi:   2.10 x   8.57
Dept PT         | Pusat: (25.96,  3.92) | Dimensi:   2.90 x   7.63
Dept SB         | Pusat: (19.31,  3.75) | Dimensi:  10.40 x   6.00
Dept ST         | Pusat: ( 8.38,  3.75) | Dimensi:   2.58 x   4.95
Dept LM         | Pusat: (11.89,  3.92) | Dimensi:   4.44 x   5.66
Dept SP (FIXED) | Pusat: (11.00,  8.00) | Dimensi:   6.36 x   2.50
--------------------------------------
Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) : 2548.82 meter
```

Gambar 4.19 Hasil optimasi kondisi peningkatan permintaan sebesar 40%

Seluruh hasil perhitungan total jarak perpindahan material pada skenario peningkatan permintaan kemudian disajikan dalam bentuk grafik agar perubahan yang terjadi lebih mudah dianalisis. Grafik tersebut digunakan untuk menunjukkan pengaruh peningkatan permintaan terhadap kinerja tata letak usulan. Grafik analisis sensitivitas pada kondisi peningkatan permintaan dapat dilihat pada Gambar 4.20



Gambar 4.20 Grafik analisis sensitivitas peningkatan permintaan

Analisis sensitivitas pada kondisi kenaikan menunjukkan bahwa kenaikan permintaan pada rentang 10% sampai 40% selalu diikuti oleh peningkatan jarak perpindahan material yang konsisten dan linier. Pola tersebut menunjukkan bahwa pertambahan aktivitas produksi tidak menyebabkan perubahan yang berlebihan pada sistem perpindahan material. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa tata letak usulan memiliki ketahanan yang baik dalam menghadapi peningkatan aktivitas produksi.

b. Kondisi permintaan mengalami penurunan

permintaan pada analisis sensitivitas disusun dengan menurunkan permintaan poduk sebanyak 10%, 20%, 30%, dan 40%. Persentase tersebut digunakan sebagai dasar penentuan penurunan nilai frekuensi perpindahan material antar departemen. Nilai tersebut kemudian dimasukkan sebagai *input* pada *solver* MILP untuk mengetahui apakah posisi dan dimensi setiap departemen tetap sama. FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 10% dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan10%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		24	34						58
DC					18			18	36
SL				31					31
PT					28		3		31
SB						1	27	1	29
ST								1	1
LM								29	29
SP									0
Total	0	24	34	31	46	1	30	49	215

Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 10% dapat dilihat pada Gambar 4.21.

```
======================================
HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI
======================================
Status Solusi : Optimal
Dept MP (FIXED) | Pusat: (35.00,  5.60) | Dimensi:  10.98 x   8.60
Dept DC         | Pusat: (19.31,  8.32) | Dimensi:   8.12 x   3.14
Dept SL         | Pusat: (28.46,  5.60) | Dimensi:   2.10 x   8.57
Dept PT         | Pusat: (25.96,  5.60) | Dimensi:   2.90 x   7.63
Dept SB         | Pusat: (19.31,  3.75) | Dimensi:  10.40 x   6.00
Dept ST         | Pusat: ( 8.38,  3.75) | Dimensi:   2.58 x   4.95
Dept LM         | Pusat: (11.89,  3.92) | Dimensi:   4.44 x   5.66
Dept SP (FIXED) | Pusat: (11.00,  8.00) | Dimensi:   6.36 x   2.50
--------------------------------------
Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) : 1643.95 meter
```

Gambar 4.21 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 10%

FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 20% dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 20%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		21	30						51
DC					16			16	32
SL				28					28
PT					25		3		28
SB						1	24	1	26
ST								1	1
LM								26	26
SP									0
Total	0	21	30	28	41	1	27	44	192

Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 20% dapat dilihat pada Gambar 4.22.

```
======================================
HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI
======================================
Status Solusi : Optimal
Dept MP (FIXED) | Pusat: (35.00,  5.60) | Dimensi:  10.98 x   8.60
Dept DC         | Pusat: (19.31,  8.32) | Dimensi:   8.12 x   3.14
Dept SL         | Pusat: (28.46,  5.60) | Dimensi:   2.10 x   8.57
Dept PT         | Pusat: (25.96,  5.60) | Dimensi:   2.90 x   7.63
Dept SB         | Pusat: (19.31,  3.75) | Dimensi:  10.40 x   6.00
Dept ST         | Pusat: ( 8.38,  3.75) | Dimensi:   2.58 x   4.95
Dept LM         | Pusat: (11.89,  3.92) | Dimensi:   4.44 x   5.66
Dept SP (FIXED) | Pusat: (11.00,  8.00) | Dimensi:   6.36 x   2.50
--------------------------------------
Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) : 1465.48 meter
```

Gambar 4.22 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 20%

FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 30% dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 FTC frekuensi perpindahan material dengan penurunan 30%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		19	26						45
DC					14			14	28
SL				24					24
PT					22		3		25
SB						1	21	1	23
ST								1	1
LM								23	23
SP									0
Total	0	19	26	24	36	1	24	39	169

Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 30% dapat dilihat pada Gambar 4.23.

```
======================================
HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI
======================================
Status Solusi : Optimal
Dept MP (FIXED) | Pusat: (35.00,  5.60) | Dimensi:  10.98 x   8.60
Dept DC         | Pusat: (19.31,  8.32) | Dimensi:   8.12 x   3.14
Dept SL         | Pusat: (28.46,  5.60) | Dimensi:   2.10 x   8.57
Dept PT         | Pusat: (25.96,  3.92) | Dimensi:   2.90 x   7.63
Dept SB         | Pusat: (19.31,  3.75) | Dimensi:  10.40 x   6.00
Dept ST         | Pusat: ( 8.38,  3.75) | Dimensi:   2.58 x   4.95
Dept LM         | Pusat: (11.89,  3.92) | Dimensi:   4.44 x   5.66
Dept SP (FIXED) | Pusat: (11.00,  8.00) | Dimensi:   6.36 x   2.50
--------------------------------------
Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) : 1301.24 meter
```

Gambar 4.23 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 30%

FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40%

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	**Total**
MP		16	23						39
DC					12			12	24
SL				21					21
PT					19		2		21
SB						1	18	1	20
ST								1	1

Tabel 4.22 FTC frekuensi perpindahan material dengan kenaikan 40% (lanjutan)

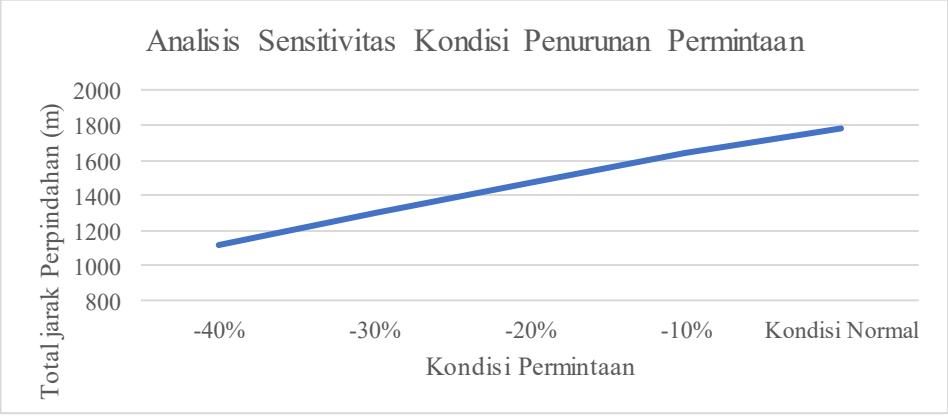
F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP	Total
LM								20	20
SP									0
Total	0	16	23	21	31	1	20	34	146

Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 40% dapat dilihat pada Gambar 4.24.

```
======================================
HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI
======================================
Status Solusi : Optimal
Dept MP (FIXED) | Pusat: (35.00,  5.60) | Dimensi:  10.98 x   8.60
Dept DC         | Pusat: (19.31,  8.32) | Dimensi:   8.12 x   3.14
Dept SL         | Pusat: (28.46,  5.60) | Dimensi:   2.10 x   8.57
Dept PT         | Pusat: (25.96,  5.60) | Dimensi:   2.90 x   7.63
Dept SB         | Pusat: (19.31,  3.75) | Dimensi:  10.40 x   6.00
Dept ST         | Pusat: ( 7.16,  3.75) | Dimensi:   2.58 x   4.95
Dept LM         | Pusat: (11.28,  4.53) | Dimensi:   5.66 x   4.44
Dept SP (FIXED) | Pusat: (11.00,  8.00) | Dimensi:   6.36 x   2.50
--------------------------------------
Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) : 1115.25 meter
```

Gambar 4.24 Hasil optimasi kondisi penurunan permintaan sebesar 40%

Hasil optimasi total jarak perpindahan material pada kondisi penurunan permintaan dirangkum dalam bentuk grafik untuk memudahkan proses analisis. Grafik tersebut digunakan untuk menunjukkan pengaruh penurunan permintaan terhadap kinerja tata letak usulan. Hasil grafik analisis sensitivitas pada kondisi penurunan permintaan ditampilkan pada Gambar 4.21. Grafik analisis sensitivitas penurunan permintaan dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Grafik analisis sensitivitas penurunan permintaan

Analisis sensitivitas pada kondisi penurunan permintaan menunjukkan bahwa semakin rendah permintaan, semakin kecil pula total jarak perpindahan material yang terjadi. Penurunan permintaan dari 10% hingga 40%, pola pada grafik menunjukkan jarak perpindahan material berkurang secara linier. Hasil tersebut membuktikan bahwa tata letak usulan memiliki ketahanan yang baik terhadap penurunan aktivitas produksi.

4.3 Analisis Hasil

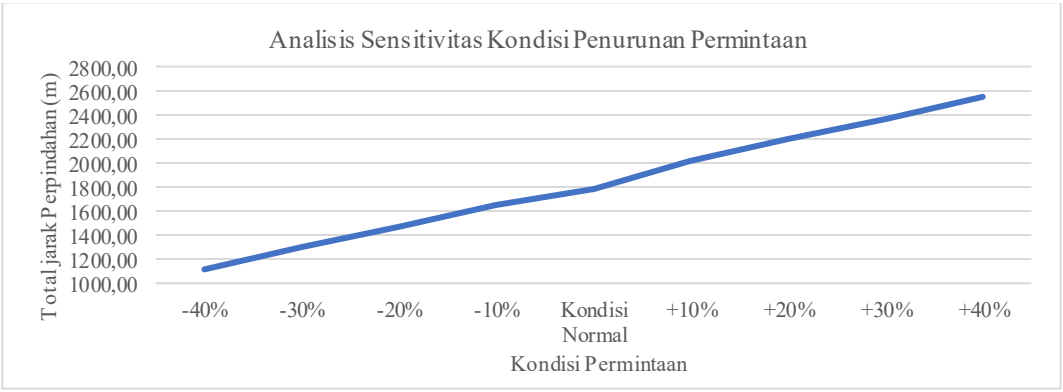
Perbaikan tata letak fasilitas lantai produksi pada penelitian ini dilakukan melalui pendekatan optimasi matematis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Model optimasi digunakan untuk menentukan posisi setiap departemen sehingga total jarak perpindahan material menjadi sekecil mungkin. Penurunan jarak perpindahan tersebut kemudian dijadikan dasar untuk menilai peningkatan efisiensi operasional dan kapasitas produksi. Perhitungan jarak perpindahan material pada lantai produksi awal perusahaan menunjukkan total jarak sebesar 3472,633 meter. Besarnya nilai tersebut dikarenakan tata letak yang digunakan belum disesuaikan dengan pola aliran material. Departemen yang memiliki frekuensi perpindahan material tinggi berada di lokasi yang berjauhan sehingga menyebabkan jarak tempuh material menjadi lebih panjang. Pendekatan yang digunakan untuk meminimasi total jarak perpindahan tersebut adalah MILP. Model MILP mengevaluasi berbagai alternatif tata letak untuk memperoleh solusi yang paling optimal. Optimasi disusun dengan mempertimbangkan berbagai kendala matematis yang telah ditetapkan dalam model. Model memastikan bahwa setiap departemen ditempatkan tanpa mengalami tumpang tindih melalui penerapan kendala *non-overlapping*. Pemanfaatan ruang juga ditingkatkan melalui pemilihan bentuk konfigurasi departemen. Model juga menerapkan kendala *fixed location* untuk mempertahankan posisi departemen yang tidak dapat dipindahkan. Penerapan seluruh kendala tersebut menghasilkan tata letak yang optimal secara matematis serta sesuai untuk diterapkan di lingkungan produksi. Berdasarkan hasil optimasi, total jarak perpindahan material berhasil ditekan menjadi 1780,03 meter.

Pengurangan jarak perpindahan material memberikan dampak pada peningkatan kapasitas produksi harian di perusahaan. Hal ini disebabkan karena operator produksi bertugas untuk mengoperasikan mesin dan bertanggung jawab melakukan aktivitas *material handling*. Berkurangnya jarak perpindahan antar departemen dapat mengurangi waktu yang digunakan untuk aktivitas transportasi sehingga waktu tunggu mesin dapat diminimalkan. Penghematan waktu tersebut meningkatkan proporsi waktu produktif yang tersedia untuk proses produksi. Hubungan antara pengurangan jarak perpindahan material dan peningkatan kapasitas produksi dianalisis menggunakan simulasi *discrete-event* dengan *software* ProModel. Model simulasi disusun untuk menggambarkan kondisi operasional perusahaan dengan mempertimbangkan waktu proses pada setiap departemen serta jarak yang diperoleh dari hasil optimasi MILP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tata letak usulan mampu meningkatkan *output* produksi. Untuk memastikan bahwa peningkatan kapasitas produksi berasal dari perubahan tata letak, hasil simulasi diuji menggunakan metode *Paired Sample T-Test* melalui *software* SPSS. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara kapasitas produksi pada tata letak awal dan tata letak usulan. Pengambilan keputusan dilakukan menggunakan tingkat signifikansi sebesar 0,05 sesuai dengan kaidah pengujian statistik parametrik. Hasil simulasi pada produksi *Die Cut Box* menunjukkan peningkatan kapasitas produksi harian setelah penerapan tata letak usulan. Rata-rata produksi meningkat dari 1401,48 unit menjadi 1.800 unit per hari. Hasil uji statistik menghasilkan nilai signifikansi *(Sig. 2-tailed)* sebesar 0,000. Nilai tersebut lebih kecil dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa penerapan tata letak usulan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kapasitas produksi *Die Cut Box*. Produksi *Carton Box* meningkat dari 2.025,37 unit pada tata letak awal menjadi 2540,74 unit setelah penerapan tata letak usulan. Hasil pengujian menggunakan SPSS kembali menunjukkan nilai signifikansi *(Sig. 2-tailed)* sebesar 0,000. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tata letak hasil optimasi MILP memberikan peningkatan kapasitas produksi perusahaan. Gambar tata letak usulan dapat dilihar pada Gambar 4.26.

Gambar 4.26 Tata letak usulan

Analisis feasibilitas pada penelitian ini dilakukan pada aspek ekonomi yang berkaitan langsung dengan pelaksanaan relokasi tata letak fasilitas di lantai produksi. Analisis tersebut bertujuan menghitung dampak biaya selama pemindahan departemen dan memastikan bahwa tata letak usulan dapat diterapkan oleh perusahaan. erhitungan dimulai dengan menentukan total biaya relokasi departemen (C_{total}) sebesar Rp899.454,55 yang terdiri dari dua kelompok biaya. Kelompok pertama adalah biaya pemindahan lima departemen mesin sebesar Rp599.454,55 yang dihitung berdasarkan upah supervisor produksi (W_{spv}),biaya penggunaan forklift (B_{fl}),dan durasi pekerjaan selama satu *shift*. Kelompok kedua merupakan biaya pemindahan tiga departemen non-mesin sebesar Rp300.000 yang dihitung dengan mempertimbangkan upah operator (W_{opr}),jumlah tenaga kerja (n),dan waktu pelaksanaan. Total biaya relokasi kemudian diperoleh dengan menjumlahkan kedua komponen tersebut. Selama proses relokasi berlangsung, aktivitas produksi dihentikan sementara sehingga menyebabkan kehilangan jumlah produksi (D_{vol}). Kehilangan produksi tersebut dihitung berdasarkan rata-rata produksi per *shift* (P_{shift}),sehingga diperoleh kehilangan sebesar 3.904 pcs. Kerugian produksi tersebut kemudian dibandingkan dengan efisiensi waktu perpindahan material (Δt) yang dihasilkan tata letak usulan. Nilai efisiensi waktu diperoleh menggunakan selisih jarak tata letak awal dan usulan serta kecepatan perpindahan material sebesar 0,5 meter per detik. Perhitungan menghasilkan penghematan waktu operasional sebesar 3.397,092 detik setiap *shift*. Penghematan waktu tersebut kemudian diubah menjadi tambahan kapasitas produksi harian (S_{vol}). Berdasarkan waktu siklus rata-rata sebesar 7,377 detik per pcs, diperoleh tambahan produksi sebesar 460,51 pcs per *shift*. Selanjutnya dilakukan perhitungan titik impas sebagai dasar untuk menentukan waktu pemulihan kehilangan produksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kehilangan sebanyak 3.904 pcs dapat digantikan dalam waktu 8,48 hari kerja melalui tambahan produksi sebesar 460,51 pcs per *shift*. Hal tersebut menunjukkan bahwa tata letak usulan mampu memberikan manfaat ekonomi karena peningkatan produktivitas dapat menutup kerugian selama proses relokasi dalam waktu kurang dari sembilan hari.

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji kemampuan tata letak usulan dalam menghadapi perubahan beban produksi. Pengujian dilakukan pada pada kondisi peningkatan permintaan guna mengetahui dampaknya terhadap pola perpindahan material antar departemen. Peningkatan permintaan dibuat sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40%. Nilai tersebut diterapkan pada frekuensi perpindahan material antar departemen dan dianalisis menggunakan model MILP untuk mengevaluasi kondisi tata letak. Hasil optimasi menunjukkan bahwa total jarak perpindahan material meningkat menjadi 2.020,11 meter pada kenaikan 10%, 2.198,58 meter pada kenaikan 20%, 2.362,82 meter pada kenaikan 30%, dan 2.548,82 meter pada kenaikan 40%. Analisis sensitivitas juga dilakukan pada kondisi penurunan permintaan untuk mengevaluasi ketahanan tata letak usulan saat aktivitas produksi berkurang. Pengujian dilakukan dengan menurunkan volume permintaan sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40% agar dapat diketahui pengaruhnya terhadap perpindahan material di lantai produksi. Persentase tersebut digunakan untuk mengurangi frekuensi perpindahan material antar departemen, kemudian diproses menggunakan model MILP untuk memperoleh hasil optimasi. Hasil perhitungan menunjukkan total jarak perpindahan material menurun menjadi 1.643,95 meter pada penurunan 10%, 1.465,48 meter pada penurunan 20%, 1.301,24 meter pada penurunan 30%, dan 1.115,25 meter pada penurunan 40%. Hasil analisis sensitivitas kemudian dirangkum dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Grafik rangkuman analisis sensitivitas

Grafik hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan dan penurunan permintaan menghasilkan perubahan jarak perpindahan material dengan pola linier.

Selain itu kondisi peningkatan dan penurunan permintaan menghasilkan bentuk tata letak yang sama dengan tata letak usulan. Posisi dan bentuk konfigurasi departemen pada analisis sensitivitas peningkatan dan penurunan permintaan dapat dilihat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Rangkuman posisi departemen pada analisis sensitivitas

Kondisi Permintaan	Atribut	Departemen							
		MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
+40%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
+30%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
+20%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
+10%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
Kondisi Normal	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
-10%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
-20%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
-30%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50
-40%	Pusat (x,y)	(35.00, 5.60)	(19.31, 8.32)	(28.46, 5.60)	(25.96, 5.60)	(19.31, 3.75)	(7.16, 3.75)	(11.28, 4.53)	(11.00, 8.00)
	Dimensi (P x L)	10.98 x 8.60	8.12 x 3.14	2.10 x 8.57	2.90 x 7.63	10.40 x 6.00	2.58 x 4.95	5.66 x 4.44	6.36 x 2.50

Berdasarkan tabel tersebut, perubahan kondisi permintaan tidak mengubah posisi koordinat setiap departemen. Dimensi masing-masing departemen juga tetap sama pada semua kondisi. Hasil ini menunjukkan bahwa tata letak usulan mampu mempertahankan bentuk yang sama pada berbagai perubahan permintaan.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil optimasi menggunakan metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) menunjukkan bahwa tata letak usulan mampu meningkatkan efisiensi aliran material di perusahaan. Model disusun dengan memperhatikan kendala *non-overlapping*, *fixed location*, dan pemilihan konfigurasi departemen. Melalui pendekatan tersebut, total jarak perpindahan material berhasil dikurangi dari 3.472,633 meter menjadi 1.780,03 meter.

Pengurangan jarak perpindahan material berdampak pada peningkatan kapasitas produksi harian perusahaan. Produksi *Die Cut Box* meningkat dari 1.401,48 unit menjadi 1.800 pcs, sedangkan *Carton Box* meningkat dari 2.025,37 unit menjadi 2.540,74 pcs per hari. Hasil uji *Paired Sample T-Test* dengan nilai *Sig. (2-tailed)* = 0,000 menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas produksi tersebut signifikan secara statistik.

Hasil analisis feasibilitas menunjukkan bahwa implementasi tata letak usulan membutuhkan biaya relokasi sebesar Rp899.454,55. Selama proses relokasi terjadi kehilangan produksi sebanyak 3.904 pcs, namun penghematan waktu sebesar 3.397,092 detik per *shift* mampu meningkatkan kapasitas produksi hingga 460,51 pcs per *shift*. Kondisi tersebut memungkinkan kerugian produksi dipulihkan dalam waktu 8,48 hari kerja.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa tata letak usulan tetap mampu mempertahankan kinerjanya pada berbagai kondisi permintaan. Total jarak perpindahan material meningkat dari 2.020,11 meter hingga 2.548,82 meter saat permintaan naik 10%–40%, dan menurun dari 1.643,95 meter hingga 1.115,25 meter saat permintaan turun 10%–40%. Meskipun nilai jarak berubah, posisi koordinat dan dimensi seluruh departemen tetap sama sehingga tata letak usulan memiliki ketahanan yang baik terhadap perubahan kondisi permintaan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk mendukung penerapan hasil penelitian maupun pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Saran bagi perusahaan

   Sebagai tindak lanjut hasil penelitian, perusahaan dapat mempertimbangkan usulan tata letak yang diberikan untuk dilakukan implementasi. Implementasi tata letak hasil optimasi sebaiknya dilakukan pada saat aktivitas produksi tidak berlangsung agar proses relokasi tidak memengaruhi target produksi perusahaan. Setiap departemen diberikan batas yang jelas untuk menjaga kesesuaian tata letak yang telah dirancang.

2. Saran bagi penelitian berikutnya

   Penelitian berikutnya dapat memperluas model optimasi dengan menambahkan parameter ongkos *material handling* (OMH) sebagai salah satu komponen fungsi tujuan. Pengembangan fungsi tujuan dan fungsi kendala pada model matematis dapat disesuaikan agar lebih sesuai dengan kondisi dan kebutuhan pada industri yang berbeda. Selain itu, analisis kelayakan investasi dapat diintegrasikan untuk memberikan dasar pertimbangan ekonomi dalam pelaksanaan perubahan tata letak fasilitas.

DAFTAR PUSTAKA

Adiasa, I., Suarantalla, R., Rafi, M. S., & Hermanto, K. (2020). Perancangan Ulang Tata Letak Fasilitas Pabrik Di CV. Apindo Brother Sukses Menggunakan Metode Systematic *Layout* Planning (SLP). *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, *19*(2).

Adedeji, B. P., Al Abbad, J. A., & Mohamed, I. (2021). *Design and Analysis of a Manufacturing System Using ProModel*. *International Journal of Engineering Research and Applications, 11*(6), 6–12.

Alghushan, A. A., Nuruddin, M., & Dahda, S. S. (2022). Proposed Improvement of Facility Layout in Production Area in Ud. Arshaindo Using the From To Chart (FTC) Method. *Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS)*, *4*(1), 333–341.

Anjos, M. F., & Vieira, M. V. (2021). Mathematical optimization approach for facility layout on several rows. *Optimization letters*, *15*, 9-23.

Arsyad, M. R., & Suryaningsih, S. (2024). *Pengantar SPSS: Teori, Implementasi, dan Interpretasi*. Ciamis: Budiluhur Press.

Baladraf, T. T., Salsabila, N. S. F., Harisah, D., & Sudarmono, T. R. (2021). Evaluasi dan perancangan tata letak fasilitas produksi menggunakan metode analisis craft (Studi kasus pabrik pembuatan bakso Jalan Brenggolo Kediri). *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, *3*(1), 12-20.

Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). Discrete-Event System Simulation (5th ed.). Pearson.

Barbara, A., & Cahyana, A. S. . (2021). Production Facility Layout Design Using Activity Relationship Chart (ARC) And From To Chart (FTC) Methods: Perancangan Tata Letak Fasilitas Produksi Dengan Menggunakan Metode Activity Relationship Chart (ARC) Dan From To Chart (FTC). *Procedia of Engineering and Life Science*, *1*(2).

Che, A., Zhang, Y., & Feng, J. (2017). Bi-Objective Optimization For Multi-Floor Facility Layout Problem With Fixed Inner Configuration And Room

Adjacency Constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *105*, 265-276.

Clautiaux, F., & Ljubić, I. (2025). Last fifty years of integer linear programming: A focus on recent practical advances. *European Journal of Operational Research*, *324*(3), 707-731.

Coppé, V., Gillard, X., & Schaus, P. (2022). Solving the constrained single-row facility layout problem with decision diagrams. In *28th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2022)* (pp. 14-1). Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum für Informatik.

Dahlbeck, M. (2021). A mixed-integer linear programming approach for the T-row and the multi-bay facility layout problem. *European journal of operational research*, *295*(2), 443-462.

Diniaty, D. D. (2016). Analisis Beban Kerja Fisik dan Mental Karyawan di Lantai Produksi pada PT Pesona Laut Kuning. SITEKIN: *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, 13*(2), 203-210.

Domínguez-Casasola, S., Velasco, J., & Urbán-Rivero, L. E. (2023). A Mixed Integer Programming Approach for the Unequal Area Facility Layout Problem. *Available at SSRN 4494076*.

Fonseca i Casas, P. (2023). A Continuous Process for Validation, Verification, and Accreditation of Simulation Models. *Mathematics*, *11*(4), 845. https://doi.org/10.3390/math11040845

Guan, C., Zhang, Z., Liu, S., & Gong, J. (2019). Multi-Objective Particle Swarm Optimization For Multi-Workshop Facility Layout Problem. *Journal of Manufacturing Systems*, *53*, 32-48.

Haekal, J. (2022). Integration of Lean Manufacturing and ProModel Simulation on Repair Production Process Flow of Polysilane Bottle Printing Using VSM, WAM, VALSAT, And RCA Methods: Case Study Packaging Manufacturing Company. *International Journal of Scientific Advances, 3*(2), 235–243.

Haleem, A., Javaid, M., Vaishya, R., & Deshmukh, S. G. (2021). Strategic Facility Layout Planning And Its Impact On Manufacturing Performance. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 93–104.

Hasad, A. (2011). Verifikasi Dan Validasi Dalam Simulasi Model. *Departemen Ilmu Komputer*, 5-6.

Heragu, S. S. (2016). Facilities design (4th ed.). CRC Press.

Jude, E., Songsong, L., Mazaher, M., & Lazaros, P. (2018). An Optimisation-Based Approach For Process Plant Layout. *Ind. Eng. Chem. Res*.

Kuswardhani, N., & Rizky, D. A. (2024). Perancangan ulang desain tata letak fasilitas produksi di CV. Macarindo Berkah Group menggunakan metode ARC dan CRAFT. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, *18*(1), 210-220.

Little, J. D. C. (2011). *Little's Law as viewed on its 50th anniversary*. Operations Research, 59(3), 536–549.

Louati, A., Lahyani, R., Aldaej, A., Mellouli, R., & Nusir, M. (2021). Mixed Integer Linear Programming Models To Solve A Real-Life Vehicle Routing Problem With Pickup And Delivery. *Applied Sciences*, *11*(20), 9551.

Mahmoudi, A., Li, X., & Deng, Y. (2021). Facility Layout Design Considering Material Flow And Spatial Constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107397.

Meyer, T., Andelfinger, P., Ruscheinski, A., & Uhrmacher, A. M. (2022, December). Seamless Simulation-Based Verification and Validation of Event-Driven Software Systems. In *2022 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 2130-2141). IEEE.

Moslemipour, G., Lee, T. S., & Rilling, D. (2012). A Review Of Intelligent Approaches For Designing Dynamic And Robust Layouts In Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *60*(1), 11-27.

Mykhei, M., Marasová Jr, D., Bobinics, B., Marasová, D., Taušová, M., & Kudelas, D. (2026). Probabilistic Assessment of Downtime-Related Energy-Service Unavailability, Production Loss and Economic Impact in Continuous Material-Handling Systems. *Applied Sciences*, *16*(11), 5697.

Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. (1988). Integer And Combinatorial Optimization. John Wiley & Sons.

Ostowska, W., & Stryhunivska, O. (2025). Development of a Model Supporting the Analysis of Costs Related to Equipment Relocation in a Manufacturing Facility. *Management Systems in Production Engineering*.

Pérez-Gosende, P., Mula, J., & Díaz-Madroñero, M. (2021). Facility Layout Planning. An Extended Literature Review. *International Journal of Production Research*, *59*(12), 3777-3816.

Pradana, A. P., Chaeron, M., & Khanan, M. S. A. (2018). Implementasi Konsep Lean Manufacturing Guna Mengurangi Pemborosan Di Lantai Produksi. *Opsi, 11*(1), 14-18.

Pratiwi, I., Muslimah, E., & Aqil, A. W. (2012). Perancangan Tata Letak Fasilitas Di Industri Tahu Menggunakan Blocplan. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, *11*(2), 102-112.

Purnomo, Hari. (2004). Perencanaan & Perancangan Fasilitas. Penerbit Graha Ilmu: Yogyakarta.

Rahayu, A. A. W., Rahayu, F. W., & Pratiwi, R. A. (2024). Facility Layout Design Using From To Chart (FTC) Method And Automated Layout Design Program (ALDEP). *Journal of Industrial Engineering Management*, *9*(2).

Retnowati, D., & Fudhla, A. F. (2017). Re-Layout Fasilitas Produksi Industri Sheet Metal Working Berbasis Job Shop Dengan Pendekatan Linear Mix Integer Programming. In *Seminar Nasional Manajemen Teknologi XVII, Surabaya, Indonesia*.

Ruane, P., Walsh, P., & Cosgrove, J. (2022). Validation Of A Digital Simulation Model For Maintenance In A High-Volume Automated Manufacturing Facility. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(19), 127-132.

Ruhyat, R., & Hilman, M. (2023). Perancangan Ulang Tata Letak Fasilitas Menggunakan Metode Arc Guna Memaksimalkan Produktivitas Pekerja Di Pabrik Tahu Kca Rancah. *Jurnal Industrial Galuh*, *5*(1), 37-44.

Secchin, L. D., & Amaral, A. R. S. (2019). An Improved Mixed-Integer Programming Model For The Double Row Layout Of Facilities. *Optimization Letters*, *13*(1), 193-199.

Singh, S. P., Sharma, R. R. K., & Choubey, A. (2021). Quantitative approaches for facility layout optimization: A review and future directions. *International Journal of Production Research, 59*(15), 4589–4612.

Siringoringo, H. (2010). *Simulasi Sistem Industri*. Jakarta: Gunadarma.

Smith, J. S., & Sturrock, D. T. (2024). *Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications* (7th ed.). Simio.

Sugiyono, A. (2018). Buku Ajar Perencanaan Tata Letak Fasilitas (PTLF).

Tio Sampurno, & Sudiarso, A. (2018). Simulasi Dan *Mixed Integer Linear Programming* Untuk Masalah Tata Letak Pabrik Baru. Dalam *Prosiding Seminar Dan Konferensi Nasional IDEC*.

Tubagus, P., Kaseng, S., & Asngadi, A. (2017). Evaluasi Tata Letak Fasilitas Produksi Kripik Pisang Pada Cahaya Indi Kabupaten Donggala. *Jurnal Ilmu Manajemen Universitas Tadulako (JIMUT)*, *3*(1), 27-40.

Wignjosoebroto, S. (2009). Tata letak pabrik dan pemindahan bahan. *Surabaya: Guna Widya*.

Zhang, P. (2010). *Discrete-event simulation software and implementation concepts*. In D. A. Reynolds (Ed.), Advanced Industrial Control Technology (Chapter 19). CRC Press.

LAMPIRAN A
DOKUMENTASI STASIUN KERJA



Lampiran LA.1 Gambar lantai produksi



Lampiran LA.2 Gambar mesin potong



Lampiran LA.3 Gambar mesin *pond die cutting*



Lampiran LA.4 Gambar mesin *slotter*



Lampiran LA.5 Gambar mesin *pond* tumpul



Lampiran LA.6 Gambar meja Sablon



Lampiran LA.7 Gambar mesin *stapler*



Lampiran LA.8 Gambar meja pengeleman



Lampiran LA.9 Gambar mesin *straping*

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN JARAK TATA LETAK AWAL

Lampiran LB.1 Perhitungan jarak MP ke DC

Titik pusat departemen MP (35,000; 5,600) dan departemen DC (19,310; 8,320).

$d = |35{,}000 - 19{,}310| + |5{,}600 - 8{,}320|$

$d = |15{,}690| + |-2{,}720|$

$d = 15{,}690 + 2{,}720$

$d = 18{,}410$

Jarak = 18,410 meter

Lampiran LB.2 Perhitungan jarak MP ke SL

Titik pusat departemen MP (35,000; 5,600) dan departemen SL (28,460; 5,600).

$d = |35{,}000 - 28{,}460| + |5{,}600 - 5{,}600|$

$d = |6{,}540| + |0{,}000|$

$d = 6{,}540 + 0{,}000$

$d = 6{,}540$

Jarak = 6,540 meter

Lampiran LB.3 Perhitungan jarak DC ke SB

Titik pusat departemen DC (19,310; 8,320) dan departemen SB (19,310; 3,750).

$d = |19{,}310 - 19{,}310| + |8{,}320 - 3{,}750|$

$d = |0{,}000| + |4{,}570|$

$d = 0{,}000 + 4{,}570$

$d = 4{,}570$

Jarak = 4,570 meter

Lampiran LB.4 Perhitungan jarak DC ke SP

Titik pusat departemen DC (19,310; 8,320) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |19{,}310 - 11{,}000| + |8{,}320 - 8{,}000|$

$d = |8{,}310| + |0{,}320|$

$d = 8{,}310 + 0{,}320$

$d = 8{,}630$

Jarak = 8,630 meter

Lampiran LB.5 Perhitungan jarak SL ke PT

Titik pusat departemen SL (28,460; 5,600) dan departemen PT (25,960; 5,600).

$d = |28{,}460 - 25{,}960| + |5{,}600 - 5{,}600|$

$d = |2{,}500| + |0{,}000|$

$d = 2{,}500 + 0{,}000$

$d = 2{,}500$

Jarak = 2,500 meter

Lampiran LB.6 Perhitungan jarak PT ke SB

Titik pusat departemen PT (25,960; 5,600) dan departemen SB (19,310; 3,750).

$d = |25{,}960 - 19{,}310| + |5{,}600 - 3{,}750|$

$d = |6{,}650| + |1{,}850|$

$d = 6{,}650 + 1{,}850$

$d = 8{,}500$

Jarak = 8,500 meter

Lampiran LB.7 Perhitungan jarak PT ke LM

Titik pusat departemen PT (25,960; 5,600) dan departemen LM (11,280; 4,530).

$d = |25{,}960 - 11{,}280| + |5{,}600 - 4{,}530|$

$d = |14{,}680| + |1{,}070|$

$d = 14{,}680 + 1{,}070$

$d = 15{,}750$

Jarak = 15,750 meter

Lampiran LB.8 Perhitungan jarak SB ke ST

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen ST (7,160; 3,750).

$d = |19{,}310 - 7{,}160| + |3{,}750 - 3{,}750|$

$d = |12{,}150| + |0{,}000|$

$d = 12{,}150 + 0{,}000$

$d = 12{,}150$

Jarak = 12,150 meter

Lampiran LB.9 Perhitungan jarak SB ke LM

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen LM (11,280; 4,530).

$d = |19{,}310 - 11{,}280| + |3{,}750 - 4{,}530|$

$d = |8{,}030| + |-0{,}780|$

$d = 8{,}030 + 0{,}780$

$d = 8{,}810$

Jarak = 8,810 meter

Lampiran LB.10 Perhitungan jarak SB ke SP

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |19{,}310 - 11{,}000| + |3{,}750 - 8{,}000|$

$d = |8{,}310| + |-4{,}250|$

$d = 8{,}310 + 4{,}250$

$d = 12{,}560$

Jarak = 12,560 meter

Lampiran LB.11 Perhitungan jarak ST ke SP

Titik pusat departemen ST (7,160; 3,750) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |7{,}160 - 11{,}000| + |3{,}750 - 8{,}000|$

$d = |-3{,}840| + |-4{,}250|$

$d = 3{,}840 + 4{,}250$

$d = 8{,}090$

Jarak = 8,090 meter

Lampiran LB.12 Perhitungan jarak LM ke SP

Titik pusat departemen LM (11,280; 4,530) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |11{,}280 - 11{,}000| + |4{,}530 - 8{,}000|$

$d = |0{,}280| + |-3{,}470|$

$d = 0{,}280 + 3{,}470$

$d = 3{,}750$

Jarak = 3,750 meter

LAMPIRAN C
DATA FREKUENSI ALIRAN MATERIAL DAN PRODUKSI HARIAN

Lampiran LC.1 Data produksi harian

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
1/12/2025	FC-5,5	650		
1/12/2025	SG-330	750	1400	1700
1/12/2025	BOX HANDLE	1700		
2/12/2025	SG-330	600		
2/12/2025	BOX HANDLE	1000		
2/12/2025	BOX SEREAL	500	2050	1600
2/12/2025	BOX MAKAN	600		
2/12/2025	BOX CRACKER	525		
2/12/2025	TP-25	425		
3/12/2025	BOX HANDLE	960		
3/12/2025	LD-1730	230		
3/12/2025	DL-2830	340		
3/12/2025	R-2030	1220	2390	1700
3/12/2025	BOX PECI	600		
3/12/2025	BOX MAKAN	800		
3/12/2025	BOX PIZZA	900		
4/12/2025	BOX PIZZA	3500	-	3500
5/12/2025	LD-1420	560		
5/12/2025	DL-2030	950	2510	1400
5/12/2025	BOX PECI	1000		
5/12/2025	BOX PIZZA	1400		
6/12/2025	BAKERY BOX	2000	3600	-
6/12/2025	SB-6100	1600		
8/12/2025	BOX-6040	500		
8/12/2025	DL-5,5	570		
8/12/2025	DL-10	780	3830	1200
8/12/2025	DL-3,5	900		
8/12/2025	BOX PIZZA	1200		
8/12/2025	LD-5,5	1080		

Lampiran LC.1 Data produksi harian (lanjutan)

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
9/12/2025	BOX KOSMETIK K	2000		
9/12/2025	BOX KOSMETIK B	500		
9/12/2025	BOX-2433	540		
9/12/2025	BOX HANDLE	450	1590	2450
9/12/2025	BOX SEREAL	200		
9/12/2025	DL-4,5	200		
9/12/2025	BOX AIR MINERAL	150		
10/12/2025	BOX AIR MINERAL	3500	3500	-
11/12/2025	BOX AIR MINERAL	600		
11/12/2025	SG-330	1430	2030	1400
11/12/2025	BOX SC	900		
11/12/2025	BOX RESTO	500		
12/12/2025	OT-6,7	1700		
12/12/2025	DL-8,5	920	1740	1700
12/12/2025	LD-12	820		
13/12/2025	CC-11,5	700		
13/12/2025	OT-16	520	1800	1550
13/12/2025	LD-10	1800		
13/12/2025	CC-6,6	330		
15/12/2025	CC-9,5	230		
15/12/2025	LP-17	920		
15/12/2025	BOX CAT	600		
15/12/2025	DL-32	430		
15/12/2025	DL-30	300	3860	2650
15/12/2025	DL-28	230		
15/12/2025	DL-24	340		
15/12/2025	BOX HANDLE	1500		
15/12/2025	BOX AIR MINERAL	1700		
15/12/2025	DL-40	260		

Lampiran LC.1 Data produksi harian (lanjutan)

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
16/12/2025	CC-9,5	600	1600	1550
16/12/2025	DL-3,5	500		
16/12/2025	CC-7,5	300		
16/12/2025	DL-6,5	350		
16/12/2025	CC-12,5	650		
16/12/2025	LD-6,5	750		
17/12/2025	BOX BOLU	500	2210	1300
17/12/2025	DL-8,5	930		
17/12/2025	LD-6,5	430		
17/12/2025	DL-7,5	850		
17/12/2025	CC-9,5	400		
17/12/2025	CC-7,5	400		
18/12/2025	BOX SEDOTAN	500	2750	1805
18/12/2025	BOX RESTO	200		
18/12/2025	HR-7	650		
18/12/2025	DL-3,5	400		
18/12/2025	CC-7,5	345		
18/12/2025	CC-11,5	400		
18/12/2025	CC-6,6	560		
18/12/2025	BOX PECI	800		
18/12/2025	CC-12,5	300		
18/12/2025	VT-20	400		
19/12/2025	BF-1220	1800	1675	1800
19/12/2025	DL-4,5	450		
19/12/2025	VT-25	560		
19/12/2025	DL-13,5	345		
19/12/2025	DL-3,5	320		
20/12/2025	DL-5,5	1200	1900	2500
20/12/2025	BOX APRON	700		
20/12/2025	CL-274	2500		

Lampiran LC.1 Data produksi harian (lanjutan)

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
22/12/2025	DL-13,5	560	1520	1750
22/12/2025	BK-8510	450		
22/12/2025	DL-5,5	400		
22/12/2025	DL-6,5	560		
22/12/2025	KT-10	300		
22/12/2025	BOX PECI	500		
22/12/2025	BOX SUPLEMEN	500		
23/12/2025	BOX ANTISEPTIK	430	1590	1200
23/12/2025	LD-5	460		
23/12/2025	OT-25	1200		
23/12/2025	DL-4	700		
24/12/2025	DL-4	670	4090	-
24/12/2025	PH-10	450		
24/12/2025	PH-20	560		
24/12/2025	PH-18	455		
24/12/2025	BLDC-200	455		
24/12/2025	DL-3,5	450		
24/12/2025	DL-4,5	390		
24/12/2025	LD-6,5	325		
24/12/2025	DL-6,5	235		
24/12/2025	DL-10,5	100		
25/12/2025	BOX CUP	500	3620	1000
25/12/2025	OT-225	570		
25/12/2025	OT-30	120		
25/12/2025	OT-15	135		
25/12/2025	ME-047	235		
25/12/2025	BLOD-235	560		
25/12/2025	BLP-250	965		
25/12/2025	BLP-200	365		
25/12/2025	DL-7,5	670		
25/12/2025	BOX BANDANA	500		

Lampiran LC.1 Data produksi harian (lanjutan)

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
26/12/2025	BOX PECI	300	1250	1800
26/12/2025	VT-20	200		
26/12/2025	BLCH-200	400		
26/12/2025	ME-045	150		
26/12/2025	ME-048	200		
26/12/2025	CC-6	1800		
27/12/2025	AFM-25	900	1750	1070
27/12/2025	DL-6,5	850		
27/12/2025	CC-12,5	840		
27/12/2025	CC-11,5	230		
29/12/2025	CC-8,5	760	3485	2570
29/12/2025	CC-9,5	785		
29/12/2025	CC-10,5	450		
29/12/2025	CC-7,5	340		
29/12/2025	CC-6	235		
29/12/2025	AFM-25	165		
29/12/2025	DL-12,5	540		
29/12/2025	DL-7,5	565		
29/12/2025	BLDC-200	280		
29/12/2025	BOX MASKER	650		
29/12/2025	DL-14	405		
29/12/2025	VT-25	455		
29/12/2025	VT-30	590		
30/12/2025	DL-10	540	2650	1550
30/12/2025	CC-12,5	650		
30/12/2025	DL-8,5	350		
30/12/2025	DL-10,5	670		
30/12/2025	CC-11,5	325		
30/12/2025	DL-9,5	340		
30/12/2025	CC-6	575		
30/12/2025	BOX PECI	750		

Lampiran LC.1 Data produksi harian (lanjutan)

Tanggal	Nama/Kode Produk	Jumlah/Produk	Jumlah Produk/hari	
			Carton Box	*Die Box*
31/12/2025	CC-12,5	750		
31/12/2025	LD-7,5	390		
31/12/2025	DL-9,5	345	1710	1600
31/12/2025	DL-12,5	975		
31/12/2025	CC-11,5	850		

Lampiran LC.2 FTC frekuensi perpindahan tanggal 01/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		9	7					
DC					26			22
SL				26				
PT					33			
SB							35	13
ST								
LM								18
SP								

Lampiran LC.3 FTC frekuensi perpindahan tanggal 02/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		26	5					
DC					19			15
SL				5				
PT					20			
SB							21	
ST								
LM								14
SP								

Lampiran LC.4 FTC frekuensi perpindahan tanggal 03/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		54	27					
DC					38			18
SL				21				
PT							27	
SB							27	
ST								
LM								43
SP								

Lampiran LC.5 FTC frekuensi perpindahan tanggal 04/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		12	4					
DC								7
SL				45				
PT					45			
SB							31	
ST								
LM								28
SP								

Lampiran LC.6 FTC frekuensi perpindahan tanggal 05/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		28	31					
DC					13			4
SL				31				
PT					26			
SB							11	
ST								
LM								37
SP								

Lampiran LC.7 FTC frekuensi perpindahan tanggal 06/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP			9					
DC					15			15
SL				9				
PT					3			
SB							14	
ST								
LM								8
SP								

Lampiran LC.8 FTC frekuensi perpindahan tanggal 08/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		22	20					
DC					10			10
SL				20				
PT					24			
SB							33	
ST								
LM								25
SP								

Lampiran LC.9 FTC frekuensi perpindahan tanggal 09/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		16	12					
DC					14			14
SL				12				
PT					9			
SB							10	
ST								
LM								15
SP								

Lampiran LC.10 FTC frekuensi perpindahan tanggal 10/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP			13					
DC					10			10
SL				46				
PT					13			
SB							27	
ST								
LM								16
SP								

Lampiran LC.11 FTC frekuensi perpindahan tanggal 11/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		27	6					
DC					22			12
SL				8				
PT					14		13	
SB							8	
ST								
LM								13
SP								

Lampiran LC.12 FTC frekuensi perpindahan tanggal 12/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		13	41					
DC					17			8
SL				28				
PT					13			
SB							18	
ST								
LM								20
SP								

Lampiran LC.13 FTC frekuensi perpindahan tanggal 13/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		13	30					
DC								17
SL				15				
PT					54			
SB							38	
ST								
LM								36
SP								

Lampiran LC.14 FTC frekuensi perpindahan tanggal 15/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		72	160					
DC					38			24
SL				51				
PT					52		12	
SB							33	
ST								
LM								41
SP								

Lampiran LC.15 FTC frekuensi perpindahan tanggal 16/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		40	40					
DC					20			16
SL				40				
PT					22			
SB							43	
ST								
LM								30
SP								

Lampiran LC.16 FTC frekuensi perpindahan tanggal 17/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		27	44					
DC					9			26
SL				38				
PT					16			
SB							20	
ST								
LM								34
SP								

Lampiran LC.17 FTC frekuensi perpindahan tanggal 18/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		10	36					
DC					13			10
SL				20				
PT					17		12	
SB							20	
ST								
LM								29
SP								

Lampiran LC.18 FTC frekuensi perpindahan tanggal 19/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		20	18					
DC					41			36
SL				12				
PT					11			
SB							40	
ST								
LM								35
SP								

Lampiran LC.19 FTC frekuensi perpindahan tanggal 20/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		7	11					
DC					22			27
SL				58				
PT					35			
SB							45	
ST								
LM								40
SP								

Lampiran LC.20 FTC frekuensi perpindahan tanggal 22/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		74	68					
DC					39			31
SL				45				
PT					50			
SB							40	
ST								
LM								40
SP								

Lampiran LC.21 FTC frekuensi perpindahan tanggal 23/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		20	89					
DC								12
SL				51				
PT					55		25	
SB							46	
ST								
LM								52
SP								

Lampiran LC.22 FTC frekuensi perpindahan tanggal 24/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP			43					
DC					4			10
SL				58				
PT					27			
SB						10	34	
ST								10
LM								30
SP								

Lampiran LC.23 FTC frekuensi perpindahan tanggal 25/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		42	82					
DC					32			29
SL				44				
PT					59			
SB							36	
ST								
LM								63
SP								

Lampiran LC.24 FTC frekuensi perpindahan tanggal 26/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		48	23					
DC					36			14
SL				60				
PT					40			
SB							46	
ST								
LM								33
SP								

Lampiran LC.25 FTC frekuensi perpindahan tanggal 27/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		40	100					
DC					24			25
SL				81				
PT					66			
SB								
ST								
LM								75
SP								

Lampiran LC.26 FTC frekuensi perpindahan tanggal 29/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		114	128					
DC					93			108
SL				114				
PT					94			
SB							120	
ST								
LM								85
SP								

Lampiran LC.27 FTC frekuensi perpindahan tanggal 30/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		32	53					
DC					28			37
SL				52				
PT					104			
SB							62	
ST								
LM								78
SP								

Lampiran LC.28 FTC frekuensi perpindahan tanggal 31/12/2025

F\T	MP	DC	SL	PT	SB	ST	LM	SP
MP		13	34					
DC					20			15
SL				41				
PT					49			
SB							36	
ST								
LM								40
SP								

LAMPIRAN D
GAMBAR, PYTHON *CODE*, DAN PERHITUNGAN JARAK TATA LETAK USULAN

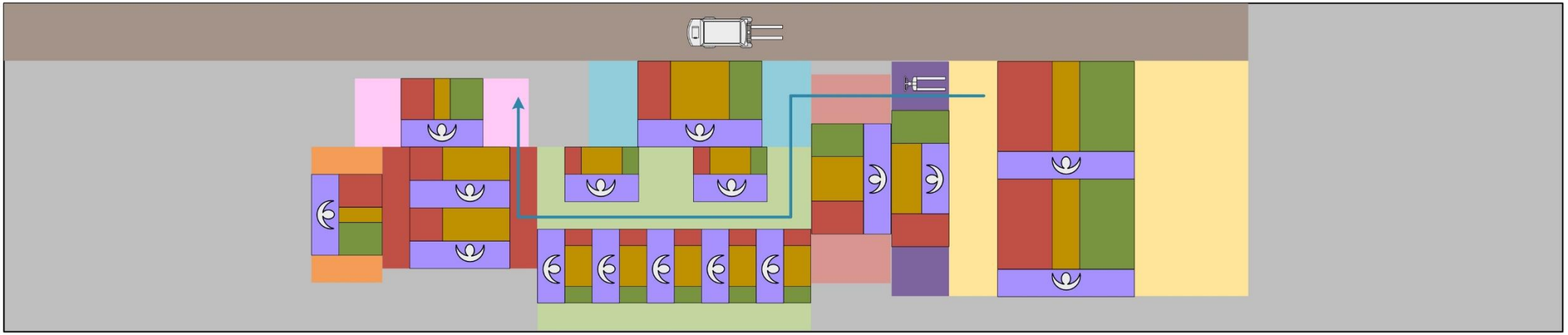
USULAN TATA LETAK LANTAI PRODUKSI
UNTUK PERUSAHAAN PRODUSEN KARTON

Alamat: Sewon, Bantul, Yogyakarta

Oleh:
Rafli Husaini Ahmad (122220027)

N
W E
S

SKALA TEMPLATE
1:200



LEGENDA
SKALA 1:2

- Area Produksi
- Jalur Forklift
- Area Departemen A (Mesin Potong)
- Area Departemen B (Mesin *Pond Die Cutting*)
- Area Departemen C (Mesin *Slotter*)
- Area Departemen D (Mesin *Pond* Tumpul)
- Area Departemen E (Meja Sablon)
- Area Departemen F (Mesin *Strapler*)
- Area Departemen G (Meja Pengeleman)
- Area Departemen H (Mesin *Strapping*)
- Jalur *Trolley*
- Operator
- Mesin Potong
- Mesin *Slotter*
- Mesin *Pond* Tumpul
- Mesin *Pond Die Cutting*
- Meja Sablon
- Meja Pengeleman
- Mesin *Stapler*
- Mesin *Strapping*
- *Forklift*
- *Trolley*

Lampiran LD.2 *Python code solver* MILP

```
import os
import tempfile
import time
import matplotlib.pyplot As plt
import matplotlib.patches As patches
import pulp

temp_path = r 'C:\temp_pulp'
If Not os.path.exists(temp_path)
os.makedirs(temp_path)

os.environ['TEMP'] = temp_path
os.environ['TMP'] = temp_path
tempfile.tempdir = temp_path

# ========================================
# 1. PENDEFINISIAN DATA (INPUT)
# ========================================
area_panjang = 57.0
area_lebar = 12.0
big_M = 1000

departemen = ['MP', 'DC', 'SL', 'PT', 'SB', 'ST', 'LM', 'SP']

all_pairs = [(departemen[i], departemen[j])
             For i in range(len(departemen))
             For j in range(i+1, len(departemen))]

frekuensi_mentah = {
    ('MP', 'DC'): 26, ('MP', 'SL'): 37,
    ('DC', 'SB'): 20, ('DC', 'SP'): 19,
    ('SL', 'PT'): 34,
    ('PT', 'SB'): 31, ('PT', 'LM'): 3,
    ('SB', 'ST'): 1,  ('SB', 'LM'): 29, ('SB', 'SP'): 1,
    ('ST', 'SP'): 1,
    ('LM', 'SP'): 32
}

frekuensi = {}
For (u, v), f in frekuensi_mentah.items()
    idx_u = departemen.index(u)
idx_v = departemen.index(v)
pasangan = (u, v) If idx_u < idx_v Else (v, u)
    frekuensi[pasangan] = frekuensi.get(pasangan, 0) + f

konfigurasi = {
    'MP': [(10.976, 8.600), (20.152, 4.300), (20.992, 4.300)],
    'DC': [(8.120, 3.140), (3.140, 8.120)],
    'SL': [(8.570, 2.100), (2.100, 8.570)],
    'PT': [(7.630, 2.900), (2.900, 7.630)],
    'SB': [(26.900, 2.000), (32.900, 2.000), (10.000, 6.700), (10.400,
6.000), (11.400, 6.000), (8.700, 8.000), (8.000, 8.700)],
    'ST': [(4.950, 2.580), (2.580, 4.950)],
    'LM': [(5.660, 4.440), (4.440, 5.660), (10.320, 2.220), (11.320,
2.220)],
```

```
    'SP': [(6.360, 2.500), (2.500, 6.360)]
}

# Data Departemen Tetap (Fixed - Himpunan F)
F_fixed = {
    'MP': (35.0, 5.6),
    'SP': (11.0, 8.0)
}

# Kamus Kode Warna Hex Spesifik untuk Visualisasi
kode_warna = {
    'MP': '#fee599',
    'DC': '#92cddc',
    'SL': '#7e649e',
    'PT': '#d9958f',
    'SB': '#c4d6a0',
    'ST': '#f59d56',
    'LM': '#c05046',
    'SP': '#ffcaf5'
}

# ========================================
# 2. INISIALISASI MODEL
# ========================================
model = pulp.LpProblem("Optimasi_Tata_Letak_Pabrik", pulp.LpMinimize)

# ========================================
# 3. VARIABEL KEPUTUSAN
# ========================================
x = pulp.LpVariable.dicts("x", departemen, lowBound = 0)
y = pulp.LpVariable.dicts("y", departemen, lowBound = 0)

P = pulp.LpVariable.dicts("P", departemen, lowBound = 0)
L = pulp.LpVariable.dicts("L", departemen, lowBound = 0)

Y_bin = {}
For i in departemen
    For k in range(len(konfigurasi[i]))
        Y_bin[(i, k)] = pulp.LpVariable(f"Y_{i}_{k}", cat="Binary")

# Variabel dekomposisi arah untuk Rectilinear
x_plus = pulp.LpVariable.dicts("x_plus", all_pairs, lowBound = 0)
x_min = pulp.LpVariable.dicts("x_min", all_pairs, lowBound = 0)
y_plus = pulp.LpVariable.dicts("y_plus", all_pairs, lowBound = 0)
y_min = pulp.LpVariable.dicts("y_min", all_pairs, lowBound = 0)

# Variabel jarak Rectilinear absolut
d_rect = pulp.LpVariable.dicts("d_rect", all_pairs, lowBound = 0)

z1 = pulp.LpVariable.dicts("z1", all_pairs, cat = "Binary")
z2 = pulp.LpVariable.dicts("z2", all_pairs, cat = "Binary")

# ========================================
# 4. FUNGSI TUJUAN
# ========================================
# Meminimalkan total jarak pergerakan material handling (Jarak
Rectilinear)
```

```
model += pulp.lpSum(frekuensi.Get((i, j), 0) * d_rect[(i, j)] For i, j In
all_pairs)

# ========================================
# 5. KENDALA-KENDALA (CONSTRAINTS)
# ========================================
For i in departemen
    model += pulp.lpSum(Y_bin[(i, k)] For k In
range(len(konfigurasi[i]))) == 1
    model += P[i] == pulp.lpSum(konfigurasi[i][k][0] * Y_bin[(i, k)] For
k In range(len(konfigurasi[i])))
    model += L[i] == pulp.lpSum(konfigurasi[i][k][1] * Y_bin[(i, k)] For
k In range(len(konfigurasi[i])))

    model += x[i] >= P[i] / 2
    model += y[i] >= L[i] / 2
    model += x[i] + P[i] / 2 <= area_panjang
    model += y[i] + L[i] / 2 <= area_lebar - 2.1

For dept_id, (xf, yf) in F_fixed.items()
    model += x[dept_id] == xf, f"Fixed_X_{dept_id}"
    model += y[dept_id] == yf, f"Fixed_Y_{dept_id}"

For (i, j) in all_pairs
    # Linierisasi selisih koordinat
    model += x[i] - x[j] == x_plus[(i, j)] - x_min[(i, j)]
    model += y[i] - y[j] == y_plus[(i, j)] - y_min[(i, j)]

    # Formulasi akumulasi jarak Rectilinear
    model += d_rect[(i, j)] == x_plus[(i, j)] + x_min[(i, j)] +
y_plus[(i, j)] + y_min[(i, j)]

    # Kendala pencegahan tumpang tindih (Big-M)
    model += x[j] - x[i] + big_M * (z1[(i, j)] + z2[(i, j)]) >= (P[i] +
P[j]) / 2
    model += x[i] - x[j] + big_M * (1 - z1[(i, j)] + z2[(i, j)]) >= (P[i]
+ P[j]) / 2
    model += y[j] - y[i] + big_M * (z1[(i, j)] + 1 - z2[(i, j)]) >= (L[i]
+ L[j]) / 2
    model += y[i] - y[j] + big_M * (1 - z1[(i, j)] + 1 - z2[(i, j)]) >=
(L[i] + L[j]) / 2

# ========================================
# 6. EKSEKUSI SOLVER & PEREKAMAN WAKTU
# ========================================
solver = pulp.PULP_CBC_CMD(msg = True)

print("Memulai komputasi algoritma MILP (Metode Rectilinear)...")
waktu_mulai = time.time()
model.solve(solver)
waktu_selesai = time.time()
durasi_komputasi = waktu_selesai - waktu_mulai

# ========================================
# 7. OUTPUT HASIL OPTIMASI LAYOUT
# ========================================
print("\n" + "=" * 40)
```

```
print("HASIL OPTIMASI TATA LETAK PT IKI")
print("=" * 40)
print(f"Status Solusi : {pulp.LpStatus[model.status]}")

If model.status == pulp.LpStatusOptimal
fig, ax = plt.subplots(figsize = (12, 8))
    plt.subplots_adjust(bottom = 0.4)

pabrik = patches.Rectangle((0, 0), area_panjang, area_lebar, linewidth =
2, edgecolor ='black', facecolor='none')
ax.add_patch(pabrik)
    jalur_forklift = patches.Rectangle((0, area_lebar - 2.1),
area_panjang, 2.1, linewidth = 0, facecolor ='gray', alpha=0.3,
hatch='//')
    ax.add_patch(jalur_forklift)
    ax.text(area_panjang / 2, area_lebar - 1.05, 'Jalur Forklift (2.1
m)', ha='center', va='center', fontsize=9, color='dimgray')

teks_dashboard = (
        f"REKAPITULASI HASIL OPTIMASI MILP\n"
        f"-----------------------------------------------------------------
------------------\n"
        f"Total Jarak (T) Rectilinear : {pulp.value(model.objective):.2f}
meter\n"
        f"Durasi Komputasi Algoritma  : {durasi_komputasi:.2f} detik\n"
        f"Eksplorasi Nodes/Iterasi    : Terekam pada Log Terminal (B&B
Method)\n"
        f"Status Konvergensi          :
{pulp.LpStatus[model.status].upper()}\n\n"
        f"KONFIGURASI & KOORDINAT STASIUN KERJA:\n"
        f"-----------------------------------------------------------------
------------------\n"
    )

    For i in departemen
        pusat_x = x[i].varValue
        pusat_y = y[i].varValue
        panjang_P = P[i].varValue
        lebar_L = L[i].varValue

        status_fix = "(FIXED)" If i In F_fixed Else ""

        teks_dashboard += f"Dept {i:2s} {status_fix:>7s} | Pusat(x,y):
({pusat_x:>5.2f}, {pusat_y:>5.2f}) | Dimensi (P x L): {panjang_P:>6.2f} x
{lebar_L:>6.2f}\n"

        kiri_bawah_x = pusat_x - (panjang_P / 2)
kiri_bawah_y = pusat_y - (lebar_L / 2)
lw = 2.5 If i In F_fixed Else 1.0

        rect = patches.Rectangle(
            (kiri_bawah_x, kiri_bawah_y),
            panjang_P, lebar_L,
            linewidth = lw, edgecolor ='black', facecolor=kode_warna[i],
alpha=1.0
        )
ax.add_patch(rect)
```

```
ax.text(pusat_x, pusat_y, f'{i}', ha='center', va='center', fontsize=11,
fontweight='bold', color='black')

print(f"Dept {i:2s} {status_fix:>7s} | Pusat: ({pusat_x:>5.2f},
{pusat_y:>5.2f}) | Dimensi: {panjang_P:>6.2f} x {lebar_L:>6.2f}")

print("-" * 40)
print(f"Total Jarak Perpindahan (Rectilinear) :
{pulp.value(model.objective):.2f} meter")
print(f"Durasi Komputasi                    : {durasi_komputasi:.2f}
detik")

fig.text(0.1, 0.33, teks_dashboard, va ='top', ha='left', fontsize=10,
family='monospace', color='black')

ax.set_xlim(-2, area_panjang + 2)
ax.set_ylim(-2, area_lebar + 2)
ax.set_aspect('equal')
ax.set_title("Optimal Facility Layout PT IKI", fontsize = 14, fontweight
='bold')
ax.set_xlabel("Panjang Pabrik (meter)")
    ax.set_ylabel("Lebar Pabrik (meter)")
ax.grid(True, linestyle ='--', alpha=0.5)

plt.show()

Else
print("Solusi optimal tidak ditemukan. Area pabrik mungkin terlalu
sempit, atau titik koordinat departemen statis (Fixed) mendisrupsi batas
dimensi fasilitas lainnya.")
```

Lampiran LD.3 Perhitungan jarak MP ke DC

Titik pusat departemen MP (35,000; 5,600) dan departemen DC (19,310; 8,320).

$d = |35{,}000 - 19{,}310| + |5{,}600 - 8{,}320|$

$d = |15{,}690| + |-2{,}720|$

$d = 15{,}690 + 2{,}720 = 18{,}410$ meter

Lampiran LD.4 Perhitungan jarak MP ke SL

Titik pusat departemen MP (35,000; 5,600) dan departemen SL (28,460; 5,600).

$d = |35{,}000 - 28{,}460| + |5{,}600 - 5{,}600|$

$d = |6{,}540| + |0{,}000|$

$d = 6{,}540 + 0{,}000 = 6{,}540$ meter

Lampiran LD.5 Perhitungan jarak DC ke SB

Titik pusat departemen DC (19,310; 8,320) dan departemen SB (19,310; 3,750).

$d = |19{,}310 - 19{,}310| + |8{,}320 - 3{,}750|$

$d = |0{,}000| + |4{,}570|$

$d = 0{,}000 + 4{,}570 = 4{,}570$ meter

Lampiran LD.6 Perhitungan jarak DC ke SP

Titik pusat departemen DC (19,310; 8,320) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |19{,}310 - 11{,}000| + |8{,}320 - 8{,}000|$

$d = |8{,}310| + |0{,}320|$

$d = 8{,}310 + 0{,}320 = 8{,}630$ meter

Lampiran LD.7 Perhitungan jarak SL ke PT

Titik pusat departemen SL (28,460; 5,600) dan departemen PT (25,960; 5,600).

$d = |28{,}460 - 25{,}960| + |5{,}600 - 5{,}600|$

$d = |2{,}500| + |0{,}000|$

$d = 2{,}500 + 0{,}000 = 2{,}500$ meter

Lampiran LD.8 Perhitungan jarak PT ke SB

Titik pusat departemen PT (25,960; 5,600) dan departemen SB (19,310; 3,750).

$d = |25{,}960 - 19{,}310| + |5{,}600 - 3{,}750|$

$d = |6{,}650| + |1{,}850|$

$d = 6{,}650 + 1{,}850 = 8{,}500$ meter

Lampiran LD.9 Perhitungan jarak PT ke LM

Titik pusat departemen PT (25,960; 5,600) dan departemen LM (11,280; 4,530).

$d = |25{,}960 - 11{,}280| + |5{,}600 - 4{,}530|$

$d = |14{,}680| + |1{,}070|$

$d = 14{,}680 + 1{,}070 = 15{,}750$ meter

Lampiran LD.10 Perhitungan jarak SB ke ST

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen ST (7,160; 3,750).

$d = |19{,}310 - 7{,}160| + |3{,}750 - 3{,}750|$

$d = |12{,}150| + |0{,}000|$

$d = 12{,}150 + 0{,}000 = 12{,}150$ meter

Lampiran LD.11 Perhitungan jarak SB ke LM

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen LM (11,280; 4,530).

$d = |19{,}310 - 11{,}280| + |3{,}750 - 4{,}530|$

$d = |8{,}030| + |-0{,}780|$

$d = 8{,}030 + 0{,}780 = 8{,}810$ meter

Lampiran LD.12 Perhitungan jarak SB ke SP

Titik pusat departemen SB (19,310; 3,750) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |19{,}310 - 11{,}000| + |3{,}750 - 8{,}000|$

$d = |8{,}310| + |-4{,}250|$

$d = 8{,}310 + 4{,}250 = 12{,}560$ meter

Lampiran LD.13 Perhitungan jarak ST ke SP

Titik pusat departemen ST (7,160; 3,750) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |7{,}160 - 11{,}000| + |3{,}750 - 8{,}000|$

$d = |-3{,}840| + |-4{,}250|$

$d = 3{,}840 + 4{,}250 = 8{,}090$ meter

Lampiran LD.14 Perhitungan jarak LM ke SP

Titik pusat departemen LM (11,280; 4,530) dan departemen SP (11,000; 8,000).

$d = |11{,}280 - 11{,}000| + |4{,}530 - 8{,}000|$

$d = |0{,}280| + |-3{,}470|$

$d = 0{,}280 + 3{,}470 = 3{,}750$ meter

LAMPIRAN E

OUTPUT SIMULASI TATA LETAK AWAL DAN SIMULASI TATA LETAK USULAN

Lampiran LE.1 Hasil *output running* produk *Die Cut Box* simulasi tata letak awal

Name	***Replication***	***Total Exits***	***Actual Output***
Strapped Die Box	1	311	1555
Strapped Die Box	2	298	1490
Strapped Die Box	3	275	1375
Strapped Die Box	4	282	1410
Strapped Die Box	5	275	1375
Strapped Die Box	6	301	1505
Strapped Die Box	7	287	1435
Strapped Die Box	8	278	1390
Strapped Die Box	9	324	1620
Strapped Die Box	10	280	1400
Strapped Die Box	11	292	1460
Strapped Die Box	12	287	1435
Strapped Die Box	13	297	1485
Strapped Die Box	14	286	1430
Strapped Die Box	15	278	1390
Strapped Die Box	16	283	1415
Strapped Die Box	17	291	1455
Strapped Die Box	18	292	1460
Strapped Die Box	19	291	1455
Strapped Die Box	20	323	1615
Strapped Die Box	21	296	1480
Strapped Die Box	22	266	1330
Strapped Die Box	23	291	1455
Strapped Die Box	24	318	1590
Strapped Die Box	25	299	1495
Strapped Die Box	26	271	1355
Strapped Die Box	27	265	1325

Lampiran LE.2 Hasil *output running* produk *Carton Box* simulasi tata letak awal

Name	***Replication***	***Total Exits***	***Actual Output***
Strapped Carton Box	1	396	1980
Strapped Carton Box	2	410	2050
Strapped Carton Box	3	422	2110
Strapped Carton Box	4	412	2060
Strapped Carton Box	5	419	2095
Strapped Carton Box	6	415	2075
Strapped Carton Box	7	408	2040
Strapped Carton Box	8	421	2105
Strapped Carton Box	9	401	2005
Strapped Carton Box	10	424	2120
Strapped Carton Box	11	413	2065
Strapped Carton Box	12	420	2100
Strapped Carton Box	13	399	1995
Strapped Carton Box	14	400	2000
Strapped Carton Box	15	426	2130
Strapped Carton Box	16	415	2075
Strapped Carton Box	17	429	2145
Strapped Carton Box	18	411	2055
Strapped Carton Box	19	404	2020
Strapped Carton Box	20	367	1835
Strapped Carton Box	21	417	2085
Strapped Carton Box	22	429	2145
Strapped Carton Box	23	410	2050
Strapped Carton Box	24	391	1955
Strapped Carton Box	25	410	2050
Strapped Carton Box	26	420	2100
Strapped Carton Box	27	438	2190

Lampiran LE.3 Hasil *output running* produk *Die Cut Box* simulasi tata letak usulan

Name	***Replication***	***Total Exits***	***Actual Output***
Strapped Die Box	1	383	1915
Strapped Die Box	2	384	1920
Strapped Die Box	3	400	2000
Strapped Die Box	4	377	1885
Strapped Die Box	5	388	1940
Strapped Die Box	6	413	2065
Strapped Die Box	7	368	1840
Strapped Die Box	8	377	1885
Strapped Die Box	9	407	2035
Strapped Die Box	10	383	1915
Strapped Die Box	11	413	2065
Strapped Die Box	12	391	1955
Strapped Die Box	13	407	2035
Strapped Die Box	14	375	1875
Strapped Die Box	15	350	1750
Strapped Die Box	16	395	1975
Strapped Die Box	17	400	2000
Strapped Die Box	18	401	2005
Strapped Die Box	19	411	2055
Strapped Die Box	20	374	1870
Strapped Die Box	21	363	1815
Strapped Die Box	22	408	2040
Strapped Die Box	23	391	1955
Strapped Die Box	24	388	1940
Strapped Die Box	25	394	1970
Strapped Die Box	26	404	2020
Strapped Die Box	27	379	1895

Lampiran LE.4 Hasil *output running* produk *Carton Box* simulasi tata letak usulan

Name	*Replication*	*Total Exits*	*Actual Output*
Strapped Carton Box	1	542	2710
Strapped Carton Box	2	544	2720
Strapped Carton Box	3	547	2735
Strapped Carton Box	4	544	2720
Strapped Carton Box	5	555	2775
Strapped Carton Box	6	539	2695
Strapped Carton Box	7	527	2635
Strapped Carton Box	8	557	2785
Strapped Carton Box	9	543	2715
Strapped Carton Box	10	554	2770
Strapped Carton Box	11	496	2480
Strapped Carton Box	12	581	2905
Strapped Carton Box	13	535	2675
Strapped Carton Box	14	538	2690
Strapped Carton Box	15	538	2690
Strapped Carton Box	16	534	2670
Strapped Carton Box	17	548	2740
Strapped Carton Box	18	563	2815
Strapped Carton Box	19	548	2740
Strapped Carton Box	20	572	2860
Strapped Carton Box	21	570	2850
Strapped Carton Box	22	526	2630
Strapped Carton Box	23	541	2705
Strapped Carton Box	24	519	2595
Strapped Carton Box	25	535	2675
Strapped Carton Box	26	538	2690
Strapped Carton Box	27	507	2535