

**OPTIMASI PERENCANAAN KEBUTUHAN MATERIAL PADA
SISTEM PRODUKSI GABUNGAN MTS-MTO DENGAN
PERTIMBANGAN KAPASITAS TERBATAS MENGGUNAKAN
EVOLUTIONARY ALGORITHM**

(Studi Kasus: Elektronik Control Module)

TUGAS AKHIR

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



Nama : Dinda Meilia Rhepon

No. Mahasiswa : 22522285

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

2026

PERNYATAAN KEASLIAN

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

Yogyakarta, 18 Juni 2026



Dinda Meilia Rhepon

22522285

SURAT BUKTI PENELITIAN



**FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI**

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. fti@uii.ac.id
W. fti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 295/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/VI/2026

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Dinda Meilia Rhepon

Nim : 22522285

Jurusan : Teknik Industri

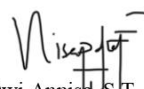
Dosen Pembimbing : Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul **"OPTIMASI PERENCANAAN KEBUTUHAN MATERIAL PADA SISTEM PRODUKSI GABUNGAN MTS-MTO DENGAN PERTIMBANGAN KAPASITAS TERBATAS MENGGUNAKAN EVOLUTIONARY ALGORITHM (Studi Kasus: Elektronik Control Module)"** mulai pelaksanaan penelitian 4 Februari 2026 sampai 8 Juni 2026.

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 17 Juni 2026
Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi


Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

**LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING
JUDUL TUGAS AKHIR**



Disusun Oleh :

Nama : Dinda Meilia Rhepon

No. Mahasiswa : 22522285

Yogyakarta, 18 Juni 2026

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
OPTIMASI PERENCANAAN KEBUTUHAN MATERIAL PADA SISTEM
PRODUKSI GABUNGAN MTS-MTO DENGAN PERTIMBANGAN
KAPASITAS TERBATAS MENGGUNAKAN EVOLUTIONARY ALGORITHM
(Studi Kasus: Elektronik Control Module)

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Dinda Meilia Rhepon

No. Mahasiswa : 22522285

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

Yogyakarta, 29 Juni 2026

Tim Penguji

Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T.,
M.Sc., Ph.D

Ketua

Wahyudi Sutrisno, S.T., M.M.

Anggota I

Elanjati Worldailmi, S.T., M.Sc

Anggota II



Mengetahui,

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



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

015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa telah memberikan kesehatan dan kekuatan sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua penulis, Bapak Poneto, S.Sos., M.M. dan Ibu Ermawati, S.Sos., ketiga kakak penulis, Almh Sarleni Rhepon, M.Pd., Kons., Adri Anas Rhepon, S.T., dan drh. Ines Evitri Rhepon, yang selalu mendukung penulis hingga penulis bisa mencapai titik akhir dari perkuliahan ini. Penulis juga mempersembahkan Tugas Akhir ini kepada seluruh dosen Teknik Industri Universitas Islam Indonesia yang telah membimbing penulis, serta sebagai dedikasi penulis sebagai mahasiswa Teknik Industri UII.

MOTTO

"Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan."

(Q.S. Al Insyirah: 5-6)

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Warrahmatullahi Wabaraakaatuh

Alhamdulillahirabbil'amin, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis diberikan kelancaran, kemudahan, dan petunjuk dalam menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Optimasi Perencanaan Kebutuhan Material pada Sistem Produksi Gabungan MTS-MTO dengan Pertimbangan Kapasitas Terbatas Menggunakan Evolutionary Algorithm” sebagai pemenuhan dedikasi penulis dalam menyelesaikan perkuliahan di Teknik Industri Universitas Islam Indonesia. Shalawat dan salam tak lupa penulis curahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta umat muslim yang mengikuti ajaran hingga akhir zaman.

Penulis, dalam menyelesaikan tugas akhir ini, mengalami berbagai rintangan serta hambatan yang berarti dan sangat membangun. Namun, atas bantuan dan dukungan penuh dari berbagai pihak penulis dapat menyelesaikan penulisan naskah ini dengan baik. Untuk itu, dengan penuh kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Sri Kusumadewi, S.Si., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Dr. Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng., Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., PhD., IPM selaku Ketua Program Studi Program Sarjana Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia, sekaligus selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua penulis tercinta, Bapak Poneto, S.Sos., M.M. dan Ibu Ermawati, S.Sos., yang senantiasa mengiringi perjalanan penulis dengan do'a dan segala bentuk dukungan dan pengertian penuh tanpa tuntutan, serta selalu menemani setiap langkah penulis dalam nama akhir penulis, “Rhepon”.
5. Saudara kandung penulis, Uni yang telah berpulang, Kakak, dan Inga, yang selalu siap mendengarkan keluh kesah penulis dan memberikan motivasi agar penulis selalu bisa bangkit.
6. *Partner* terdekat penulis, Calvin, Aqila, Lintang, dan Zuyin, yang selalu bersedia menjadi tempat bertukar cerita, tangis, dan tawa bersama selama di kota perantaraan yang jauh dari kampung halaman, yang membuat segala rintangan terasa hangat dan ringan untuk dijalani.
7. Sahabat sekaligus keluarga di Lab Siman, Daji, Yudhis, Alung, Aji, Sulthan, dan Fildzah, termasuk Bu Nisa dan Pak Heri sebagai orang tua penulis di Lab, yang menjadikan kehidupan akademik penulis tidak terasa menyiksa namun menyenangkan, sekaligus menjadi saksi penulis bertumbuh dan berkembang.
8. Seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu namun menjadi saksi perjuangan penulis, terima kasih.

ABSTRAK

Industri manufaktur *Electronic Control Module* (ECM) menghadapi dilema operasional pada sistem produksi gabungan *Make to Stock* (MTS) dan *Make to Order* (MTO), di mana sering terjadi kanibalisasi alokasi material stasiun kerja yang berkapasitas terbatas. Kebijakan konvensional perusahaan yang mengandalkan strategi produksi rata-rata konstan memicu ketidakefisienan finansial berupa penumpukan persediaan (*overstock*). Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan sistem *Material Requirements Planning* (MRP) hibrida guna meminimalkan total biaya operasional menggunakan pendekatan *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) yang dieksekusi dengan *Evolutionary Algorithm* pada *Excel Solver*. Hasil optimasi menunjukkan kondisi awal konvensional mengakibatkan total biaya operasional membengkak hingga Rp2.483.834.200,00 akibat ledakan biaya simpan (*holding cost*). Melalui integrasi kendala kapasitas reguler di lima stasiun kerja serta batas toleransi permintaan tertolak maksimal 12%, sistem usulan berhasil menciptakan *cost trade-off* yang rasional dengan menekan total biaya menjadi Rp2.160.070.000,00 (hemat bersih Rp323.764.200,00). Model usulan terbukti mampu menjaga tingkat pelayanan (*service level*) secara konvergen di atas target manajemen, yaitu sebesar 88,4% untuk produk P1, 88,2% untuk P2, dan 89,0% untuk P3. Penelitian ini berhasil melahirkan keputusan penjadwalan pemenuhan material yang ramping, adaptif terhadap fluktuasi *demand*, dan layak secara fisik untuk dieksekusi di lantai produksi.

Kata Kunci: *Material Requirement Planning* (MRP), Gabungan MTS-MTO, *Evolutionary Algorithm*, *Cost Trade-Off*, *Service Level*.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2. 1 Kajian Literatur.....	8
2. 2 Landasan Teori	15
2.2.1 Material Requirement Planning (MRP)	15
2.2.2 Bill of Materials (BOM)	17
2.2.3 Sistem Produksi Make to Stock (MTS) dan Make to Order (MTO)	17
2.2.4 Pemrograman Linear dan Non-Linear	19
2.2.5 Algoritma Optimasi Ms. Excel Solver.....	20
2.2.6 Manajemen Persediaan dan <i>Service Level</i>	20
BAB III METODE PENELITIAN	21
3. 1 Jenis dan Pendekatan Penelitian	21
3.2 Objek dan Subjek Penelitian.....	21
3.3 Jenis Sumber Data	22
3.3.1 Data Primer	22
3.3.2 Data Sekunder.....	22
3.4 Teknik Pengumpulan Data	23
3.5 Variabel Penelitian	24
3.5.1 Variabel Keputusan.....	24
3.5.2 Variabel Parameter	24
3.5.3 Variabel <i>Output</i>	26
3.6 Metode Analisis Data	26
3.6.1 Analisis Sistem Eksisting.....	26
3.6.2 Analisis Integrasi Struktur Produk dan Penentuan Parameter Input.....	27
3.6.3 Formulasi Model Optimasi Matematika	27
3.6.4 Analisis Hasil Optimasi <i>Evolutionary Algorithm</i>	27
3.6.5 Analisis Utilisasi dan Beban Kapasitas Stasiun Kerja.....	28

3.6.6	Analisis Perbandingan Parameter Biaya (<i>Cost Trade-Off</i>).....	28
3.3.7	Analisis Capaian <i>Service Level</i>	28
3.7	Model Matematika.....	29
3.8	Alur Penelitian.....	30
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA		35
4.1	Pengumpulan Data.....	35
4.2	Formulasi Masalah	35
4.3	Data Penelitian.....	36
4.3.1	Deskripsi dan Struktur Produk.....	36
4.3.2	Data <i>Forecast</i> Produk MTS	43
4.3.3	Data Kapasitas Stasiun Kerja.....	47
4.3.4	Data Parameter Biaya	49
4.4	Pengolahan Data	50
4.4.1	Pengolahan Permintaan MTO.....	52
4.4.2	Penyusunan Tabel MRP.....	54
4.4.3	Beban Kerja pada Stasiun Kerja	74
4.4.4	Penghitungan Total Cost.....	77
4.4.5	Optimasi Evolutionary Algorithm	80
BAB V PEMBAHASAN		83
5.1	Hasil MRP Usulan.....	83
5.2	Analisis Beban Stasiun Kerja	86
5.3	Analisis <i>Total Cost</i>	91
5.4	Analisis Capaian Target <i>Service Level</i>	93
BAB VI PENUTUP		95
6.1	Kesimpulan.....	95
6.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA.....		98
LAMPIRAN		A-1

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 <i>Sub-assembly</i> Produk Level 1	37
Tabel 4. 2 Data Komponen Level 2	38
Tabel 4. 3 Identifikasi Komponen pada Produk	41
Tabel 4. 4 <i>Forecast</i> Produk MTS	43
Tabel 4. 5 Permintaan Produk MTO	44
Tabel 4. 6 Inventori Perusahaan	45
Tabel 4. 7 Kapasitas Stasiun Kerja	47
Tabel 4. 8 Waktu Proses Produksi	48
Tabel 4. 9 Parameter Biaya	49
Tabel 4. 10 Pengolahan Permintaan MTO	52
Tabel 4. 11 MRP Produk <i>Smart Water Meter Node</i>	55
Tabel 4. 12 MRP Produk <i>Industrial Vibration Monitor</i>	55
Tabel 4. 13 MRP Produk <i>Cold-Chain Temperature Logger</i>	56
Tabel 4. 14 MRP <i>Sensor Board Assembly</i>	57
Tabel 4. 15 MRP <i>Power & Comms Assembly</i>	57
Tabel 4. 16 MRP <i>Enclosure & Harness Kit</i>	58
Tabel 4. 17 <i>Vibration Sensor Board Assembly</i>	59
Tabel 4. 18 <i>Power & Comms Assembly</i>	59
Tabel 4. 19 <i>Rugged Enclosure Kit</i>	60
Tabel 4. 20 MRP <i>Temperature Sensor Board Assembly</i>	60
Tabel 4. 21 MRP <i>Battery & Power Assembly</i>	61
Tabel 4. 22 <i>Enclosure & Label Kit</i>	61
Tabel 4. 23 MRP PCB Bare Board	62
Tabel 4. 24 MRP MCU (<i>microcontroller</i>)	63
Tabel 4. 25 RF Module (<i>LoRa/BLE</i>)	63
Tabel 4. 26 MRP <i>Cellular Module</i>	64
Tabel 4. 27 MRP <i>Accelerometer</i>	64
Tabel 4. 28 MRP <i>Temperature Sensor IC</i>	65
Tabel 4. 29 MRP <i>Pressure/flow Sensor Element</i>	65
Tabel 4. 30 MRP <i>Battery Pack</i>	66
Tabel 4. 31 MRP <i>DC-DC Converter Module</i>	66
Tabel 4. 32 MRP <i>ESD/Protection Kit</i>	67
Tabel 4. 33 MRP <i>Connectors Set</i>	67
Tabel 4. 34 MRP <i>Wiring Harness</i>	68
Tabel 4. 35 MRP <i>Enclosure</i>	68
Tabel 4. 36 <i>Gasket & Screws Kit</i>	69
Tabel 4. 37 MRP <i>Label & Packaging Set</i>	70
Tabel 4. 38 MRP <i>Heat Sink/Potting Compound</i>	70
Tabel 4. 39 Beban Stasiun Kerja 1	74
Tabel 4. 40 Beban Stasiun Kerja 2	74
Tabel 4. 41 Beban Stasiun Kerja 3	75
Tabel 4. 42 Beban Stasiun Kerja 4	75
Tabel 4. 43 Beban Stasiun Kerja 5	75

Tabel 4. 44 Perhitungan <i>Total Cost</i>	78
Tabel 5. 1 <i>Planned Order Received</i> Usulan	83

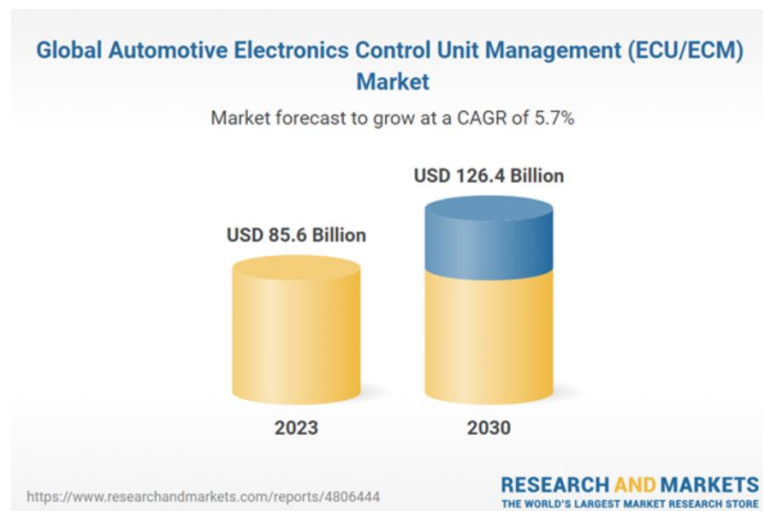
DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Alur Penelitian	32
Gambar 4. 1 BOM Produk SWMN	37
Gambar 4. 2 BOM Produk IVM.....	37
Gambar 4. 3 BOM Produk CCTL	37
Gambar 4. 4 Optimasi <i>Evolutionary Algorithm</i>	81
Gambar 5. 1 Grafik Beban Stasiun Kerja 1	86
Gambar 5. 2 Grafik Beban Stasiun Kerja 2	87
Gambar 5. 3 Grafik Beban Stasiun Kerja 3	88
Gambar 5. 4 Grafik Beban Stasiun Kerja 4	89
Gambar 5. 5 Grafik Beban Stasiun Kerja 5	90

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur elektronik memiliki peran penting dan strategis dalam menunjang perkembangan teknologi modern, terutama pada produksi komponen vital seperti *Electronic Control Module* (ECM). ECM merupakan komponen elektronik yang berfungsi sebagai pusat pengendali sistem di berbagai perangkat otomotif, industri, dan elektronik konsumen. Permintaan pasar terhadap ECM menunjukkan pertumbuhan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Pasar global untuk ECM mencapai USD 85,6 miliar pada tahun 2023 dan diproyeksikan meningkat menjadi USD 126,4 miliar pada tahun 2030. Pertumbuhan yang pesat ini didorong oleh peralihan industri elektronik, terutama pada sektor otomotif yang beralih ke kendaraan Listrik *hybrid* di waktu yang akan datang. Tingginya proyeksi pertumbuhan pasar ECM ini mengindikasikan bahwa manufaktur ECM menghadapi tekanan untuk meningkatkan kapasitas produksi sekaligus menjaga efisiensi operasional produksi dan kualitas produk, yang menjadikan optimasi sistem perencanaan produksi sebagai kebutuhan yang semakin krusial (Wood, 2024).



Gambar 1. 1 Proyeksi Pasar Global ECM

Material Requirement Planning (MRP) merupakan salah satu tahapan dalam sistem perencanaan dan pengendalian produksi yang paling banyak diterapkan di industri

manufaktur untuk menentukan kebutuhan material dan jadwal produksi. Penerapan MRP merupakan salah satu strategi bisnis perusahaan untuk bersaing dan meningkatkan performa operasional (Hasanati et al., 2019). Dengan menerapkan MRP, perusahaan sekaligus melakukan pengendalian persediaan barang atau bahan baku yang merupakan upaya agar permintaan terpenuhi dan mengurangi adanya risiko stok berlebih (*overstock*), kekurangan stok (*understock*), ataupun produk cacat (Uyun et al., 2020).

Dalam praktik dunia manufaktur industri, tantangan yang kerap dihadapi perusahaan adalah kondisi ketidakpastian yang terjadi. Ketidakpastian ini meliputi permintaan, *lead time*, kondisi mesin, *delay* pada transportasi, keterlambatan pengiriman pada rantai pasok, dan hal yang berkaitan dengan pengecekan kualitas akhir produk (*quality control*) (Ben-Ammar et al., 2021). Permasalahan yang dihadapi perusahaan ini dapat memberikan efek domino pada manajemen perusahaan, mulai dari kenaikan biaya produksi, penurunan kualitas produk, keterlambatan pengiriman kepada konsumen, bahkan sampai tidak terpenuhinya permintaan konsumen (Daroini & Himawan, 2021).

Salah satu permasalahan utama yang dihadapi dalam proses produksi ECM yang dinamis adalah perusahaan kerap terjebak dalam dilema antara memproduksi produk MTO (*Make to Order*) berdasarkan pesanan untuk meminimalisasi risiko persediaan, atau memproduksi produk MTS (*Make to Stock*) guna menjamin kecepatan pengiriman dengan mengadakan persediaan berupa stok. Berdasarkan hasil observasi dan wawancara dengan pihak manajemen perusahaan, dilema sistem gabungan ini memicu terjadinya kesalahan alokasi produk di lapangan. Perusahaan sering kali terpaksa mengambil persediaan barang jadi yang seharusnya dialokasikan untuk memenuhi instrument peramalan MTS, demi dialihkan secara instan (*cross-allocation*) untuk memenuhi pesanan mendadak konsumen MTO yang memiliki batasan waktu pengiriman ketat.

Fenomena dilema dalam sistem gabungan MTS-MTO ini tercermin nyata pada kondisi operasional perusahaan saat ini yang menerapkan sistem *Business to Business* (B2B), di mana sistem perencanaan material masih mengandalkan kebijakan *bulking purchase* (pembelian atau pemesanan material dalam volume besar sekaligus). Kebijakan konvensional ini memicu dua dampak ekstrem yang merugikan aktivitas manufaktur secara bergantian. Pada satu periode, akibat kedatangan material yang menumpuk dari

hasil *bulking purchase*, rantai produksi mengalami *overstock* yang tidak seimbang dengan kapasitas lini rakit, sehingga stasiun kerja terpaksa menghentikan aktivitas pengerjaan (*mesin idle*) demi menahan laju penumpukan barang jadi. Sebaliknya, pada periode berikutnya, karena tidak adanya sinkronisasi antara jadwal kedatangan material dengan prioritas produksi gabungan, terjadi kelangkaan pasokan komponen kritis di tengah melonjaknya pesanan konsumen. Akibat keterbatasan pasokan tersebut, perusahaan berulang kali terpaksa menolak *demand* potensial yang masuk karena sistem tidak mampu menjamin ketepatan waktu pemenuhan pesanan (*due date*). Kegagalan sinkronisasi finansial dan operasional ini menegaskan bahwa kebijakan *bulking purchase* tidak lagi relevan untuk menghadapi fluktuasi pasar ECM yang dinamis (Sunarni et al., 2025). Dalam menggabungkan kedua model ini, perusahaan dituntut untuk melakukan sinkronisasi yang sangat akurat pada tabel MRP agar tidak terjadi tumpang tindih alokasi material ataupun waktu produksi. Hal ini disebabkan dalam menjalankan produksi dengan sistem gabungan seperti ini tidak sederhana karena perencanaan dan control keputusan kedua jenis perencanaan ini berbeda (Beemsterboer et al., 2016).

Salah satu kelemahan lainnya dalam penerapan MRP secara gabungan ini adalah sifatnya yang mengasumsikan kapasitas produksi yang tidak terbatas. Pada kenyataannya, lini perakitan komponen dan stasiun kerja memiliki kapasitas yang terbatas. Hal ini membuktikan bahwa dalam perencanaan produksi dan kontrol persediaan perlu mempertimbangkan keterbatasan kapasitas stasiun kerja, tanpa adanya penyeimbangan beban kerja (*load balancing*) yang mempertimbangkan durasi proses per unit produk, rencana produksi yang dihasilkan MRP berisiko tidak dapat dieksekusi (*unfeasible*) (Lindahl et al., 2023).

Permasalahan lain yang tidak kalah penting adalah adanya fluktuasi beban alokasi waktu pada stasiun kerja. Berbeda dengan MRP konvensional yang mengasumsikan bahwa lintasan perakitan selalu berjalan konstan, dalam kenyataannya penggabungan varian produk MTS dan MTO yang berbagi stasiun kerja yang sama dapat memicu variabilitas waktu penyelesaian akibat perbedaan urutan perakitan komponen produk. Adanya variabilitas beban ini berpengaruh terhadap sinkronisasi antar tahapan produksi

yang dapat menyebabkan keterlambatan dalam pemenuhan permintaan pelanggan (Schlenkrich et al., 2024).

Kombinasi antara adanya batasan kapasitas dan kebutuhan penjadwalan yang presisi dalam perencanaan produksi dan kontrol inventori pada produk MTS-MTO menciptakan tantangan nyata pada perusahaan, khususnya perusahaan elektronik yang memproduksi ECM. Di satu sisi, perusahaan harus memproduksi komponen dalam jumlah lebih besar untuk mengantisipasi stok, namun di sisi lain dinamika pemenuhan pesanan gabungan dan jumlah permintaan membuat perusahaan kesulitan memastikan kapan komponen tersebut harus dilepaskan di rantai produksi. Inkonsistensi antara perencanaan MRP dengan kondisi aktual produksi perusahaan dapat menyebabkan dua kondisi ekstrem, yaitu perusahaan mengalami kelebihan inventori dan meningkatkan biaya penyimpanan, atau kekurangan material dan barang jadi sehingga tidak dapat memenuhi permintaan konsumen dan berpotensi menurunkan kepuasan pelanggan. Kombinasi permasalahan ini harus diselesaikan dengan tetap mempertimbangkan biaya produksi (*cost*) seminimal mungkin agar perusahaan tetap mendapatkan keuntungan sebesar-besarnya dan tetap memenuhi ekspektasi permintaan pelanggan.

Formulasi matematis untuk menjembatani seluruh kompleksitas variabel di atas, seperti penentuan waktu dan kuantitas produksi, kontrol tingkat persediaan, batasan kapasitas stasiun kerja, hingga minimasi biaya penalti operasional, dapat direpresentasikan secara akurat melalui pendekatan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Model MILP mampu mengakomodasi variabel keputusan yang bersifat diskrit (*integer*) seperti jumlah lot pemesanan, sekaligus variabel kontinu seperti perhitungan total biaya operasional. Namun, karena horizon perencanaan yang panjang dan banyaknya varian produk ECM yang berbagi stasiun kerja yang sama, model matematis yang terbentuk akan memiliki jumlah variabel keputusan dan batasan (*constraints*) yang sangat masif, kompleks, serta bersifat non-linear pada fungsi penaltinya (*NP-hard problem*). Pendekatan optimasi konvensional atau perangkat lunak berbasis eksak akan mengalami keterbatasan komputasi dan memakan waktu yang sangat lama (*combinatorial explosion*). Oleh karena itu, diperlukan integrasi *Evolutionary Algorithm* (Algoritma Evolusioner) sebagai mesin pengoptimasi metaheuristik. Algoritma ini

memiliki keandalan tinggi dalam menjelajahi ruang solusi yang luas secara acak namun terarah, sehingga mampu memangkas waktu komputasi secara signifikan dan menjamin ditemukannya kombinasi solusi yang optimal sekaligus efisien untuk meminimalkan total biaya operasional perusahaan (Puspitasari, 2024).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang ditemukan, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan sistem MRP pada perusahaan manufaktur elektronik dengan menggabungkan perencanaan produk MTS-MTO?
2. Berapa jumlah produksi komponen yang optimal agar kebutuhan permintaan tetap terpenuhi dengan batas toleransi *demand* tertolak tertentu?
3. Bagaimana kinerja sistem MRP hasil optimasi total biaya produksi pada produk MTS-MTO?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut ini merupakan tujuan penelitian:

1. Menemukan model sistem sistem MRP pada perusahaan manufaktur elektronik dengan menggabungkan perencanaan produk MTS-MTO.
2. Menentukan jumlah produksi komponen yang optimal agar kebutuhan permintaan tetap terpenuhi dengan batas toleransi *demand* tertolak tertentu.
3. Mengevaluasi kinerja sistem MRP hasil optimasi total biaya produksi pada produk MTS-MTO.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari diadakannya penelitian ini adalah:

A. Bagi Perusahaan

1. Perusahaan dapat menggunakan model optimasi MRP yang dikembangkan untuk meningkatkan akurasi perencanaan kebutuhan material sehingga mengurangi risiko kekurangan atau kelebihan inventori.

2. Perusahaan dapat meminimalkan total biaya produksi sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan profitabilitas.
3. Hasil penelitian memberikan rekomendasi strategi produksi yang adaptif terhadap berbagai skenario *lead time* sehingga membantu dalam pengambilan keputusan di bawah kondisi ketidakpastian.

B. Bagi Universitas

1. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode optimasi sistem MRP serta memperkaya literatur akademik di bidang Teknik Industri khususnya dalam area perencanaan dan pengendalian produksi.
2. Penelitian ini dapat menjadi jembatan kolaborasi antara universitas dengan industri manufaktur elektronik dan membuka peluang untuk penelitian aplikatif lanjutan dan implementasi hasil penelitian di dunia industri.
3. Penelitian ini memberikan kesempatan bagi mahasiswa dalam mengembangkan kompetensi untuk mengaplikasikan teori-teori yang dipelajari di perkuliahan ke dalam permasalahan nyata industri sehingga meningkatkan kemampuan analitis dan *problem-solving* mahasiswa Teknik Industri.

1.5 Batasan Penelitian

Berikut ini merupakan batasan dalam penelitian yang dilakukan:

1. Guna menjaga kerahasiaan data strategis, nama perusahaan objek penelitian disamarkan dan hanya direpresentasikan sebagai identitas anonim.
2. Penelitian difokuskan secara spesifik pada lini produk utama *Electronic Control Module* (ECM) yang mencakup tiga varian perangkat, yaitu Smart Water Meter Node (SWMN), *Industrial Vibration Monitor* (IVM), dan *Cold-Chain Temperature Logger* (CCTL).
3. Data yang digunakan merupakan data historis permintaan, inventori, dan kapasitas produksi selama 8 periode terakhir yang bersifat tetap (*fixed data*).

4. Diasumsikan bahwa struktur biaya yang terlibat, termasuk biaya produksi, biaya simpan (*holding cost*), dan pinalti bersifat konstan dan tidak mengalami perubahan (fluktuasi) selama horison perencanaan dilakukan.
5. Tinjauan kapasitas dibatasi hanya pada stasiun kerja yang digunakan dalam proses produksi SWMN, IVM, dan CCTL yaitu terdapat 5 stasiun kerja.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Kajian Literatur

Kajian literatur ini memuat ulasan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang dianggap relevan dan memiliki kesamaan terhadap penelitian yang dilakukan. Ulasan ini akan berisi perbandingan dan menentukan posisi penelitian ini. Hal utama yang diulas adalah terkait objek penelitian dan metode yang digunakan seperti *Evolutionary Algorithm*, MRP, dan optimasi deterministik, dan *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) pada optimasi *Material Requirement Planning* (MRP).

Penelitian yang dilakukan oleh Thevenin et al (2021) mengembangkan pendekatan optimasi stokastik komprehensif untuk sistem MRP di bawah kondisi ketidakpastian permintaan untuk produk *Electronic Control Module* (ECM) dengan mempertimbangkan *lead time* dan permintaan stokastik. Peneliti mengusulkan dua model *stochastic programming*, yaitu *two-stage stochastic model* untuk kerangka keputusan *static-static* (di mana *setup* dan kuantitas produksi ditetapkan di awal periode) dan *multi-stage stochastic model* untuk kerangka *static-dynamic* (di mana *setup* ditentukan di awal namun kuantitas produksi dapat disesuaikan di setiap periode. Penelitian ini menggunakan kombinasi metode *sampling* lanjutan (*Crude Monte Carlo*, *Quasi-Monte Carlo*, dan *Randomized Quasi-Monte Carlo*) dengan *heuristic fix-and-optimize*. Hasil eksperimen numerik pada jarak 1,056 menunjukkan bahwa pendekatan *two-stage* model menghasilkan *cost gap* lebih rendah sebesar 2.62% dibandingkan dengan metode deterministik tradisional. Penelitian ini juga mengembangkan *S-Policy*, yaitu *order-up-to-level policy* yang diperoleh dari solusi *multi-stage model* untuk memfasilitasi keputusan *real-time* tanpa perlu memodelkan ulang di setiap periode.

Penelitian yang dilakukan oleh Ben-Ammar et al (2021) mengembangkan model probabilistic komprehensif untuk *multi-period supply planning* dengan *demand* deterministik dinamis dan *lead time* stokastik yang tidak identik. Peneliti mengatasi masalah dengan mempertimbangkan fenomena *order crossover*, yaitu situasi di mana pesanan yang ditempatkan lebih awal dapat tiba lebih lambat dari pesanan berikutnya karena variabilitas *lead time*. Penelitian ini memodelkan *lead time* sebagai variabel

random diskrit yang independen dengan distribusi probabilitas yang diketahui namun tidak harus identik antar periode, berbeda dengan asumsi tradisional yang mengasumsikan *lead time* terdistribusi secara identik. Untuk menyelesaikan masalah optimasi, penelitian ini mengimplementasikan *Genetic Algorithm* (GA) untuk menentukan *lead time* terencana yang optimal dan *safety stock* yang meminimalkan *Expected Total Cost* (ETC). Temuan penting pada penelitian ini menunjukkan bahwa dalam kondisi tertentu, terutama ketika *backlogging cost* tinggi dan variabilitas permintaan cukup tinggi, mengoptimalkan *lead time* dapat memberikan hasil yang lebih baik daripada hanya menerapkan *safety stock*.

Penelitian yang dilakukan oleh Fleuren et al (2025) mengembangkan model perencanaan produksi dan persediaan yang mempertimbangkan ketidakpastian permintaan, keterbatasan kapasitas, dan ketidakpastian *lead time* pada industri teknologi tinggi dengan volume produksi rendah. Model ini menggabungkan perencanaan produksi dan penentuan *safety stock* dalam satu sistem menggunakan pendekatan skenario. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi sederhana, kebutuhan *safety stock* mirip dengan metode konvensional, tetapi pada kondisi permintaan yang sangat berubah-ubah, kapasitas terbatas, dan *lead time* tidak pasti, kebutuhan *safety stock* meningkat tajam dan distribusi persediaan bergeser ke tahap hilir. Metode konvensional terbukti kurang akurat karena tidak mempertimbangkan kompleksitas tersebut. Model ini juga dapat diterapkan pada perencanaan peluncuran produk baru, dimana strategi persediaan berbeda tergantung pada tingkat keberhasilan pengembangan teknologi.

Penelitian yang dilakukan oleh Seiringer et al (2021) membahas metode optimasi simulasi baru yang mengoptimalkan parameter MRP yaitu *safety stock* dan *planned lead time* dalam sistem produksi *multi-stage* dan *multi-item* dengan jumlah permintaan pelanggan, kebutuhan *lead time* konsumen, dan waktu *setup* mesin yang tidak pasti. Penelitian ini menggunakan model *discrete-event simulation* di AnyLogic untuk melakukan pendekatan *rolling horizon* MRP. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pendekatan semiheuristik yang diusulkan sangat menjanjikan, terutama dalam penelitian sistem MRP di bawah kondisi yang tidak pasti. Penelitian ini menggunakan 42

eksperimen simulasi yang berbeda dengan 20 replikasi per iterasi simulasi untuk tiga kondisi stokastik (*low, medium, high*).

Penelitian yang dilakukan oleh Slama et al (2021) mengintegrasikan *genetic algorithm* dengan simulasi Monte Carlo untuk menyelesaikan masalah *lot sizing* dengan ketidakpastian *lead time*. Pendekatan ini menggabungkan optimasi metaheuristic dengan simulasi stokastik untuk menangani variabilitas dalam rantai pasok. Untuk menyelesaikan masalah, peneliti mengembangkan tiga pendekatan, yaitu model eksak untuk kasus kecil dengan *Two-Stage Mixed Integer Linear Programming* (2S-MILP), pendekatan aproksimasi menggunakan simulasi *Monte Carlo* untuk skala menengah, dan GA yang dikombinasikan dengan *Monte Carlo* (MC-GA) untuk skala besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 2S-MILP memberikan solusi eksak, sementara Monte Carlo dan MC-GA menghasilkan solusi aproksimasi yang akurat dengan waktu komputasi yang efisien. MC-GA terbukti efektif untuk masalah besar yang membutuhkan stabilitas solusi tinggi, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam perencanaan yang dihadapi.

Penelitian yang dilakukan oleh Lahrichi et al (2022) menggunakan pemodelan *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) dan strategi *rolling horizon* untuk mengoptimalkan perencanaan produksi terintegrasi pada lingkungan gabungan *Make-to-Stock / Make-to-Order* (MTS-MTO). Penelitian membahas penentuan keputusan taktis yang mempertimbangkan batasan kapasitas lini produksi dan fluktuasi permintaan pasar yang dinamis. Penelitian melakukan pengujian model matematika untuk mengevaluasi trade-off antara biaya penyimpanan inventori (*holding cost*) dan biaya penalti akibat keterlambatan pemenuhan pesanan konsumen. Pendekatan ini menggunakan kerangka kerja optimasi deterministik yang andal untuk meningkatkan kualitas keputusan manajerial dalam menyeimbangkan beban kerja stasiun kerja. Metode MILP yang dikembangkan dapat diadaptasi untuk menstrukturkan variabel keputusan pada tabel MRP berkapasitas terbatas dengan meminimalkan total biaya operasional perusahaan.

Penelitian yang dilakukan oleh Damand et al (2022) menggunakan pendekatan pemrograman matematika (*mathematical programming*) dikombinasikan dengan konsep *rolling horizon strategy* untuk mengendalikan sistem *Material Requirements Planning*

(MRP) di bawah kondisi kapasitas terbatas. Penelitian membahas mitigasi risiko ketidakpastian *lead time* pasokan dan variabilitas waktu proses manufaktur yang kerap memicu ketidakakuratan rencana pelepasan material. Penelitian melakukan analisis performa sistem melalui skenario simulasi guna mengukur ketahanan tingkat pelayanan konsumen (*service level*) ketika dihadapkan pada keterlambatan rantai pasok. Pendekatan ini menggunakan formulasi analitis berbasis kendala kapasitas aktual lini untuk mencegah terjadinya solusi perencanaan yang tidak layak dieksekusi (*unfeasible*). Metode ini sangat relevan untuk dijadikan acuan dalam mengoptimalkan parameter PORec dan POREl pada tabel MRP dinamis yang sensitif terhadap pergeseran waktu tunggu.

Penelitian yang dilakukan oleh Younespour et al (2024) menggunakan formulasi *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) tingkat lanjut untuk menyelesaikan permasalahan perencanaan kebutuhan material (*advanced MRP*) pada rantai pasok industri elektronik yang kompleks. Penelitian membahas sinkronisasi alokasi multi-item produk dan komponen kritis yang berbagi stasiun kerja perakitan yang sama secara simultan. Penelitian melakukan optimasi multi-periode untuk meminimalkan akumulasi biaya manufaktur, biaya simpan di gudang, serta biaya penalti operasional akibat adanya *backorder*. Pendekatan ini menggunakan pemodelan matematika eksak untuk memproyeksikan utilisasi kapasitas mesin secara akurat di setiap periode horizon perencanaan. Struktur model MILP yang digunakan menyediakan fondasi yang kokoh untuk menetapkan batasan kuantitas produksi dalam lingkungan manufaktur gabungan dengan jumlah variabel keputusan yang masif.

Penelitian yang dilakukan oleh Liu & Nishi (2023) menggunakan strategi *Surrogate-Assisted Evolutionary Optimization* (Optimasi Evolusioner Berbantuan Model Pengganti) untuk manajemen inventori multi-eselon di bawah kondisi ketidakpastian yang tinggi. Penelitian membahas penanganan masalah optimasi berbasis simulasi yang memiliki ruang solusi sangat luas dan bersifat *NP-hard* akibat kompleksitas keterkaitan antar variabel keputusan. Penelitian melakukan reduksi waktu komputasi secara signifikan melalui integrasi algoritma metaheuristik evolusioner tanpa mengorbankan kualitas akurasi solusi total biaya minimum yang dicari. Pendekatan ini menggunakan framework komputasi cerdas untuk mengevaluasi parameter persediaan aman (*safety*

stock) dan kuantitas pemesanan optimal pada sistem distribusi yang dinamis. Metode optimasi evolusioner ini dapat diadaptasi sebagai mesin pengoptimasi utama untuk memecahkan model matematika MRP dengan variabel biner dan integer berskala besar secara efisien.

Penelitian yang dilakukan oleh Abdellahi et al (2025) menggunakan *reinforcement learning* untuk mengoptimalkan *replenishment policies* dalam sistem perakitan di mana *lead time* pengiriman komponen dan *finished goods* bersifat acak. Masalah diformulasikan sebagai Markov Decision Process (MDP) di mana agen menentukan kuantitas pemesanan optimal untuk setiap komponen dengan mempertimbangkan *lead time* stokastik dan variabilitas permintaan. Penelitian ini menggunakan algoritma *Deep Q-Network* (DQN) untuk mempelajari *optimal replenishment policies*. Penelitian ini menunjukkan perkembangan terkini dalam penggunaan *Machine Learning* (ML) untuk menangani ketidakpastian dalam MRP.

Penelitian yang dilakukan oleh Nayeem & Alam (2022) memiliki objek model *mixed-integer stochastic programming* untuk *multi-site* perencanaan produksi dan inventori dengan permintaan dan kapasitas yang tidak pasti. Metode optimisasi stokastik *scenario-based* dengan *Monte Carlo* untuk memunculkan skenario optimistik, normal, dan pesimistik dibandingkan dengan dasar deterministik. Hasil komputasi menunjukkan pengurangan EC 15-25% dan peningkatan *service level* pada ketidakpastian yang tinggi, dengan solusi efisien untuk skala besar MRP.

Penelitian yang dilakukan oleh Safitri et al (2021) meneliti perencanaan produksi produk pestisida di PT. Petrokimia Kayaku Gresik yang memiliki permasalahan berupa *over/understock* akibat fluktuasi permintaan, menggunakan simulasi Monte Carlo (5 replikasi, dengan data 35 bulan). Penelitian ini membandingkan model *Economic Production Quantity* (EPQ) dan permintaan musiman untuk 5 produk utama. Metode yang diterapkan merandomisasi distribusi probabilitas untuk menghitung Q optimal, biaya simpan, dan *service level* selama 181 hari. Hasil menunjukkan EPQ terbaik (biaya simpan rendah seperti Rp 994 juta untuk produk Ceba dengan *service level* 84,82% hingga Rp 11 juta untuk produk Kanon dengan *service level* 98,70%). Metode ini

direkomendasikan untuk digunakan demi meminimalkan biaya dengan tetap menjaga pemenuhan permintaan musiman.

Penelitian yang dilakukan oleh Lisdiarto (2022) membahas terkait perencanaan persediaan dengan menggabungkan peramalan permintaan, *aggregate planning*, dan simulasi Monte Carlo sebagai dasar input MRP. Objek penelitian ini adalah perusahaan manufaktur yang awalnya tidak memakai perhitungan matematis untuk persediaan, sehingga biaya simpan tinggi dan stok kering tidak optimal. Hasil yang didapatkan menunjukkan biaya persediaan yang dihasilkan dari kombinasi peramalan, Monte Carlo, dan MRP lebih rendah dan jadwal pemesanan lebih stabil dibandingkan hanya dengan menggunakan data historis deterministik.

Penelitian yang dilakukan oleh Zhagi et al (2021) mengkaji perencanaan produksi dan pengendalian persediaan dengan menggabungkan metode MRP, Mixed Integer Linear Programming (MILP), dan Algoritma Wagner Within (AWW) untuk memperhitungkan batas kapasitas gudang. Metode peramalan permintaan menggunakan *exponential smoothing* serta pengolahan data permintaan historis pada produk sepatu kulit. Aplikasi berbasis *web* dikembangkan dengan bahasa pemrograman R dan Shiny untuk mendukung proses perencanaan. Penelitian ini menghasilkan sistem jadwal produksi dan persediaan yang efisien, membantu pengambilan keputusan, serta mengidentifikasi pola musiman pada data permintaan.

Penelitian yang dilakukan oleh Putri et al (2024) dilakukan untuk mengatasi permasalahan kelebihan stok air mineral kemasan botol yang disebabkan oleh permintaan yang tidak pasti pada Perumda Tirta Kanjuruhan Malang sehingga diperlukan pengendalian persediaan yang lebih efektif. Penelitian ini menggunakan metode yang meliputi simulasi *Monte Carlo* untuk meramalkan permintaan dan *lead time* secara probabilistik, serta penerapan *Economic Order Quantity* (EOQ) probabilistic untuk menentukan jumlah pesanan optimal, termasuk pengaturan *safety stock* dan *reorder point*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu mengurangi total biaya persediaan hingga sekitar 58,1% dibandingkan kondisi saat ini, meskipun frekuensi pemesanan meningkat. Pendekatan ini efektif dalam mengurangi *overstock* dan biaya terkait serta meningkatkan pengendalian persediaan bahan kemasan.

Tabel 2. 1 State of the Art

Penulis	Obyek (Industri)			Metode			Evolutionary Algorithm
	Manufaktur Umum	Elektronik	Logistik	MRP/PPI C	Deterministik	Mixed Integer Linear Programming (MILP)	
(Thevenin et al., 2021)		√		√			
(Nursyanti & Shalsabila, 2020)			√	√			
(Ben-Ammar et al., 2019)		√		√			
(Seiringer et al., 2021)	√			√			
(Fleuren et al., 2025)	√					√	
(Slama et al., 2021)	√					√	
(Lahrichi et al., 2022)	√						√
(Damand et al., 2022)	√						√
(Younespour et al., 2024)	√						√
(Liu & Nishi, 2023)	√			√			
Abdellahi et al., 2025)			√	√			
(Nayeem & Alam, 2022)	√			√			
(Safitri et al., 2021)	√			√			
(Lisdiarto, 2022)	√			√	√		
(Putri et al., 2024)	√				√		

Penulis	Obyek (Industri)			Metode			Evolutionary Algorithm
	Manufaktur Umum	Elektronik	Logistik	MRP/PPI C	Deterministik	Mixed Integer Linear Programming (MILP)	
Penelitian Ini (2026)	√			√	√	√	√

Berdasarkan peta pemetaan literatur terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini memiliki keunggulan mutlak dan posisi yang sangat strategis dalam menjembatani kesenjangan antara teori optimasi dan realitas rantai produksi. Ketika sebagian besar studi terdahulu cenderung menyederhanakan masalah dengan mengasumsikan kapasitas lini tidak terbatas atau waktu tunggu bersifat konstan, penelitian ini berani menghadapi kompleksitas nyata industri manufaktur elektronik gabungan. Keunggulan utama penelitian ini terletak pada integrasi menyeluruh yang belum pernah dilakukan sebelumnya, yaitu mengawinkan sistem perencanaan gabungan MTS-MTO, batasan kapasitas stasiun kerja yang ketat, dan ketidakpastian *lead time* ke dalam satu formulasi matematis MILP. Dengan menyelesaikannya menggunakan komputasi cerdas *Evolutionary Algorithm*, penelitian ini tidak hanya menawarkan pemangkasan biaya operasional secara radikal dan penghematan biaya simpan gudang yang signifikan, melainkan juga melahirkan solusi perencanaan tabel MRP yang sepenuhnya layak dieksekusi, adaptif, dan mampu menjaga tingkat pelayanan pelanggan tetap berada dalam batas aman kendali manajemen.

2. 2 Landasan Teori

Berikut ini merupakan landasan teori yang berisikan teori atau istilah yang berkaitan dengan penelitian:

2.2.1 Material Requirement Planning (MRP)

Material Requirement Planning (MRP) adalah suatu teknik perencanaan material yang digunakan perusahaan untuk menghitung kebutuhan material dan penjadwalan pasokan material yang akan digunakan untuk memproduksi suatu produk demi memenuhi permintaan. MRP digunakan untuk memperbaiki penjadwalan produksi dan dapat merespons perubahan permintaan pasar dengan cepat, serta menjaga persediaan material

yang dibutuhkan. MRP dirancang untuk menjawab kebutuhan fundamental dalam perencanaan produksi, yaitu apa yang harus diproduksi, berapa banyak yang harus diproduksi, dan kapan harus diproduksi berdasarkan hirarki Bill of Materials (BOM) (Daroini & Himawan, 2022). Sistem MRP bekerja dengan memecah kebutuhan produk akhir (*finished goods*) menjadi kebutuhan komponen-komponen pembentuknya secara *time-phased*, sehingga memungkinkan perusahaan merencanakan pengadaan material dan kegiatan produksi secara terkoordinasi. Sistem MRP konvensional umumnya dibangun dengan asumsi bahwa proses produksi berjalan dalam kondisi ideal tanpa pertimbangan berupa ketidakpastian yang nyatanya seringkali terjadi dalam praktik industri (Fleuren et al., 2025).

MRP memiliki tiga tahap utama yang dilakukan secara berurutan untuk setiap komponen di dalam BOM, yaitu *netting*, *lotting*, dan *offsetting*. *Netting* merupakan proses perhitungan kebutuhan bersih (*net requirements*) dengan mengurangi persediaan yang tersedia dan *scheduled receipts* dari *gross requirements*, sehingga menghasilkan jumlah actual yang harus diproduksi untuk memenuhi kebutuhan. *Lotting* adalah tahapan penentuan ukuran *lot* produksi berdasarkan teknik *lot-sizing* seperti Lot-for-Lot (LFL), Economic Order Quantity (EOQ), dan teknik lainnya. *Offsetting* adalah proses penentuan waktu pelaksanaan pemesanan dengan memundurkan periode dari *net requirements* sebesar *lead time* pemesanan, sehingga material atau komponen tersedia tepat pada saat dibutuhkan (Schlenkrich et al., 2024). MRP ini nantinya akan menghasilkan *output* berupa *Planned Order Releases* yang menunjukkan kapan dan berapa banyak setiap komponen harus diproduksi atau dipesan. *Output* MRP ini kemudian akan dijadikan dasar untuk pelaksanaan aktivitas produksi dan pengadaan di rantai produksi.

Meskipun MRP dirancang untuk kondisi deterministik, dalam praktiknya sistem MRP beroperasi di bawah berbagai bentuk ketidakpastian termasuk permintaan, variabilitas *lead time*, *scrap*, dan fluktuasi kapasitas stasiun kerja yang dapat menurunkan performa sistem secara signifikan. Ketidakpastian *demand* dan *forecast error* memiliki dampak nyata terhadap biaya operasional dan *service level*, karena MRP konvensional menghitung *lot size* berdasarkan asumsi permintaan deterministik sementara *safety stock*

ditentukan secara terpisah dengan asumsi yang berbeda, mengakibatkan keputusan yang sub-optimal (Thevenin et al., 2021).

2.2.2 Bill of Materials (BOM)

Bill of Materials (BOM) merupakan daftar komprehensif yang terstruktur yang berisi informasi terkait material, komponen, *sub-assemblies* beserta kuantitas yang dibutuhkan untuk manufaktur suatu produk, serta berfungsi sebagai *blueprint* dasar bagi proses manufaktur yang menghubungkan desain dengan produksi. BOM memiliki struktur hierarkis dengan produk jadi (*finished goods*) yang berada di level tertinggi yaitu level 0, diikuti oleh *sub-assemblies* di level menengah, dan komponen serta bahan baku dasar pada level terbawah. Setiap level ini menunjukkan hubungan yang mengindikasikan bagaimana komponen-komponen tersebut membentuk produk jadi di akhir (Jenkins, 2025). Akurasi BOM sangat penting dalam perencanaan dan pengendalian produksi, terutama untuk manufaktur elektronik dan teknologi, di mana kesalahan pada struktur BOM dapat menyebabkan gangguan signifikan dalam rantai pasok dan kenaikan biaya. Penelitian menunjukkan bahwa kompleksitas BOM memerlukan pendekatan perencanaan yang matang yang dapat mengatasi ketergantungan antar komponen dan perakitan demi mencapai keputusan produksi yang optimal (Fleuren et al., 2025a).

2.2.3 Sistem Produksi Make to Stock (MTS) dan Make to Order (MTO)

Make to Stock (MTS) merupakan strategi manufaktur tradisional di mana perencanaan produksi dan penjadwalan produksi didasarkan pada jumlah peramalan permintaan, dengan produk yang diproduksi pada suatu periode digunakan untuk memenuhi permintaan yang diterima pada periode berikutnya. MTS tergolong sebagai *push-type operation*, di mana pasokan material dipenuhi melalui proses produksi dengan perencanaan yang dimulai dari pasokan dan bergerak maju ke *finished products* (Madi et al., 2024). Strategi produksi MTS memberikan keuntungan signifikan dalam penjadwalan produksi yang efisien, mengurangi *lead time*, dan risiko kehabisan stok yang rendah, terutama untuk produk dengan pola permintaan musiman di mana perusahaan dapat memproduksi dan menyimpan produk di inventori untuk memenuhi permintaan pada musim tinggi. Namun, MTS juga memiliki kelemahan berupa risiko kelebihan inventori jika peramalan permintaan tidak akurat, sensitivitas pasar terhadap perubahan keinginan

konsumen yang dapat menyebabkan produk yang diproduksi tidak lagi diinginkan dan berdampak pada tingginya *inventory holding cost* (Qoblex, 2025).

Make to Order (MTO) adalah strategi produksi di mana proses produksi hanya dimulai setelah ada konfirmasi pesanan konsumen. MTO ini diklasifikasikan sebagai *pull-type operation* karena produksi dipengaruhi oleh permintaan aktual dan bekerja secara mundur dari penerimaan pesanan melalui urutan produksi sampai ke perencanaan produksi yang rinci. MTO memiliki karakteristik fundamental berupa *customer-initiated production*, di mana produksi berjalan untuk produk dan spesifikasi yang spesifik, kuantitas, dan waktu penerimaan hanya ketika pesanan masuk ke perusahaan (Alnahhal et al., 2021). MTO juga berpotensi tinggi untuk adanya kustomisasi pada pesanan dengan masing-masing produk yang diproduksi secara spesifik dikerjakan untuk memenuhi permintaan spesifik konsumen secara dimensi, fitur, sampai material. MTO juga memiliki keuntungan berupa penyimpanan produk jadi yang minim karena kuantitas produk disesuaikan dengan kuantitas permintaan aktual pada periode tersebut. Di samping itu, tantangan utama pada strategi MTO ini adalah meminimalkan *lead time*. Meskipun siklus produksi baru akan dimulai setelah pesanan diterima, strategi ini lebih cocok diterapkan pada produk dengan siklus produksi yang relatif lebih pendek, atau pada perusahaan manufaktur yang menerapkan pendekatan gabungan, yaitu dengan memproduksi dan menyimpan komponen antara MTS dan MTO yang memiliki *lead time* produksi signifikan (Upadhyay et al., 2023).

Strategi *hybrid* MTS-MTO merupakan pendekatan perencanaan dan pengendalian produksi yang mengombinasikan karakteristik MTS dan MTO untuk mengatasi keterbatasan masing-masing strategi sekaligus memanfaatkan keunggulannya. Penerapan strategi gabungan ini semakin banyak digunakan karena perusahaan dituntut untuk memberikan layanan unggul kepada beragam macam pelanggan di tengah lingkungan persaingan yang tinggi di mana strategi MTS murni kurang mampu menangani variasi produk yang tinggi secara efisien, sementara strategi MTO murni sering menghasilkan *lead time* pengiriman yang terlalu panjang. Berdasarkan struktur sistemnya, strategi gabungan MTS-MTO ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama, yaitu sistem sekuensial, sistem *floating* dengan Customer Order Decoupling Point (CODP) yang

dinamis, dan sistem paralel yang memproduksi produk MTS dan MTO secara simultan pada fasilitas yang sama untuk meningkatkan utilisasi sumber daya (Pereira et al., 2022).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa strategi gabungan ini secara signifikan menghemat biaya dibandingkan dengan strategi MTS atau MTO murni, terutama dalam menghadapi variabilitas permintaan dan optimalisasi kapasitas produksi. Namun, perencanaan produksi pada sistem gabungan ini memerlukan kerangka terintegrasi yang mampu mengelola alokasi kapasitas secara dinamis, mengoordinasikan keputusan taktis dan operasional, serta mempertimbangkan ketidakpastian permintaan, *lead time*, dan *trade-off* antara persediaan dan *backlog* melalui pendekatan optimasi dan perencanaan yang bersifat adaptif (Sato et al., 2023).

2.2.4 Pemrograman Linear dan Non-Linear

Pemrograman matematis adalah pendekatan berbasis analisis yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai alternatif keputusan untuk mencapai hasil optimal dalam suatu sistem dengan keterbatasan sumber daya. Dalam konteks perencanaan produksi, pemrograman linear berfungsi untuk memodelkan hubungan proporsional antara variabel keputusan, seperti penentuan jumlah produksi dengan batasan-batasan operasional yang bersifat deterministik. Namun, pada kondisi riil yang melibatkan ketidakpastian permintaan pelanggan atau skenario gabungan MTS-MTO, model sering kali berkembang menjadi pemrograman non-linear. Karakteristik non-linear ini muncul akibat adanya variabel stokastik atau hubungan biaya yang tidak konstan, seperti penalti biaya kekurangan stok (*stockout cost*) atau fluktuasi *service level* yang memengaruhi fungsi tujuan secara non-proporsional (Maulida et al., 2025).

Implementasi model optimasi ini bekerja dengan menetapkan fungsi tujuan (*objective function*) tunggal, yakni minimalisasi total biaya manufaktur yang mencakup akumulasi biaya produksi, biaya simpan inventori, serta biaya penalti akibat kegagalan pemenuhan permintaan tepat waktu. Model ini dibatasi oleh serangkaian kendala (*constraints*) struktural, seperti keseimbangan aliran material pada tabel MRP, ketersediaan kapasitas pada setiap stasiun kerja, dan pemenuhan target tingkat layanan minimal yang ditetapkan perusahaan. Penggunaan teknik ini memungkinkan peneliti untuk melakukan iterasi matematis yang presisi guna menemukan titik keseimbangan

paling ekonomis (*optimal solution*) yang tidak dapat dicapai secara akurat hanya melalui perhitungan manual atau observasi sederhana (Hevlie et al., 2025).

2.2.5 Algoritma Optimasi Ms. Excel Solver

Penggunaan *Add-ins* MS Excel Solver dalam penelitian ini berfungsi sebagai mesin komputasi untuk memecahkan model perencanaan produksi yang kompleks. Solver bekerja dengan menggunakan algoritma pencarian solusi yang iteratif, salah satunya adalah metode Evolutionary dan GRG Nonlinear. Algoritma *Evolutionary* didasarkan pada prinsip genetika yang melakukan seleksi terhadap berbagai populasi variabel keputusan untuk menemukan kombinasi nilai terbaik pada model yang bersifat non-diskrit atau memiliki banyak variabel stokastik. Dalam manajemen produksi gabungan, alat ini berperan sebagai sistem pendukung keputusan (*Decision Support System*) yang secara otomatis menyelaraskan *Planned Order Release* dengan batasan waktu kerja di stasiun kerja, sehingga meminimalisir ketergantungan pada intuisi manual yang sering kali kurang akurat dalam menghadapi fluktuasi permintaan MTO yang dinamis (Selvi et al., 2020).

2.2.6 Manajemen Persediaan dan *Service Level*

Tingkat layanan atau *Service Level* merupakan parameter kunci yang menunjukkan kemampuan perusahaan dalam memenuhi permintaan pelanggan dari persediaan yang ada tanpa mengalami kondisi kekurangan stok (*stockout*) (Karimi et al., 2022). Dalam perspektif manajemen persediaan, penetapan target *service level* sebesar 88% mencerminkan kebijakan perusahaan untuk menyeimbangkan dua kepentingan yang saling bertolak belakang: pemenuhan pesanan yang maksimal dan efisiensi biaya simpan. Secara teoritis, semakin tinggi target tingkat layanan yang ditetapkan, maka kebutuhan akan persediaan pengaman (*safety stock*) akan meningkat secara eksponensial, yang berimplikasi pada kenaikan total biaya inventori. Oleh karena itu, optimasi melalui sistem MRP terpadu diperlukan untuk memastikan bahwa ketersediaan material Level 2 tetap terjaga pada titik minimum yang aman guna mendukung kelancaran perakitan produk akhir P1, P2, dan P3.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian terapan dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk memecahkan permasalahan praktis dalam perencanaan produksi Electronic Control Modul (ECM) pada perusahaan manufaktur elektronik. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini melibatkan pengembangan model matematis berbasis optimasi stokastik dan analisis numerik untuk mengevaluasi kinerja MRP di bawah kondisi ketidakpastian *lead time* dan tingkat *scrap*. Penelitian ini termasuk ke dalam kategori penelitian eksperimental komputasi di mana model matematis yang dikembangkan diuji melalui simulasi Monte Carlo untuk menghasilkan skenario-skenario kemungkinan yang dapat terjadi dalam praktik produksi. Penelitian ini bersifat deskriptif-perspektif, di mana tahap deskriptif melibatkan analisis kondisi saat ini sistem produksi dan identifikasi parameter-parameter yang mempengaruhi perencanaan produksi, sementara tahap perspektif memberikan rekomendasi jumlah produksi optimal dan strategi perencanaan terhadap variasi *lead time*.

3.2 Objek dan Subjek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah sistem Material Requirement Planning (MRP) pada perusahaan manufaktur elektronik yang memproduksi Electronic Control Module (ECM), dengan focus pada parameter produksi yang meliputi jumlah produksi komponen atau Planned Order Release (POREL), tingkat *scrap/defect*, *lead time* produksi, kapasitas mesin, dan inventori komponen. Objek penelitian mencakup 17 komponen yang digunakan dalam produksi ECM yang diproses melalui 4 stasiun kerja utama yaitu Surface Mount Technology (SMT), *assembly*, *testing*, dan *packaging*, dengan mempertimbangkan struktur Bill of Materials (BOM) yang mendefinisikan hierarki dan kuantitas kebutuhan setiap komponen untuk membentuk produk akhir. Penelitian ini juga mengkaji sistem produksi *hybrid* Make to Stock (MTS) dan Make to Order (MTO), di mana produk dengan standar permintaan reguler diproduksi berdasarkan *forecast* dengan

strategi MTS sementara produk kustom diproduksi berdasarkan permintaan aktual dengan strategi MTO.

Subjek penelitian ini adalah perusahaan manufaktur elektronik yang terletak di Provinsi DI Yogyakarta yang menjadi mitra dalam studi kasus ini, dengan melibatkan departemen Production Planning and Inventory Control (PPIC), departemen produksi, dan departemen informasi dikumpulkan dari periode produksi tahun 2025, mencakup data historis permintaan selama 30 minggu yang kemudian akan diproyeksikan untuk 12 minggu selanjutnya untuk keperluan analisis kebutuhan perencanaan material sesuai dengan karakteristik permintaan masing-masing strategi produksi. Data yang diperoleh ini menunjukkan distribusi normal untuk permintaan MTS dan lognormal untuk permintaan MTO.

3.3 Jenis Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data, yaitu data primer and data sekunder untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil analisis.

3.3.1 Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung dari perusahaan melalui observasi lapangan, wawancara dengan pihak-pihak terkait, dan pengukuran langsung di rantai produksi. Data primer yang dikumpulkan meliputi:

- (1) *Production time* per unit untuk setiap produk di masing-masing stasiun kerja yang diperoleh melalui *time study* atau *work sampling*.
- (2) Informasi mengenai proses produksi dan alur kerja di setiap stasiun kerja untuk memahami urutan operasi dan ketergantungan antar proses.
- (3) Tingkat *scrap* atau *defect rate* aktual yang terjadi di setiap tahapan produksi berdasarkan *quality control records*.
- (4) Informasi tentang kebijakan produksi perusahaan termasuk batas toleransi permintaan yang tertolak (*lost demand*) yang dapat diterima dan target *service level* yang diterapkan.

3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari dokumen dan *database* perusahaan yang telah ada, meliputi:

- (1) Data historis permintaan ECM selama 8 minggu periode 2025 yang akan digunakan sebagai dasar untuk peramalan dan *scenario generation*.
- (2) Struktur Bill of Materials (BOM) yang menunjukkan hierarki komponen dan kuantitas kebutuhan setiap komponen untuk setiap produk.
- (3) Data kapasitas mesin untuk setiap stasiun kerja dalam satuan jam per minggu yang tersedia untuk produksi.
- (4) Data *lead time* produksi beserta distribusi probabilitasnya yang telah diidentifikasi untuk setiap komponen dan produk.
- (5) Data awalan inventori untuk produk jadi dan setiap komponen di awal periode perencanaan.
- (6) Data biaya yang mencakup *setup cost*, *holding cost*, *production cost*, *backlog cost*, dan *lost sales cost*.

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa teknik untuk memastikan kelengkapan dan akurasi informasi yang diperlukan:

- (1) Pertama, studi dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis dokumen-dokumen perusahaan yang relevan seperti Master Production Schedule (MPS), Bill of Materials (BOM), laporan produksi harian/mingguan, riwayat inventori, laporan *quality control*, dan data permintaan historis yang tersimpan dalam sistem Enterprise Resource Planning (ERP) atau sistem informasi produksi perusahaan.
- (2) Kedua, wawancara terstruktur dilakukan dengan pekerja di departemen PPIC, manajer produksi, *quality control supervisor*, dan pegawai pengadaan untuk mendapatkan informasi mendalam mengenai proses perencanaan produksi yang sedang berjalan, kendala-kendala yang dihadapi, kebijakan-kebijakan yang berlaku, serta praktik-praktik terbaik yang telah diterapkan dalam mengatasi ketidakpastian *demand* dan *lead time*.
- (3) Ketiga, observasi langsung dilakukan di rantai produksi untuk mengamati proses produksi aktual di setiap stasiun kerja, mengidentifikasi sumber *delay* yang potensial atau variabilitas dalam *lead time*, serta memahami alur material dan *work-*

in-process inventory, serta mengobservasi bagaimana sistem produksi menangani baik pesanan MTS maupun MTO.

- (4) Melakukan pengukuran langsung untuk memperoleh *production time per unit* melalui *time study* atau *stopwatch method*, mengukur waktu *setup* untuk setiap produk di masing-masing stasiun kerja, dan memvalidasi data kapasitas mesin aktual yang tersedia dengan mempertimbangkan *scheduled maintenance*, pola *shift* kerja, dan data *downtime* historis.
- (5) Melakukan ekstraksi data dari sistem informasi perusahaan dalam format yang dapat dianalisis, seperti data permintaan dalam bentuk *time series*, *lead time records* dengan *timestamps* untuk menentukan distribusi probabilitas, dan *scrap/defect* yang dikategorikan berdasarkan tipe produk dan tahap produksi untuk menghitung *scrap rates* yang representatif.

3.5 Variabel Penelitian

Variabel penelitian dalam studi ini dikategorikan menjadi variabel keputusan, variabel parameter, dan variabel *output* yang saling berinteraksi dalam model optimasi sistem MRP.

3.5.1 Variabel Keputusan

Variabel keputusan merupakan variabel yang nilainya akan ditentukan melalui proses optimasi untuk mencapai fungsi objektif yang optimal. Variabel keputusan dalam penelitian ini adalah $PORec_{i,t}$. Variabel ini adalah kuantitas rencana penerimaan produksi (*Planned Order Receipts*) untuk varian produk jadi i pada periode t . Variabel ini berupa variabel *integer* non-negatif yang nilainya dicari secara dinamis oleh *Solver* untuk mengisi lembar kerja MRP usulan perusahaan.

3.5.2 Variabel Parameter

Variabel parameter adalah nilai-nilai yang diketahui atau dapat diestimasi dari data historis dan digunakan sebagai input dalam model optimasi. Parameter-parameter tersebut meliputi:

(1) Parameter *demand*:

- $D_{i,t}^{MTS}$: Volume permintaan konsumen untuk varian produk gabungan kategori MTS i pada periode t .
- $D_{i,t}^{MTO}$: Volume permintaan konsumen untuk varian produk gabungan kategori MTO i pada periode t .
- $Total_Demand_{i,t}$: Akumulasi total kebutuhan kotor keseluruhan dari kombinasi produk MTS dan MTO untuk jenis produk i pada periode t .

(2) Parameter *lead time*: LL_i : *lead time* atau tenggang waktu proses perakitan fisik dan pengiriman yang dibutuhkan oleh varian produk i (dinyatakan dalam satuan periode/minggu).

(3) Parameter kapasitas

- $Kapasitas_Tersedia_{w,t}$: Batas kapasitas jam kerja reguler maksimal yang tersedia secara aktual pada stasiun kerja w di periode t (dalam satuan jam per minggu).
- $ST_{w,t}$: *Standard Time* atau durasi waktu proses standar yang dihabiskan untuk merakit satu unit varian produk i di stasiun kerja w (dalam satuan jam per unit).

(4) Parameter BOM: $r_{c,i}$: yaitu koefisien BOM yang menunjukkan jumlah komponen c yang dibutuhkan untuk memproduksi satu unit produk i .

(5) Parameter inventori:

- $PAB_{i,0}$: yaitu *initial inventory* untuk produk i pada awal periode perencanaan
- $PAB_{c,0}$ yaitu *initial inventory* untuk komponen c pada awal periode perencanaan

(6) Parameter struktur biaya:

- CP_i : yaitu *Cost of Production* atau estimasi biaya manufaktur variabel per unit untuk merakit varian produk jadi i .
- h_i : yaitu *holding cost* atau tarif pengeluaran simpan gudang per unit per periode untuk varian produk jadi i .
- cb_i : yaitu *backorder cost* atau penalti per unit per periode akibat adanya penundaan pemenuhan pesanan produk MTS i .

- cl_i : yaitu *lost sales cost* atau penalti per unit per periode akibat adanya penolakan pemenuhan pesanan produk MTO i .
- (7) Parameter *service level*: α yaitu target *service level* atau batas toleransi permintaan tertolak yang dapat diterima perusahaan, yaitu dikunci pada batas minimal 88%.

3.5.3 Variabel Output

Variabel *output* merupakan hasil dari eksekusi model dan digunakan untuk evaluasi kinerja sistem. Variabel *output* meliputi:

- (1) $PAB_{i,t}$: *Projected Available Balance* atau tingkat saldo persediaan akhir untuk varian produk jadi i pada akhir periode t di dalam gudang.
- (2) $PAB_{c,t}$: *Projected Available Balance* atau tingkat saldo persediaan akhir untuk varian produk jadi c pada akhir periode t di dalam gudang.
- (3) $Backorder_{i,t}$: *Backlog level* atau kuantitas akumulasi unit pesanan produk gabungan MTS i yang tertunda pemenuhannya pada akhir periode t .
- (4) $Lost_Sales_{i,t}$: Kuantitas komponen pesanan produk gabungan MTO i yang tidak dapat terlayani oleh kapasitas pabrik sehingga hangus dari sistem penjualan pada akhir periode t .
- (5) *Total Cost (Z)*: Nilai total biaya operasional keseluruhan sistem sepanjang horizon perencanaan yang merupakan akumulasi hasil penjumlahan dari biaya manufaktur variabel (*production cost*), biaya simpan di gudang (*holding cost*), biaya penalti pesanan tertunda (*backorder cost*), dan biaya penalti kehilangan peluang penjualan (*lost sales cost*).
- (6) $Service\ Level_i$: persentase permintaan yang terpenuhi untuk varian produk i .

3.6 Metode Analisis Data

3.6.1 Analisis Sistem Eksisting

Tahap awal analisis dilakukan dengan membedah sistem perencanaan produksi dan pengendalian material yang saat ini berjalan di perusahaan manufaktur elektronik. Analisis berfokus pada identifikasi akar penyebab kegagalan pemenuhan pesanan, di mana sistem eksisting belum memiliki jadwal aktivitas manufaktur fisik riil untuk

menangani karakteristik permintaan gabungan *Make to Stock* (MTS) dan *Make to Order* (MTO). Evaluasi pada tahap ini bertujuan untuk memetakan akumulasi kerugian finansial awal yang timbul akibat menumpuknya beban pinalti pesanan tertunda (*backorder*) dan biaya kehilangan peluang penjualan (*lost sales*). Hasil analisis ini berfungsi sebagai *baseline* (kondisi dasar) untuk mengukur performa peningkatan pada model usulan.

3.6.2 Analisis Integrasi Struktur Produk dan Penentuan Parameter Input

Data historis permintaan gabungan MTS-MTO dianalisis secara deterministik sepanjang delapan periode horizon perencanaan mingguan. Pada tahap ini, dilakukan analisis keterkaitan komponen berdasarkan struktur pohon material (*Bill of Material*) dari produk jadi tingkat tertinggi hingga ke level komponen hulu di bawahnya. Durasi pengerjaan setiap komponen dianalisis menggunakan parameter waktu proses standar (*standard processing time*) untuk dikonversikan menjadi kebutuhan jam kerja nyata. Selain itu, seluruh parameter finansial seperti biaya produksi variabel per unit, biaya penyimpanan persediaan (*holding cost*), serta biaya pinalti kekurangan barang didefinisikan secara presisi sebagai basis data masukan dalam formulasi matematika.

3.6.3 Formulasi Model Optimasi Matematika

Model optimasi matematika dibangun dengan menetapkan fungsi tujuan tunggal (*single-objective function*), yaitu meminimalkan total biaya operasional keseluruhan sistem sepanjang horizon perencanaan. Karakteristik keterbatasan dunia nyata diintegrasikan ke dalam model berupa batasan-batasan (*constraints*) matematika yang ketat. Batasan tersebut meliputi kendala kapasitas jam kerja maksimal reguler di lima stasiun kerja utama rantai produksi, serta batasan tingkat toleransi pemenuhan permintaan untuk mengunci batas maksimal terjadinya *lost sales* dan *backorder* tidak boleh melebihi angka dua belas persen demi menjaga reputasi perusahaan

3.6.4 Analisis Hasil Optimasi *Evolutionary Algorithm*

Proses pencarian solusi optimal dijalankan menggunakan bantuan perangkat komputasi Excel Solver dengan mesin penggerak Algoritma Evolusioner (*Evolutionary Algorithm*). Analisis dilakukan terhadap keputusan kuantitas pengerjaan material yang dihasilkan pada baris *Planned Order Received* (PORec) di setiap tabel MRP usulan. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi logika taktis komputasi dalam mendistribusikan volume

produksi yang fluktuatif (tidak dibagi rata setiap minggu) guna memanfaatkan kelonggaran kapasitas stasiun kerja di periode awal sebagai bantalan persediaan pengaman (*safety stock*).

3.6.5 Analisis Utilisasi dan Beban Kapasitas Stasiun Kerja

Analisis dilakukan terhadap profil pembebanan (*load*) aktual di lima stasiun kerja utama setelah intervensi algoritma optimasi. Evaluasi ini bertujuan untuk membuktikan secara logis bahwa distribusi jadwal usulan tidak melanggar batas kemampuan fisik pabrik. Pola pergerakan jam kerja dipantau di setiap periode untuk memastikan beban puncak di stasiun kerja hulu (papan sirkuit), stasiun kerja antara, hingga stasiun kerja penyelesaian akhir (perakitan produk) tetap berada di bawah ambang batas kapasitas reguler mingguan, sehingga risiko kemacetan aliran material (*bottleneck*) dan pembengkakan biaya upah lembur dapat dihindari.

3.6.6 Analisis Perbandingan Parameter Biaya (*Cost Trade-Off*)

Analisis ini mengevaluasi dampak finansial secara komparatif antara kondisi sebelum dan sesudah optimasi. Fokus analisis diarahkan pada fenomena pertukaran biaya (*cost trade-off*) yang rasional di dalam sistem manufaktur. Analisis ini membedah bagaimana pengalokasian modal miliaran rupiah pada sistem usulan untuk mendanai biaya aktivitas manufaktur fisik dan pengadaan komponen terbukti valid dan menguntungkan, karena secara instan mampu menghapus total (*zero cost*) beban pinalti *lost sales* dan *backorder* yang semula melumpuhkan profitabilitas perusahaan pada kondisi eksisting.

3.3.7 Analisis Capaian *Service Level*

Tahap akhir analisis dilakukan dengan menghitung rasio keandalan sistem usulan dalam menjamin ketersediaan pasokan bagi konsumen. Tingkat pelayanan (*service level*) dihitung secara spesifik untuk tiga varian produk jadi utama (P1, P2, dan P3) dengan membandingkan kuantitas produk yang berhasil terpenuhi tepat waktu terhadap total volume kebutuhan pasar sepanjang delapan minggu. Keberhasilan model diukur berdasarkan kemampuan sistem usulan dalam mendongkrak capaian pelayanan dari yang semula bernilai nol persen pada kondisi eksisting, hingga berhasil melompat naik secara konvergen dan stabil di kisaran angka delapan puluh delapan hingga delapan puluh sembilan persen.

3.7 Model Matematika

1. Fungsi Tujuan

Formulasi model matematika pada fungsi tujuan yang dikembangkan di penelitian ini ditujukan untuk meminimalkan total pengeluaran operasional produksi di bawah pengaruh parameter yang stokastik dan dinamis. Fungsi tujuan utama untuk meminimalkan akumulasi seluruh biaya operasional perusahaan di sepanjang horizon perencanaan diwakili oleh persamaan berikut:

$$\min Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (C P_i \cdot POREc_{i,t}) + \sum_{t=1}^T (H_t) + \sum_{t=1}^T (BC_t) + \sum_{t=1}^T (LSC_t) \quad (3.1)$$

Pada persamaan 3.1, Z menunjukkan nilai total biaya operasional produksi yang ingin diminimalkan, sedangkan T melambangkan batas akhir horizon perencanaan yang bernilai 8 periode, dan I merupakan jumlah keseluruhan varian produk yang diproduksi yang bernilai 3 varian produk. Parameter CP_i menyatakan *Cost of Production* atau estimasi biaya manufaktur variabel per unit untuk produk. Variabel keputusan utama yang dicari nilainya oleh algoritma adalah $PORec_{i,t}$ yang merepresentasikan kuantitas rencana penerimaan produksi. Komponen biaya pendukung pada fungsi tujuan ini meliputi H_t sebagai total biaya simpan gudang keseluruhan, BC_t sebagai total biaya penalti pesanan tertunda (*backorder*), dan LS_t yang menyatakan total biaya penalti kehilangan peluang penjualan (*lost sales*) keseluruhan.

2. Persamaan Batasan (*Constraints*)

- Persamaan Keseimbangan Inventori (Logika PAB)

Untuk memastikan aliran material masuk dan keluar pada tabel MRP selalu sinkron dan konsisten di setiap periode, model matematika ini menerapkan persamaan batasan keseimbangan inventori yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$PAB_{i,t} = PAB_{i,t-1} + SR_{i,t} + POREc_{i,t} + D_{i,t} + B_{i,t-1} - B_{i,t} \quad (3.2)$$

- Persamaan Batasan Kapasitas Stasiun Kerja

Aktivitas produksi usulan juga wajib dibatasi agar tidak melampaui kapasitas riil di stasiun kerja yang tersedia di perusahaan. Batasan fisik jam kerja stasiun kerja reguler mingguan tersebut diatur melalui persamaan berikut:

$$\sum_{i=1}^I (PORec_{i,t} \cdot SPT_{i,w}) \leq Kapasitas\ Tersedia_{w,t} \quad (3.3)$$

Parameter $ST_{i,w}$ pada persamaan 3.3 di atas menunjukkan *Standard Processing Time* atau durasi waktu yang dibutuhkan untuk memproduksi atau merakit satu unit produk i pada stasiun kerja w .

3. Persamaan Indikator Performa (*Performance Indicator*)

Sebagai indikator performa non-finansial untuk mengukur keberhasilan pemenuhan permintaan pasar, maka dirumuskan rasio tingkat pelayanan (*service level*) dihitung menggunakan persamaan berikut:

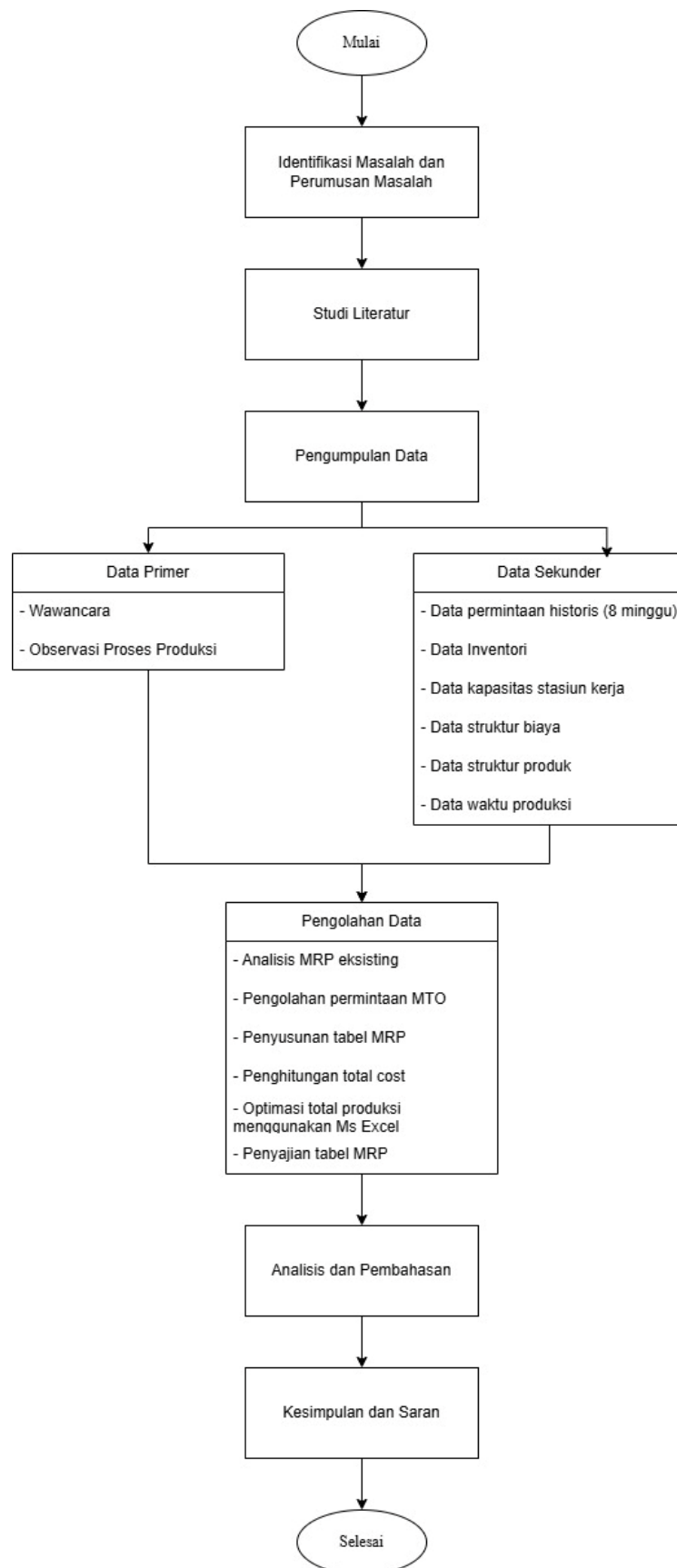
$$Service\ Level_i = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Backorder_{i,t} + Lost_{sales_{i,t}})}{\sum_{t=1}^T Total_Demand_{i,t}}\right) \times 100\% \quad (3.4)$$

Service level ini dihitung dengan mencari perbandingan antara total permintaan yang tidak terpenuhi dengan total permintaan keseluruhan pada seluruh periode. Guna menjamin reputasi bisnis perusahaan tetap terjaga, model optimasi ini dikunci oleh batasan minimum pelayanan dari kebijakan manajemen yang diatur melalui persamaan:

$$\begin{aligned} &Service\ Level_1 \\ &\geq 88\% \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.8 Alur Penelitian

Alur penelitian ini disusun untuk menggambarkan tahapan penelitian secara urut dan sistematis, mulai dari pengumpulan data, analisis sistem eksisting, pemodelan optimasi, penyusunan MRP, simulasi, hingga analisis hasil dan penarikan Kesimpulan. Alur ini disajikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing tahapan pada diagram alir alur penelitian:

1. Mulai

Tahap ini merupakan awal dari keseluruhan proses penelitian yang dilakukan. Penelitian diawali dengan penentuan fokus kajian, ruang lingkup penelitian, serta kesesuaian topik dengan permasalahan yang terjadi di perusahaan objek penelitian. Fokus kajian diawali dengan menentukan ruang lingkup perencanaan produksi pada produk Electronic Control Module (ECM) serta mengidentifikasi relevansi antara integrasi sistem MTS dan MTO dengan tantangan yang dihadapi oleh perusahaan objek penelitian.

2. Identifikasi Masalah dan Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap kompleksitas perencanaan produksi *hybrid*. Masalah utama yang ditemukan adalah sulitnya menyeimbangkan pemenuhan stok MTS dan pesanan MTO di bawah batasan kapasitas stasiun kerja yang terbatas. Berdasarkan hal tersebut, dirumuskan masalah mengenai bagaimana meminimalkan total biaya (biaya produksi, simpan, dan pinalti) dengan tetap menjaga *service level* minimal 88%.

3. Studi Literatur

Tahap studi literatur bertujuan untuk memperoleh landasan teori dan referensi ilmiah yang relevan dengan penelitian. Literatur yang dikaji meliputi konsep MRP, sistem produksi gabungan MTS dan MTO, serta teknik optimasi menggunakan *solver*. Studi literatur ini juga dilakukan untuk mengidentifikasi *research gap* dan memperkuat metode yang digunakan dalam penelitian. Referensi ilmiah digunakan untuk mendukung pemilihan metode evolutionary dalam memecahkan masalah non-linear pada perencanaan produksi ini.

4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam membangun model penelitian. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder yang diperoleh dari perusahaan.

- Data primer: diperoleh melalui wawancara dengan pihak terkait serta observasi langsung terhadap proses produksi. Wawancara digunakan untuk memahami alur produksi, penerapan MRP yang berjalan saat ini, serta kebijakan perusahaan terkait produksi dan pengendalian material. Observasi dilakukan untuk memperoleh gambaran nyata mengenai kondisi proses produksi dan aktivitas di stasiun kerja.
- Data sekunder: Mencakup data permintaan historis (8 minggu), saldo inventori awal (*PAB* periode 0), struktur produk (*Bill of Material* level 0-2), kapasitas stasiun kerja, serta struktur biaya manufaktur dan denda *stockout*.

5. Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dilakukan secara sistematis melalui langkah-langkah berikut:

- Analisis MRP eksisting dengan mengevaluasi cara perusahaan mengelola permintaan saat ini.
- Pengolahan permintaan MTO dengan menghitung *expected value* berdasarkan probabilitas *low*, *medium*, dan *high*.
- Penyusunan tabel MRP dengan mengintegrasikan rumus logika *backorder* dan *lost sales* untuk setiap level produk.
- Optimasi Ms. Excel Solver dengan menjalankan model untuk meminimalkan *total cost* dengan mengatur *Planned Order Received* sebagai variabel keputusan dan *service level* serta kapasitas stasiun kerja sebagai batasan.

6. Analisis dan Pembahasan

Hasil optimasi dari Solver dianalisis untuk melihat bagaimana sistem merespons permintaan di setiap periode. Pembahasan mencakup evaluasi terhadap pencapaian target *service level*, efisiensi penggunaan kapasitas stasiun kerja, serta efektivitas biaya dibandingkan dengan kondisi sebelum optimasi dilakukan.

7. Kesimpulan dan Saran

Tahap ini merangkum seluruh temuan penelitian, apakah model optimasi yang diusulkan berhasil menyelesaikan masalah perencanaan *hybrid*. Saran diberikan kepada perusahaan sebagai panduan taktis dalam menerapkan rencana produksi usulan dan pengembangan sistem informasi produksi di masa depan.

8. Selesai

Tahap akhir yang menandakan seluruh tujuan penelitian telah tercapai dan laporan hasil penelitian telah disusun secara lengkap.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Pada bagian ini peneliti akan membahas terkait pengumpulan data yang akan diolah untuk mendukung penyelesaian masalah perusahaan tentang kombinasi perencanaan hybrid pada sistem produksi MTS dan MTO. Pada kondisi aktual, perusahaan memproduksi produk untuk sistem MTS dengan berdasarkan pada data peramalan (*forecast*) dari data historis perusahaan kemudian membuat perencanaan berdasarkan hasil *forecast*. Untuk produk MTO, perusahaan akan mulai produksi ketika jumlah pesanan yang diajukan oleh *customer* sudah ada.

Produk yang diteliti pada penelitian kali ini adalah Smart Water Meter Node (SWMN) yang selanjutnya disebut sebagai P1, Industrial Vibration Monitor (IVM) yang selanjutnya disebut sebagai P2, dan Cold-Chain Temperature Logger (CCTL) yang selanjutnya disebut sebagai P3. Ketiga produk ini masing-masing memiliki beberapa komponen penyusun yang kemudian akan dirakit menjadi satu produk akhir/*finished goods*.

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini meliputi data permintaan produk MTS berupa data historis dan juga data hasil *forecast*, data historis untuk produk MTO, komponen penyusun untuk masing masing P1, P2, dan P3, data kapasitas stasiun kerja, dan struktur biaya produksi.

4.2 Formulasi Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan perencanaan produk ECM dengan sistem produksi hybrid antara MTS dan MTO. Perusahaan memiliki tantangan dalam menentukan jumlah produk yang harus diproduksi agar tetap mampu memenuhi permintaan dengan target *service level* sebesar 88%. Dengan keinginan perusahaan untuk menggabungkan perencanaan produk dengan sistem produksi yang berbeda namun tetap harus memenuhi target *service level* yang diinginkan, perusahaan memiliki beberapa batasan yang menjadi tantangan.

Dalam upaya mencapai target tersebut, perusahaan dihadapkan pada beberapa batasan. Batasan yang menjadi permasalahan adalah kapasitas stasiun kerja. Untuk melakukan perencanaan hybrid, perusahaan harus tetap memperhatikan kapasitas perusahaan untuk masing-masing periode agar tidak terjadi *overload* atau beban yang melebihi kapasitas stasiun kerja. Tantangan lainnya adalah adanya biaya *backorder cost* dan juga *lost sales cost*. Setiap permintaan yang tidak dapat terpenuhi akan menjadi beban bagi perusahaan karena terdapat biaya yang harus dipenuhi.

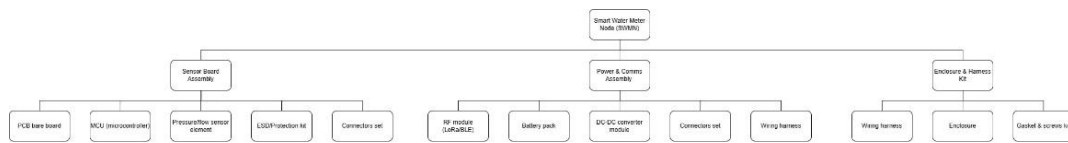
Berdasarkan kompleksitas tersebut, maka formulasi masalah dalam penelitian ini diarahkan pada minimasi total biaya produksi (*total production cost*) sebagai fungsi tujuan. Optimasi dilakukan dengan mengintervensi variabel Planned Order Received (PORec) melalui pendekatan matematis yang mempertimbangkan seluruh batasan secara simultan. Dengan demikian, diharapkan solusi optimal yang tidak hanya meminimalkan biaya produksi dan biaya pinalti, tetapi juga tetap mematuhi batasan kapasitas stasiun kerja serta menjamin pencapaian target *service level* yang diterapkan perusahaan. Pada akhirnya, perusahaan sebagai pelaksana bisnis memiliki tujuan mengeluarkan biaya produksi seminimal mungkin. Untuk itu, peneliti dituntut untuk mengoptimasi biaya produksi dengan intervensi dari batasan-batasan yang telah ada.

4.3 Data Penelitian

4.3.1 Deskripsi dan Struktur Produk

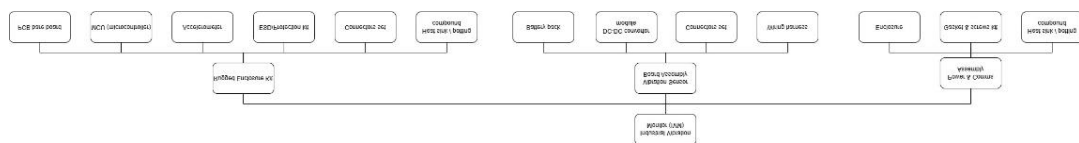
Produk yang dijadikan objek penelitian ini merupakan produk berupa perangkat elektronik yang dikategorikan sebagai perangkat *Electronic Control Module* (ECM). Secara umum, terdapat tiga produk yang akan diteliti pada tugas akhir ini.

1. *Smart Water Meter Node* (SWMN) merupakan perangkat utilitas yang berfungsi untuk mentransformasi meteran air konvensional menjadi sistem pemantauan digital yang mampu mendeteksi debit serta aliran air secara *real-time*. Berikut merupakan struktur penyusun produk SWMN dalam bentuk *Bill of Materials* (BOM):



Gambar 4. 1 BOM Produk SWMN

2. *Industrial Vibration Monitor (IVM)* merupakan solusi pemeliharaan prediktif pada mesin-mesin industri yang bekerja dengan cara menangkap anomaly getaran melalui akselerometer sensitive guna mencegah kerusakan total pada lini produksi. Berikut merupakan struktur penyusun produk IVM dalam bentuk *Bill of Materials (BOM)*:



Gambar 4. 2 BOM Produk IVM

3. *Cold-Chain Temperature Logger (CCTL)* yaitu sebuah perangkat pelacak suhu presisi tinggi yang digunakan dalam rantai logistik untuk menjamin keamanan kualitas komoditas yang sensitive terhadap perubahan suhu, seperti produk pangan segar dan obat-obatan. Berikut merupakan struktur penyusun produk CCTL dalam bentuk *Bill of Materials (BOM)*:



Gambar 4. 3 BOM Produk CCTL

Tabel 4. 1 *Sub-assembly* Produk Level 1

<i>Final Product</i>	<i>Level-1 Sub-assembly</i>	<i>Qty</i>
P1 SWMN	A1 Sensor Board Assembly	1
	A2 Power & Comms Assembly	1
	A3 Enclosure & Harness Kit	1
P2 IVM	B1 Vibration Sensor Board Assembly	1
	B2 Power & Comms Assembly	1

P3 CCTL	B3 Rugged Enclosure Kit	1
	C1 Temperature Sensor Board Assembly	1
	C2 Battery & Power Assembly	1
	C3 Enclosure & Label Kit	1

Pada Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa masing-masing produk memiliki tiga *sub-assembly* di struktur *Bill of Materials* (BOM) level 1. *Sub-assembly* pada P1 terdiri dari *Sensor Board Assembly* (A1), *Power & Comms Assembly* (A2), dan *Enclosure & Harness Kit* (A3). *Sub-assembly* pada P2 terdiri dari *Vibration Sensor Board Assembly* (B1), *Power & Comms Assembly* (B2), dan *Rugged Enclosure Kit* (B3). *Sub-assembly* pada P3 terdiri dari *Temperature Sensor Board Assembly* (C1), *Battery & Power Assembly* (C2), dan *Enclosure & Label Kit* (C3).

Tabel 4. 2 Data Komponen Level 2

Data Komponen			
ID	Nama Komponen	Buy/Make	Leadtime
X1	PCB bare board	Buy	2
X2	MCU (microcontroller)	Buy	4
X3	RF module (LoRa/BLE)	Buy	3
X4	Cellular module	Buy	5
X5	Accelerometer	Buy	4
X6	Temperature sensor IC	Buy	3
X7	Pressure/flow sensor element	Buy	5
X8	Battery pack	Buy	3
X9	DC-DC converter module	Buy	2
X10	ESD/Protection kit	Buy	2
X11	Connectors set	Buy	2
X12	Wiring harness	Make	

Data Komponen			
ID	Nama Komponen	Buy/Make	Leadtime
X13	Enclosure	Buy	2
X14	Gasket & screws kit	Buy	1
X15	Label & packaging set	Buy	1
X16	Heat sink / potting compound	Buy	1
X17	Firmware image + programming jig usage	Make “resource item”	
X18	Test fixture time	Make “resource item”	

Tabel 4.2 merupakan daftar komponen masing-masing produk yang terdiri dari X1 sampai dengan X18 yang menjadi struktur penyusun pada tabel BOM level 2. Sebagian besar dari komponen-komponen tersebut dibeli oleh perusahaan dari pemasok, hanya satu komponen yang diproduksi oleh perusahaan, yaitu *wiring harness* (X12). Pada kolom paling kanan juga tertera *leadtime* yang dibutuhkan perusahaan saat melakukan pemesanan komponen. Karena sebagian besar komponen pada Level 2 dikategorikan sebagai “Buy”, perencanaan produksinya bergantung pada akurasi *lead time* yang tercantum. Hal ini berbeda dengan komponen X12 yang diproduksi secara internal, sehingga koordinasi kapasitas stasiun kerja juga harus mempertimbangkan proses pembuatannya.

Dalam struktur BOM Level 2, terdapat dua komponen khusus yaitu *firmware image + programming jig usage* (X17) dan *test fixture time* (X18) yang dikategorikan sebagai *resource item* dengan status *make*. Meskipun secara fisik keduanya bukan merupakan komponen persediaan yang dapat dihitung per unit di gudang, namun dalam sistem perencanaan produksi terintegrasi, keduanya harus diperlakukan sebagai “komponen virtual”. Dengan memasukkan kedua komponen ini ke dalam struktur BOM dan tabel MRP, peneliti dapat secara otomatis memetakan beban kerja pada setiap unit produksi terhadap kapasitas tersedia pada stasiun kerja terkait, sehingga pada saat data diolah, potensi kapasitas berlebih akan terdeteksi meskipun komponen fisik lainnya tersedia. Pendekatan ini juga memungkinkan sistem melakukan *offsetting* penjadwalan

berdasarkan *lead time* internal proses pemrograman dan pengujian, yang pada akhirnya menjamin bahwa optimasi biaya produksi tetap mempertimbangkan sinkronisasi antara ketersediaan material dan kemampuan fasilitas produksi dalam memenuhi target *service level*.

Tabel 4. 3 Identifikasi Komponen pada Produk

Sub-Assembly	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
A1	1	1					1			1	1							
A2			1					1	1		1	1						
A3												1	1	1				
B1	1	1			1					1	1					1		
B2				1				1	1		1	1						
B3													1	1		1		
C1	1	1				1				1	1							
C2								1	1		1							
C3													1	1	1			

Pada Tabel 4.3, disajikan identifikasi keterkaitan antara komponen pada Level 2 (X1 hingga X18) dengan masing-masing *sub-assembly* pada Level 1 (A1 hingga C3) untuk setiap produk. Melalui pemetaan ini, dapat diketahui struktur pembentuk secara spesifik, di mana setiap unit *sub-assembly* membutuhkan kombinasi komponen tertentu dengan kuantitas yang telah ditetapkan untuk menunjang fungsinya masing-masing. Sebagai contoh, *sub-assembly* A1 mengintegrasikan komponen X1, X2, X7, X10, dan X11 sebagai struktur penyusunnya. Pendekatan identifikasi ini sangat krusial dalam proses MRP *explosion*, karena menjadi dasar bagi sistem untuk menghitung total kebutuhan kotor (*gross requirements*) material pada level komponen berdasarkan rencana produksi yang ditetapkan pada level di atasnya.

4.3.2 Data Forecast Produk MTS

Pada Tabel 4.4, disajikan data jumlah produk untuk sistem produksi MTS berdasarkan hasil dari proses peramalan (*forecasting*) oleh pihak internal manajemen perusahaan yang didasarkan pada data historis penjualan perusahaan. Data yang digunakan sebagai basis perhitungan ini diklasifikasikan sebagai data sekunder, karena bersumber dari rekaman data historis penjualan riil yang telah didokumentasikan oleh perusahaan pada periode-periode sebelumnya. Melalui pemanfaatan data sekunder perusahaan ini, disajikan estimasi kebutuhan pasar untuk delapan periode ke depan dalam satuan minggu (*week*), yang akan digunakan sebagai input utama dalam penyusunan *Gross Requirements* pada tabel MRP.

Penetapan horizon perencanaan sepanjang delapan periode mingguan ini ditentukan secara sengaja untuk memberikan ruang kendali (*planning horizon*) yang cukup luas bagi departemen PPIC perusahaan dalam memitigasi fluktuasi permintaan, serta menyinkronkan jadwal pelepasan pesanan (*Planned Order Release*) untuk komponen-komponen kritis yang memiliki karakteristik waktu tunggu (*lead time*) pengiriman bervariasi. Melalui integrasi data peramalan sekunder yang kredibel ini, model matematika usulan dapat bekerja secara presisi dalam menentukan strategi pengendalian persediaan yang optimal. Hasilnya, sistem mampu menuntun lini produksi menuju titik keseimbangan ekonomis yang paling efisien, yaitu meminimalkan akumulasi biaya simpan (*holding cost*) di gudang akibat penumpukan barang, tanpa mengorbankan

pemenuhan kebutuhan konsumen atau menekan risiko terjadinya keterlambatan pelayanan (*backorder*) di masa yang akan datang.

Tabel 4. 4 *Forecast* Produk MTS

Week t	P1 SWMN	P2 IVM	P3 CCTL
1	60	25	80
2	70	30	90
3	65	28	85
4	75	32	95
5	80	35	100
6	85	38	105
7	90	40	110
8	95	45	120

4.3.1 Data Permintaan Produk MTO

Data permintaan untuk produk dengan sistem produksi MTO pada Tabel 4.5 menyajikan rekaman data historis pesanan pelanggan selama delapan minggu terakhir. Berbeda dengan produk MTS yang didasarkan pada pengalaman murni, permintaan MTO dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam tiga skenario probabilitas keterjadian yang ditentukan secara langsung oleh kebijakan perusahaan, yaitu *Low* dengan probabilitas 0.25, *medium* dengan probabilitas 0.5, dan *high* dengan probabilitas 0.25. Nilai probabilitas ini ditetapkan berdasarkan hasil observasi empiris dan justifikasi ahli bersama pihak manajemen operasional perusahaan. Berdasarkan kondisi yang nyata di lapangan, perusahaan belum mengintegrasikan sistem peramalan kuantitatif berbasis *time series* untuk lini produksi MTO, sehingga penentuan proyeksi permintaan di masa mendatang masih mengandalkan ituisi operasional yang terasah dari pola histori transaksi mingguan.

Tabel 4. 5 Permintaan Produk MTO

Week	P1 SWMN			P2 IVM			P3 CCTL		
	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
1	10	18	28	6	10	16	12	20	32
2	12	20	30	7	11	18	14	22	35

3	10	18	26	6	10	16	13	21	33
4	14	22	32	8	12	20	15	24	38
5	12	20	30	7	11	18	14	22	36
6	15	24	35	9	13	22	16	25	40
7	14	22	33	8	12	20	15	24	39
8	16	25	38	9	14	24	17	27	45

Penggunaan tiga tingkat probabilitas ini bertujuan untuk mengakomodasi sifat permintaan MTO yang fluktuatif dan sulit diprediksi secara pasti. Data historis pada tabel tersebut selanjutnya akan dikalkulasi menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari masing-masing bobot probabilitas untuk menghasilkan satu nilai permintaan MTO yang merepresentasikan permintaan di setiap periode. Hasil kalkulasi tersebut nantinya menjadi input krusial dalam tabel MRP untuk menentukan nilai *gross requirements* gabungan, sehingga perusahaan dapat mempersiapkan kapasitas stasiun kerja dan ketersediaan komponen Level 2 secara lebih responsif terhadap pesanan yang masuk.

4.3.2 Data Inventori

Dalam implementasi sistem MRP yang diintegrasikan dengan model optimasi, data inventori tidak sekadar berfungsi sebagai catatan administrative, melainkan berperan kritis sebagai nilai *Projected Available Balance* (PAB) pada periode nol. Penentuan inventori awal yang akurat sangat krusial karena akan memengaruhi seluruh kalkulasi *net requirements* (kebutuhan bersih) pada periode mendatang. Ketersediaan stok ini berfungsi sebagai penyangga atau *buffer* yang diprioritaskan untuk memenuhi kebutuhan kotor sebelum sistem memberikan instruksi untuk melakukan produksi baru atau pemesanan material kepada pemasok.

Tabel 4. 6 Inventori Perusahaan

Level 0 (Produk Akhir)		Level 1 (Sub-Assembly)		Level 2 (Komponen)	
ID	Inventori	ID	Inventori	ID	Inventori
P1	40	A1	30	X1	180
P2	15	A2	25	X2	120
P3	55	A3	40	X3	80

Level 0 (Produk Akhir)		Level 1 (Sub-Assembly)		Level 2 (Komponen)	
ID	Inventori	ID	Inventori	ID	Inventori
		B1	10	X4	40
		B2	12	X5	50
		B3	18	X6	130
		C1	45	X7	35
		C2	35	X8	160
		C3	60	X9	200
				X10	250
				X11	300
				X12	90
				X13	220
				X14	260
				X15	200
				X16	100

Data inventori merupakan salah satu parameter fundamental dalam penelitian ini yang merepresentasikan volume persediaan riil yang saat ini dikelola oleh perusahaan di dalam fasilitas gudang. Sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6, data ini mencakup profil stok secara menyeluruh yang terbagi ke dalam tiga tingkatan hierarki produk, yaitu produk akhir (Level 0), *sub-assembly* atau modul (Level 1), hingga komponen elektronik dan material dasar (Level 2). Secara spesifik, tercatat bahwa perusahaan memiliki penyimpanan awal untuk produk P1 sebanyak 40 unit, P2 sebanyak 15 unit, dan P3 sebanyak 55 unit, yang didukung oleh ketersediaan komponen Level 1 dan Level 2 dalam kuantitas yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan perakitan masing-masing.

Lebih lanjut, keberadaan data inventori yang detail hingga komponen X1 sampai X16 memungkinkan optimasi pengolahan data untuk melakukan pertimbangan *trade-off* secara presisi antara pemanfaatan stok yang ada dengan biaya simpan (*holding cost*) yang akan timbul. Dengan mengacu pada penyimpanan awal ini, pengolahan data akan secara

langsung mengoptimasi *Planned Order Received* (PORec) sehingga tidak terjadi penumpukan inventori yang berlebihan atau *overstock* namun tetap menjamin bahwa target *service level* sebesar 88% dapat terpenuhi melalui ketersediaan barang yang memadai sejak periode pertama perencanaan dimulai.

4.3.3 Data Kapasitas Stasiun Kerja

Penentuan kapasitas produksi dalam penelitian ini didasarkan pada identifikasi ketersediaan jam kerja pada lima stasiun kerja utama yang membentuk lini perakitan produk *Electronic Control Module* (ECM). Sebagaimana disajikan pada Tabel 4.7 yang menunjukkan kapasitas mingguan, setiap stasiun memiliki batasan waktu operasional yang bervariasi tergantung pada beban kerja dan jumlah fasilitas yang tersedia di lantai produksi. Stasiun kerja pertama (WS1) yang menangani *SMT / PCB assembly* memiliki kapasitas sebesar 180 jam per minggu, diikuti oleh WS2 untuk *Harness & kitting* sebesar 120 jam, serta WS3 untuk integrasi *sub-assembly power/comms* sebesar 140 jam. Sementara itu, untuk tahapan akhir perakitan, perusahaan mengalokasikan kapasitas sebesar 160 jam pada stasiun kerja keempat (WS4) untuk *final assembly & enclosure* dan 150 jam pada stasiun kerja kelima (WS5) untuk proses pemrograman serta pengujian fungsional (*functional test*). Data kapasitas mingguan ini merupakan parameter pembatas atau *constraint* utama yang akan digunakan oleh model optimasi Solver untuk memastikan bahwa jadwal produksi yang diusulkan tidak melampaui kemampuan aktual lini produksi perusahaan.

Tabel 4. 7 Kapasitas Stasiun Kerja

Stasiun Kerja	Kapasitas/Week
WS1: SMT / PCB assembly	180
WS2: Harness & kitting	120
WS3: Sub-assembly integration (power/comms)	140
WS4: Final assembly & enclosure	160
WS5: Programming + functional test	150

Selain kapasitas tersedia, penelitian ini juga mengidentifikasi waktu proses standar (*Standard Processing Times*) yang dibutuhkan oleh setiap item pada tingkat struktur produk yang berbeda untuk melewati stasiun kerja yang relevan. Waktu proses ini dihitung dalam satuan jam per unit untuk memastikan akurasi beban kerja yang dibebankan pada setiap periode perencanaan. Pada stasiun kerja pertama (WS1), komponen *sub-assembly* level 1 seperti A1, B1, dan C1 memerlukan waktu masing-masing sebesar 0,35 jam, 0,45 jam, dan 0,30 jam. Stasiun kerja kedua (WS2) bertanggung jawab memproses komponen level 2 yaitu X12 dengan waktu 0,10 jam per *harness*, serta komponen level 1 (A3, B3, C3) dengan waktu yang berkisar antara 0,04 hingga 0,07 jam. Selanjutnya, integrasi komponen A2, B2, dan C2 dilakukan pada stasiun kerja ketiga (WS3) dengan durasi antara 0,15 hingga 0,25 jam per unit.

Tabel 4. 8 Waktu Proses Produksi

<i>Standard Processing Times (hours per unit)</i>		
Stasiun Kerja	<i>Unit and Time</i>	Level
WS1	A1: 0.35, B1: 0.45, C1: 0.30	1
WS2	X12: 0.10 per harness	2
WS3	A2: 0.20, B2: 0.25, C2: 0.15	1
WS2	A3: 0.05, B3: 0.07, C3: 0.04	1
WS4	P1: 0.25, P2: 0.30, P3: 0.22	0
WS5	P1: 0.18, P2: 0.22, P3: 0.16	0

Untuk produk jadi pada level 0 (P1, P2, dan P3), proses penyelesaian dilakukan di dua stasiun kerja terakhir. Pada stasiun kerja keempat (WS4), produk P1 membutuhkan waktu perakitan akhir selama 0,25 jam, P2 selama 0,30 jam, dan P3 selama 0,22 jam. Tahap akhir di stasiun kerja kelima (WS5) yang meliputi pemrograman dan pengujian memerlukan waktu 0,18 jam untuk P1, 0,22 jam untuk P2, dan 0,16 jam untuk P3. Integrasi antara data ketersediaan kapasitas dan durasi pemrosesan setiap unit ini memungkinkan sistem MRP usulan untuk melakukan penyeimbangan beban kerja (*load balancing*). Dengan mengalikan jumlah unit yang direncanakan dengan waktu proses standarnya, model optimasi dapat menjamin tingkat utilisasi stasiun kerja yang optimal

serta menghindari terjadinya *bottleneck* pada periode permintaan tinggi baik untuk produk MTS maupun MTO.

4.3.4 Data Parameter Biaya

Komponen biaya merupakan elemen fundamental dalam penelitian ini karena berfungsi sebagai koefisien utama dalam fungsi tujuan optimasi yang bertujuan untuk meminimalkan total biaya operasional produksi. Data parameter biaya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4. 9 Parameter Biaya

Product	Estimated manufacturing cost/unit	Estimated selling price/unit	Contribution margin/unit	Back Order Cost	Lost Sales	Weekly Holding Cost
P1	1.150.000	1.800.000	650.000	34500	812500	6900
P2	2.200.000	3.300.000	1.100.000	66000	1375000	13200
P3	850.000	1.350.000	500.000	25500	625000	5100

Data biaya yang dikumpulkan pada Tabel 4.9 mencakup estimasi biaya manufaktur (*Estimated Manufacturing Cost*), harga jual, margin kontribusi, serta parameter biaya penalti yang timbul akibat ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan. Berdasarkan data pada Gambar 4.3.6, biaya manufaktur per unit ditetapkan sebesar Rp1.150.000 untuk P1, Rp2.200.000 untuk P2, dan Rp850.000 untuk P3. Nilai inilah yang menjadi basis perhitungan total biaya produksi, di mana jumlah unit yang direncanakan oleh Solver akan dikalikan dengan biaya manufaktur masing-masing produk untuk membentuk komponen beban produksi utama dalam satu periode perencanaan.

Selain biaya produksi langsung, model ini mempertimbangkan biaya konsekuensi akibat kegagalan pemenuhan permintaan, yang dibedakan berdasarkan karakteristik produk MTS dan MTO. Untuk produk MTS, perusahaan menetapkan *Back Order Cost* sebesar 3% dari biaya manufaktur per unit, yang merepresentasikan beban administrasi dan penanganan tambahan saat pesanan harus ditunda ke periode berikutnya. Sebaliknya,

untuk permintaan MTO yang tidak terpenuhi, diberlakukan *Lost Sales Cost* sebesar 1,25 kali dari nilai margin kontribusi per unit. Sebagai contoh, pada produk P2, biaya *lost sales* mencapai Rp1.375.000 per unit, jauh lebih tinggi dibandingkan biaya *backorder* yang hanya sebesar Rp66.000. Diferensiasi biaya penalti ini memberikan sinyal kepada model optimasi untuk lebih memprioritaskan pemenuhan pesanan MTO guna menghindari kerugian finansial yang lebih besar akibat hilangnya peluang penjualan.

Komponen terakhir yang diintegrasikan ke dalam perhitungan total biaya adalah *Weekly Holding Cost* atau biaya simpan mingguan yang diasumsikan sebesar 0,6% dari biaya manufaktur per unit. Biaya ini mencakup beban modal yang tertanam, biaya fasilitas gudang, serta risiko kerusakan material selama disimpan dalam inventori. Dengan adanya biaya simpan sebesar Rp6.900 untuk P1 hingga Rp13.200 untuk P2 per minggu, model Solver dituntut untuk mencari titik keseimbangan (*trade-off*) yang paling ekonomis. Solver akan mengevaluasi apakah lebih menguntungkan untuk memproduksi barang dalam jumlah besar di awal (yang meningkatkan biaya simpan) atau memproduksi secara pas-pasan dengan risiko munculnya biaya *lost sales* atau *backorder*. Melalui minimalisasi akumulasi dari seluruh komponen biaya ini, yaitu biaya produksi, simpan, *backorder*, dan *lost sales*, model dapat menghasilkan keputusan rencana produksi yang paling efisien secara finansial bagi perusahaan.

4.4 Pengolahan Data

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan secara terstruktur dengan mengintegrasikan sistem *Material Requirement Planning* (MRP) gabungan dan model pemrograman matematis guna menghasilkan rencana produksi yang optimal. Sebelum melangkah pada tahapan komputasi numerik, analisis mendalam terhadap kondisi eksisting sistem perencanaan produksi di perusahaan perlu dilakukan sebagai basis pembanding. Berdasarkan hasil observasi dan pengumpulan data operasional, diketahui bahwa perusahaan sejauh ini belum menerapkan sistem MRP maupun metode terkomputerisasi yang terintegrasi untuk menjadwalkan kebutuhan material berskala besar. Seluruh aktivitas perencanaan kebutuhan bahan baku dan komponen pendukung untuk lini perakitan *Electronic Control Module* (ECM) masih mengandalkan estimasi

manual yang bersifat konvensional. Ketiadaan sistem yang baku dalam melacak keterkaitan antara tingkat struktur komponen pada *Bill of Material* (BOM) dengan jadwal induk produksi menyebabkan keputusan pengadaan sering kali bersifat reaktif dan kurang akurat dalam merespons fluktuasi permintaan nyata di pasar.

Kelemahan mendasar dari belum diterapkannya sistem MRP ini terlihat dari kebijakan pengadaan komponen perusahaan yang mengadopsi pendekatan pembelian massal sekaligus atau *bulking purchase* untuk beberapa periode perencanaan ke depan. Perusahaan cenderung melakukan pemesanan material dalam volume yang sangat besar di awal horizon waktu dengan tujuan untuk mengamankan ketersediaan stok, meminimalisasi frekuensi pemesanan, dan memanfaatkan potongan harga dari vendor (*quantity discount*). Namun, strategi pembelian massal tanpa didasarkan pada perhitungan tenggang waktu (*lead time*) dan kebutuhan bersih (*net requirements*) yang presisi ini justru menimbulkan efek domino negatif pada manajemen arus kas dan operasional gudang. Pengadaan yang menumpuk di awal periode mengakibatkan terjadinya lonjakan volume persediaan barang yang melebihi kapasitas ideal penyimpanan di lantai gudang.

Dampak finansial utama dari kebijakan *bulking purchase* tanpa sistem perencanaan yang terintegrasi ini adalah membengkaknya biaya simpan mingguan (*holding cost*) yang harus ditanggung oleh perusahaan secara signifikan. Biaya simpan yang tinggi ini akumulasinya bersumber dari beban modal yang tertanam pada material yang mengendap lama di gudang, biaya utilitas area penyimpanan, risiko penyusutan kualitas komponen elektronik sensitif akibat waktu simpan yang terlalu lama, hingga biaya asuransi proteksi inventori. Ketidakmampuan sistem eksisting dalam mendistribusikan jadwal kedatangan material secara bertahap sesuai waktu riil kebutuhan perakitan menciptakan inefisiensi biaya yang menekan profitabilitas perusahaan. Kondisi dilematis inilah yang mendasari urgensi diperlukannya perancangan sistem penentuan lot kebutuhan material yang dikombinasikan dengan teknik optimasi parameter kapasitas, guna menekan total biaya operasional serendah mungkin tanpa mengorbankan tingkat pelayanan terhadap konsumen.

Berdasarkan evaluasi terhadap kondisi perencanaan eksisting tersebut, tahapan pengolahan data lanjutan dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk mereformasi sistem pengendalian inventori perusahaan. Alur pengolahan data formal akan dimulai dari pemodelan ketidakpastian melalui pengolahan nilai harapan permintaan produk *Make-to-Order* (MTO) yang kemudian digabungkan dengan data peramalan produk *Make-to-Stock* (MTS) untuk membentuk total kebutuhan kotor. Rangkaian proses matematis ini selanjutnya diwujudkan ke dalam penyusunan tabel MRP gabungan, penghitungan total parameter biaya komprehensif, hingga tahap eksekusi optimasi kapasitas multi-stasiun kerja memanfaatkan komputasi *software* MS Excel Solver. Keseluruhan tahapan matematis dan penjadwalan terstruktur tersebut diuraikan secara mendalam pada subbab-subbab rincian berikut ini.

4.4.1 Pengolahan Permintaan MTO

Proses pemodelan kuantitas kebutuhan untuk komponen *Make-to-Order* (MTO) pada penelitian ini memerlukan perlakuan khusus karena karakteristik permintaannya yang fluktuatif dan dipengaruhi oleh ketidakpastian pesanan konsumen. Untuk mentransformasikan data historis pemesanan menjadi parameter input yang valid di dalam tabel perencanaan MRP, langkah awal yang dilakukan adalah menghitung nilai rata-rata tertimbang (*Expected Value* atau *Average*) serta nilai standar deviasi (*Standard Deviation*) dari setiap varian produk (P1, P2, dan P3) pada setiap periode perencanaan. Berdasarkan Tabel 4.10, perhitungan nilai *Average* didasarkan pada perkalian antara jumlah unit pesanan historis (*Order*) pada skenario *Low*, *Medium*, dan *High* dengan masing-masing bobot probabilitas setingkat 0,25, 0,50, dan 0,25 yang telah didefinisikan sebelumnya. Nilai rata-rata tertimbang ini merepresentasikan titik tengah ekspektasi volume permintaan yang paling berpeluang terjadi pada kondisi aktual di rantai produksi. Pengolahan permintaan untuk produk MTO ini disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4. 10 Pengolahan Permintaan MTO

	Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
Product	P1			P2			P3		
Prob.	0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25

		Low	Medium	High	Low	Medium	High	Low	Medium	High
	Product	P1			P2			P3		
Period 1	Order	10	18	28	6	10	16	12	20	12
	Average	18,5			10,5			16		
	St. Dev	6,383572667			3,570714214			4		
	Order	12	20	30	7	11	18	14	22	35
Period 2	Average	20,5			11,75			23,25		
	St. Dev	6,383572667			3,960744879			7,529110173		
	Order	10	18	26	6	10	16	13	21	33
	Average	18			10,5			22		
Period 3	St. Dev	5,656854249			3,570714214			7,141428429		
	Order	14	22	32	8	12	20	15	24	38
	Average	22,5			13			25,25		
	St. Dev	6,383572667			4,358898944			8,227241336		
Period 4	Order	12	20	30	7	11	18	14	22	36
	Average	20,5			11,75			23,5		
	St. Dev	6,383572667			3,960744879			7,921489759		
	Order	15	24	35	9	13	22	16	25	40
Period 5	Average	24,5			14,25			26,5		
	St. Dev	7,088723439			4,763139721			8,61684397		
	Order	14	22	33	8	12	20	15	24	39
	Average	22,75			13			25,5		
Period 6	St. Dev	6,759252917			4,358898944			8,61684397		
	Order	16	25	38	9	14	24	7	27	45
	Average	26			15,25			26,5		
	St. Dev	7,842193571			5,448623679			13,44432966		

Sebagai contoh aplikasi numerik pada produk P1 di Periode 1, nilai *Average* sebesar 18,5 unit didasarkan pada perhitungan akumulasi hasil perkalian antara jumlah unit pesanan historis pada masing-masing tingkat skenario permintaan dengan bobot probabilitas terjadinya skenario tersebut yang telah didefinisikan sebelumnya. Namun, penggunaan nilai rata-rata saja tidak cukup untuk mengantisipasi risiko kegagalan pemenuhan akibat adanya variabilitas atau penyimpangan riil di lapangan. Oleh karena itu, besaran variabilitas permintaan tersebut diukur melalui penghitungan nilai standar deviasi stokastik. Formula dasar standar deviasi yang diterapkan memanfaatkan akar

kuadrat dari jumlah kuadrat selisih antara nilai pesanan tiap skenario dan nilai rata-ratanya, yang dikalikan dengan bobot probabilitas masing-masing skenario.

Perhitungan rumus tersebut menghasilkan nilai standar deviasi sebesar 6,38 unit untuk produk P1 di periode pertama. Nilai penyimpangan ini merepresentasikan tingkat sebaran atau deviasi data historis terhadap nilai tengah ekspektasi persediaan perusahaan. Tujuan akhir dari pengolahan kedua parameter statistik ini adalah untuk menentukan angka kuantitas akhir permintaan MTO yang akan dimasukkan ke dalam baris *Gross Requirements* pada tabel perencanaan MRP gabungan. Guna menjamin keandalan sistem dalam menghadapi fluktuasi pesanan sekaligus mematuhi kebijakan strategis pemenuhan hak pelanggan, kuantitas akhir permintaan ditentukan dari hasil penjumlahan antara nilai rata-rata (*Average*) dan nilai standar deviasi (*Standard Deviation*) spesifik periode tersebut. Pendekatan akumulatif ini secara teoritis ditujukan untuk memenuhi target tingkat pelayanan (*Service Level*) minimal sebesar 88% yang diincar oleh perusahaan. Dengan mengintegrasikan faktor standar deviasi sebagai komponen pembentuk permintaan fungsional, sistem perencanaan material secara otomatis membangun sebuah bantalan proteksi stok yang proporsional terhadap tingkat ketidakpastian. Langkah ini memastikan bahwa lini perakitan komponen *Electronic Control Module* (ECM) tetap memiliki pasokan material yang memadai tanpa memicu penumpukan inventori berlebih di gudang pada saat realisasi pesanan melonjak ke skenario *High*.

4.4.2 Penyusunan Tabel MRP

Sebelum dilakukan tahapan optimasi menggunakan algoritma evolusioner, terlebih dahulu disusun tabel *Material Requirement Planning* (MRP) awal sebagai basis pembandingan (*baseline*). Mengingat perusahaan belum menerapkan sistem MRP secara formal dalam perencanaan produksinya, kondisi awal ini disimulasikan menggunakan pendekatan heuristik konvensional, yaitu Kebijakan Produksi Rata-Rata. Nilai pada baris *Planned Order Received* (PORec) ditentukan secara konstan dan merata dari periode 1 sampai 8 berdasarkan pembulatan nilai rata-rata *Net Requirements* saat kondisi kapasitas kosong. Langkah ini sangat penting untuk menciptakan pembandingan yang sepadan (*apple-to-apple*) guna menguji sejauh mana intervensi model matematis usulan mampu meningkatkan efisiensi biaya dan performa pelayanan konsumen.

Tabel 4. 11 MRP Produk *Smart Water Meter Node*

Product	P1	Hr/# in WS 4 0,25			Hr/# in WS 5 0,18				
	Dec-25	Jan-26			Feb-26				
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		60	70	65	75	80	85	90	95
MTO Demand		25	27	24	29	27	32	30	34
Total		85	97	89	104	107	117	120	129
Scheduled Receipt		48	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	40	3	0	0	0	0	0	0	0
Net Requirements		0	0	0	2	14	36	61	95
Planned Order Received		95	95	95	95	95	95	95	95
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lost Sales		0	24	24	29	27	32	30	34
Backorder		0	70	65	75	80	85	90	95

Tabel 4. 12 MRP Produk *Industrial Vibration Monitor*

Product	P2	Hr/# in WS 4 0,3			Hr/# in WS 5 0,22				
	Dec-25	Jan-26			Feb-26				
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		25	30	28	32	35	38	40	45

Product	P2	Hr/# in WS 4			0,3	Hr/# in WS 5			0,22
MTO Demand		14	16	14	17	16	19	17	21
Total		39	46	42	49	51	57	57	66
Scheduled Receipt		26							
Projected Available Balance	15	2	0	0	0	0	0	0	0
Net Requirements		0	0	0	0	2	13	24	44
Planned Order Received		46	46	46	46	46	46	46	46
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lost Sales		0	14	14	17	16	19	17	21
Backorder		0	30	28	32	35	38	40	45

Tabel 4. 13 MRP Produk *Cold-Chain Temperature Logger*

Product	P3	Hr/# in WS 4			0,22	Hr/# in WS 5			0,16
	Dec-25	Jan-26				Feb-26			
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		80	90	85	95	100	105	110	120
MTO Demand		20	31	29	33	31	35	34	40
Total		100	121	114	128	131	140	144	160
Scheduled Receipt		57							
Projected Available Balance	55	12	0	0	0	0	0	0	0

Net Requirements		0	0	0	3	18	42	70	114
Planned Order Received		116	116	116	116	116	116	116	116
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lost Sales		0	19	29	33	31	35	34	40
Backorder		0	90	85	95	100	105	110	120

Tabel 4. 14 MRP *Sensor Board Assembly*

Product	A1	Hr/# in WS 1			0,35				
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabel 4. 15 MRP *Power & Comms Assembly*

Product	A2	Hr/# in WS 3			0,2				
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	

Tabel 4. 17 *Vibration Sensor Board Assembly*

[illegible]

Tabel 4. 18 *Power & Comms Assembly*

Product	B2	Hr/# in WS 3	0,25						
	Dec-25	Jan-26					Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									

Product	B2	Hr/# in WS 3		0,25				
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 4. 19 *Rugged Enclosure Kit*

Product	B3	Hr/# in WS 2		0,07					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabel 4. 20 MRP *Temperature Sensor Board Assembly*

Product	C1	Hr/# in WS 1		0,3					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0

Product	C1	Hr/# in WS 1		0,3					
Projected Available Balance	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabel 4. 21 MRP *Battery & Power Assembly*

Product	C2	Hr/# in WS 3		0,15					
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabel 4. 22 *Enclosure & Label Kit*

Product	C3	Hr/# in WS 2		0,04					
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	

Product	C3	Hr/# in WS 2		0,04					
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received									
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabel 4. 23 MRP PCB *Bare Board*

Product	X1	Buy								
		Dec-25				Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		180	180	307	552	833	1122	1436	1757	2112
Net Requirements			0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Tabel 4. 24 MRP MCU (*microcontroller*)

Product	X2		Buy									
	Nov-25		Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement					0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt					0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance				120	120	247	492	773	1062	1376	1697	2052
Net Requirements					0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received					0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355				

Tabel 4. 25 RF Module (LoRa/BLE)

Product	X3	Buy									
	Nov-25	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement				0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			80	80	94	183	287	394	511	631	760
Net Requirements				0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received				0	14	89	104	107	117	120	129
Planned Order Release	0	14	89	104	107	117	120	129			

Tabel 4. 26 MRP *Cellular Module*

Product	X4				Buy								
	Nov-25				Dec-25				Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement						0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt						0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance					40	40	40	46	95	146	203	260	326
Net Requirements						0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received						0	0	6	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	0	6	49	51	57	57	66					

Tabel 4. 27 MRP *Accelerometer*

Product	X5				Buy							
	Nov-25			Dec-25			Jan-26			Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement					0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt					0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance				50	50	50	56	105	156	213	270	336
Net Requirements					0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received					0	0	6	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	0	6	49	51	57	57	66				

Tabel 4. 28 MRP *Temperature Sensor IC*

Product	X6		Buy								
	Nov-25		Dec-25			Jan-26			Feb-26		
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement				0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			130	130	199	313	441	572	712	856	1016
Net Requirements				0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received				0	69	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	69	114	128	131	140	144	160			

Tabel 4. 29 MRP *Pressure/flow Sensor Element*

Product	X7		Buy												
	Nov-25				Dec-25				Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2		
Gross Requirement						0	0	0	0	0	0	0	0		
Scheduled Receipt						0	0	0	0	0	0	0	0		
Projected Available Balance					35	35	49	138	242	349	466	586	715		
Net Requirements						0	0	0	0	0	0	0	0		
Planned Order Received						0	14	89	104	107	117	120	129		
Planned Order Release	0	14	89	104	107	117	120	129							

Tabel 4. 30 MRP *Battery Pack*

Product	X8		Buy								
	Nov-25		Dec-25			Jan-26			Feb-26		
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement				0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			160	160	287	532	813	1102	1416	1737	2092
Net Requirements				0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received				0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355			

Tabel 4. 31 MRP DC-DC *Converter Module*

Product	X9	Buy								
		Dec-25			Jan-26			Feb-26		
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		200	200	327	572	853	1142	1456	1777	2132
Net Requirements			0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Tabel 4. 32 MRP ESD/*Protection Kit*

Product	X10	Buy								
		Dec-25				Jan-26				Feb-26
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		250	250	377	622	903	1192	1506	1827	2182
Net Requirements			0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Tabel 4. 33 MRP *Connectors Set*

Product	X11	Buy								
		Dec-25				Jan-26				Feb-26
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		300	300	594	1084	1645	2223	2851	3493	4203
Net Requirements			0	0	0	0	0	0	0	0

Product	X11	Buy							
Planned Order Received		0	294	490	561	578	628	642	710
Planned Order Release	0	294	490	561	578	628	642	710	

Tabel 4. 34 MRP *Wiring Harness*

Product	X12	Hr/# in WS 2			0,1				
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	90	318	407	507	602	764	945	1107	1299
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		228	89	100	95	162	181	162	192
Planned Order Release	228	89	100	95	162	181	162	192	

Tabel 4. 35 MRP *Enclosure*

Product	X13	Buy								
		Dec-25				Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	0	0	0	0	0	0	0

Product	X13	Buy								
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	220	220	347	592	873	1162	1476	1797	2152	
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	127	245	281	289	314	321	355	
Planned Order Release	0	0	0	0	0	0	0	0		

Tabel 4. 36 *Gasket & Screws Kit*

Product	X14	Buy								
		Dec-25			Jan-26			Feb-26		
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	260	260	387	632	913	1202	1516	1837	2192	
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	127	245	281	289	314	321	355	
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Tabel 4. 37 MRP *Label & Packaging Set*

Product	X15	Buy							
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	200	200	269	383	511	642	782	926	1086
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	69	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	69	114	128	131	140	144	160	

Tabel 4. 38 MRP *Heat Sink/Potting Compound*

Product	X16	Buy							
		Dec-25			Jan-26			Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement		0	0	0	0	0	0	0	0
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	100	100	100	152	250	352	466	580	712
Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	0	52	98	102	114	114	132

Planned Order Release	0	0	52	98	102	114	114	132
------------------------------	---	---	----	----	-----	-----	-----	-----

Tahapan penyusunan tabel perencanaan kebutuhan material dilakukan untuk memetakan seluruh kebutuhan komponen secara terstruktur berdasarkan hierarki *Bill of Material* perusahaan dari tingkat tertinggi hingga komponen dasar. Dokumentasi tabel perencanaan ini mencakup seluruh cakupan item yang diteliti, yang diawali dari produk jadi pada tingkat tertinggi atau level nol yang terdiri atas tiga varian utama sistem kendali elektronik. Analisis kemudian diturunkan secara mekanis pada tingkat perakitan antara atau level satu yang meliputi sembilan varian sub-perakitan pendukung, serta diakhiri pada tingkat komponen dasar atau level dua yang mencakup enam belas jenis material pembentuk spesifik. Penyusunan lembar kerja perencanaan awal ini berfungsi untuk menangkap kondisi *baseline* atau performa sistem sebelum dilakukannya intervensi optimasi kapasitas stasiun kerja oleh mesin komputasi.

Struktur internal tabel perencanaan pada tingkat produk jadi memiliki beberapa parameter masukan yang unik guna mengakomodasi sistem produksi gabungan yang menggabungkan dua karakteristik pemenuhan pasar. Parameter kebutuhan pertama adalah permintaan untuk kategori produk produksi massal (MTS) yang nilainya diadopsi langsung dari hasil kalkulasi peramalan berkala perusahaan. Parameter kedua adalah permintaan untuk kategori produk berdasarkan pesanan (MTO), di mana kuantitas kebutuhannya diintegrasikan dari hasil penjumlahan nilai rata-rata tertimbang dan nilai standar deviasi yang telah diproses pada tahapan pemodelan statistik sebelumnya. Akumulasi dari kedua jenis parameter permintaan tersebut kemudian membentuk nilai kebutuhan kotor atau total permintaan (*Total Demand*) pada setiap periode berjalan. Selain itu, lini produk jadi juga memiliki nilai penerimaan pesanan yang telah dijadwalkan, yang mencerminkan komitmen pasokan material yang dipastikan akan tiba pada periode awal perencanaan sesuai dengan kebijakan manufaktur eksisting.

Penentuan saldo persediaan (*Projected Available Balance*) yang diproyeksikan pada tabel perencanaan dihitung secara berantai antar periode dengan membedakan perlakuan antara periode awal dan periode berjalan. Untuk periode awal atau periode ke-0, nilai saldo diisi secara langsung memanfaatkan data inventori fisik riil yang tersedia di gudang penyimpanan pada saat penelitian dimulai. Sementara itu, untuk seluruh periode selanjutnya di sepanjang horizon perencanaan, nilai saldo persediaan ditentukan secara

matematis dengan mencari nilai tertinggi atau batas minimum non-negatif dari kalkulasi persediaan periode sebelumnya yang dikombinasikan dengan kedatangan pesanan terjadwal serta rencana penerimaan produksi, yang kemudian dikurangi dengan total kebutuhan kotor pada periode yang bersangkutan. Logika perhitungan ini memastikan bahwa nilai saldo persediaan selalu mencerminkan kondisi riil di lapangan tanpa memicu nilai negatif yang tidak realistis secara fisik.

Parameter kebutuhan bersih (*Net Requirement*) pada seluruh tingkatan tabel perencanaan, baik untuk tingkat produk jadi, sub-perakitan, maupun komponen dasar, ditentukan dari selisih antara total kebutuhan kotor terhadap ketersediaan material yang ada. Ketersediaan material tersebut dihitung dari penjumlahan antara saldo persediaan dari periode sebelumnya dengan penerimaan pesanan yang telah dijadwalkan pada periode berjalan. Nilai kebutuhan bersih ini menjadi indikator utama bagi sistem untuk menentukan kapan dan seberapa besar kuantitas material yang harus didatangkan atau diproduksi agar lini manufaktur terhindar dari kondisi kekurangan bahan baku.

Rencana penerimaan produksi pada tabel awal ini ditandai secara khusus menggunakan visualisasi warna tertentu karena parameter ini disiapkan untuk bertindak sebagai variabel keputusan utama yang nilainya akan dicari dan diubah secara dinamis oleh alat pengoptimasi. Pada tahap sebelum optimasi ini, seluruh baris rencana penerimaan produksi (*Planned Order Received*) diisi secara manual menggunakan angka konstan hasil perhitungan rata-rata kebutuhan bersih awal, atau menggunakan *Level Strategy* dalam perencanaan produksinya. Selanjutnya, rencana pelepasan pemesanan (*Planned Order Release*) ditentukan dengan menyamakan nilainya dengan rencana penerimaan produksi, namun waktu eksekusinya dimundurkan atau digeser ke periode sebelumnya disesuaikan dengan tenggang waktu atau *lead time* masing-masing item. Proses pergeseran waktu ini sangat krusial untuk menjamin bahwa material yang dipesan atau diproduksi akan tiba tepat pada saat stasiun kerja membutuhkannya.

Sebagai konsekuensi dari diisinya nilai variabel keputusan rencana produksi menggunakan pendekatan rata-rata yang konstan di setiap periode ini, sistem perencanaan memberikan dampak langsung pada parameter persediaan dan penalti operasional di tingkat produk jadi. Karena volume produksi dipasok dalam jumlah yang sama secara

kaku setiap minggunya, sistem memicu munculnya nilai proyeksi saldo persediaan (*Projected Available Balance*) yang cukup besar dan menumpuk hampir di setiap periode horizon perencanaan, terutama pada periode-periode awal ketika volume permintaan riil dari konsumen sebenarnya masih landai. Di sisi lain, tingginya pasokan konstan ini menyebabkan parameter pinalti kehilangan penjualan (*lost sales*) dan pesanan tertunda (*backorder*) pada tabel sebelum optimasi ini seluruhnya bernilai nol, yang menunjukkan bahwa seluruh permintaan di setiap periode waktu berhasil terpenuhi oleh ketersediaan fisik material hasil kebijakan produksi rata-rata tersebut.

4.4.3 Beban Kerja pada Stasiun Kerja

Langkah krusial berikutnya dalam rangkaian penyusunan modul perencanaan ini adalah melakukan kalkulasi pemetaan beban kerja aktual pada setiap stasiun kerja di sepanjang horizon perencanaan delapan periode. Proses pemetaan ini bertujuan untuk merelevansikan kebutuhan material yang dihasilkan oleh tabel perencanaan kebutuhan material dengan ketersediaan kapasitas nyata di lantai produksi perusahaan. Analisis pembebanan ini didokumentasikan secara terpisah ke dalam lima buah tabel representatif yang mewakili masing-masing stasiun kerja kritis, mulai dari stasiun kerja pertama hingga stasiun kerja kelima. Penilaian beban kerja awal ini sangat penting dilakukan untuk melihat seberapa jauh efisiensi penggunaan kapasitas operasional sebelum adanya intervensi dari penyeimbangan model komputasi.

Tabel 4. 39 Beban Stasiun Kerja 1

Workstation	1							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
A1	0	18,9	31,15	36,4	37,45	40,95	42	45,15
B1	0	1,8	18,9	22,05	22,95	25,65	25,65	29,7
C1	0	32,7	34,2	38,4	39,3	42	43,2	48
Load	0	53,4	84,25	96,85	99,7	108,6	110,85	122,85

Tabel 4. 40 Beban Stasiun Kerja 2

Workstation	2							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
X12	22,8	8,9	10	9,5	16,2	18,1	16,2	19,2

A3	0	10,8	17,8	20,8	21,4	23,4	24	25,8
B3	0	0,28	2,94	3,43	3,57	3,99	3,99	4,62
C3	0	4,36	4,56	5,12	5,24	5,6	5,76	6,4
Load	0	15,44	25,3	29,35	30,21	32,99	33,75	36,82

Tabel 4. 41 Beban Stasiun Kerja 3

Workstation	3							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
A2	0	10,8	17,8	20,8	21,4	23,4	24	25,8
B2	0	1	10,5	12,25	12,75	14,25	14,25	16,5
C2	0	16,35	17,1	19,2	19,65	21	21,6	24
Load	0	28,15	45,4	52,25	53,8	58,65	59,85	66,3

Tabel 4. 42 Beban Stasiun Kerja 4

Capacity								
Workstation	4							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	23,75	23,75	23,75	23,75	23,75	23,75	23,75	23,75
P2	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
P3	25,52	25,52	25,52	25,52	25,52	25,52	25,52	25,52
Load	63,07	63,07	63,07	63,07	63,07	63,07	63,07	63,07

Tabel 4. 43 Beban Stasiun Kerja 5

Workstation	5							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1
P2	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12	10,12
P3	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
Load	45,78	45,78	45,78	45,78	45,78	45,78	45,78	45,78

Penentuan nilai beban operasional untuk setiap jenis komponen atau produk yang melewati suatu stasiun kerja tertentu dihitung secara mekanis dengan mengalikan kuantitas rencana penerimaan produksi pada periode berjalan dengan durasi waktu pemrosesan standarnya. Karena setiap stasiun kerja bertanggung jawab atas jenis

komponen atau tingkat produk yang spesifik sesuai dengan bagan alir proses manufaktur, maka variabel pengali dalam lembar kerja disesuaikan secara presisi berdasarkan item yang relevan dengan stasiun tersebut. Sebagai contoh, perhitungan total beban operasional pada stasiun kerja pertama hanya melibatkan akumulasi waktu proses dari sub-perakitan pada tingkat pertama. Di sisi lain, stasiun kerja kedua mengakomodasi perhitungan waktu proses untuk satu varian material tingkat kedua serta tiga varian sub-perakitan tingkat pertama, sementara stasiun kerja ketiga menghitung pembebanan untuk tiga jenis sub-perakitan tingkat pertama lainnya. Untuk dua stasiun kerja terakhir, yaitu stasiun kerja keempat dan kelima, pembebanan dihitung berdasarkan waktu pengerjaan akhir serta pengujian fungsional untuk tiga varian produk jadi pada tingkat tertinggi.

Akumulasi dari seluruh waktu pemrosesan item yang relevan tersebut pada satu periode yang sama kemudian dijumlahkan untuk menghasilkan parameter total beban kerja stasiun pada setiap minggunya. Berdasarkan hasil perhitungan penentuan kuantitas produksi menggunakan kebijakan rata-rata konstan seperti yang ditunjukkan pada tabel perhitungan di atas, diperoleh visualisasi nilai total beban kerja aktual pada baris terbawah di seluruh stasiun kerja, mulai dari stasiun kerja pertama hingga kelima, di sepanjang delapan periode perencanaan. Munculnya angka beban kerja riil ini terjadi sebagai akibat langsung dari pengisian kuantitas pada baris rencana penerimaan produksi (PORec) di dalam tabel perencanaan kebutuhan material, di mana hasil perkalian matematika terhadap waktu proses standar pada lembar kerja menghasilkan pembebanan yang stabil di beberapa titik, seperti pada stasiun kerja 4 yang menerima beban konstan sebesar 63,07 jam dan stasiun kerja 5 sebesar 45,78 jam di setiap periodenya.

Penyajian tabel beban kerja yang memunculkan angka aktual pada tahap awal ini memberikan gambaran objektif mengenai profil utilisasi kapasitas mesin dan tenaga kerja perusahaan di bawah pengaruh kebijakan produksi konvensional yang kaku. Keadaan baseline ini memperlihatkan bahwa dengan menerapkan volume produksi secara merata di setiap minggu, stasiun kerja perakitan akhir seperti stasiun kerja 4 dan 5 menerima beban pengerjaan yang monoton dan statis, sementara stasiun kerja bagian hulu seperti stasiun kerja 1, 2, dan 3 mengalami fluktuasi beban yang merangkak naik dari periode ke periode akibat penumpukan pelepasan komponen (PORel) yang bergeser mengikuti *lead*

time. Melalui integrasi model pemrograman matematika menggunakan alat bantu pengoptimasi pada tahapan selanjutnya, kombinasi angka rencana produksi pada variabel keputusan ini akan diatur ulang secara dinamis. Hasil optimasi tersebut nantinya secara langsung akan mengubah distribusi nilai beban kerja pada kelima stasiun kerja ini menjadi kombinasi yang jauh lebih efisien, seimbang, dan sepenuhnya terlindung dari risiko kelebihan beban kapasitas atau *overload* pada titik-titik kritis lini produksi.

4.4.4 Penghitungan *Total Cost*

Tahapan akhir sebelum dilakukannya proses optimasi komputasi adalah menyusun struktur pemetaan total biaya operasional yang berjalan di sepanjang horizon perencanaan. Tabel perhitungan total biaya ini dirancang secara terintegrasi untuk menangkap dampak finansial langsung dari rencana penjadwalan produksi yang diterapkan, sekaligus berfungsi sebagai parameter fungsi tujuan utama yang nilai akhirnya akan diminimalkan oleh alat pengoptimasi. Struktur pembiayaan komprehensif ini mencakup akumulasi dari tiga komponen beban finansial utama, yaitu total biaya produksi variabel, total biaya penalti pesanan tertunda, serta total biaya penalti akibat hilangnya peluang penjualan untuk ketiga varian produk jadi kendali elektronik.

Tabel 4. 44 Perhitungan *Total Cost*

Costs								
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00	Rp 109.250.000,00
P2	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00	Rp 101.200.000,00
P3	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00	Rp 98.600.000,00
Holding Cost	Rp 1.962.600	Rp 1.923.300	Rp 2.027.700	Rp 1.864.800	Rp 1.639.500	Rp 1.220.100	Rp 759.600	Rp 36.600
Backorder Cost	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -
Lost Sales Cost	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -
Total Cost								Rp 2.483.834.200,00

Komponen biaya pertama, yaitu biaya produksi, dihitung secara periodik berdasarkan hasil perkalian antara kuantitas rencana penerimaan produksi pada baris variabel keputusan dengan nilai estimasi biaya manufaktur per unit untuk masing-masing varian produk. Berdasarkan hasil perhitungan kuantitas menggunakan kebijakan rata-rata konstan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.44, nilai pengeluaran untuk sektor manufaktur langsung ini memunculkan angka pembebanan yang stabil di setiap periode untuk ketiga varian produk utama. Produk P1 mencatat biaya produksi konstan sebesar Rp109.250.000,00 per periode, produk P2 sebesar Rp101.200.000,00 per periode, dan produk P3 sebesar Rp98.600.000,00 per periode. Angka-angka ini mencerminkan adanya alokasi pengeluaran finansial yang rutin dikeluarkan oleh perusahaan di sepanjang delapan periode perencanaan demi mempertahankan volume pengerjaan yang stagnan di lantai produksi.

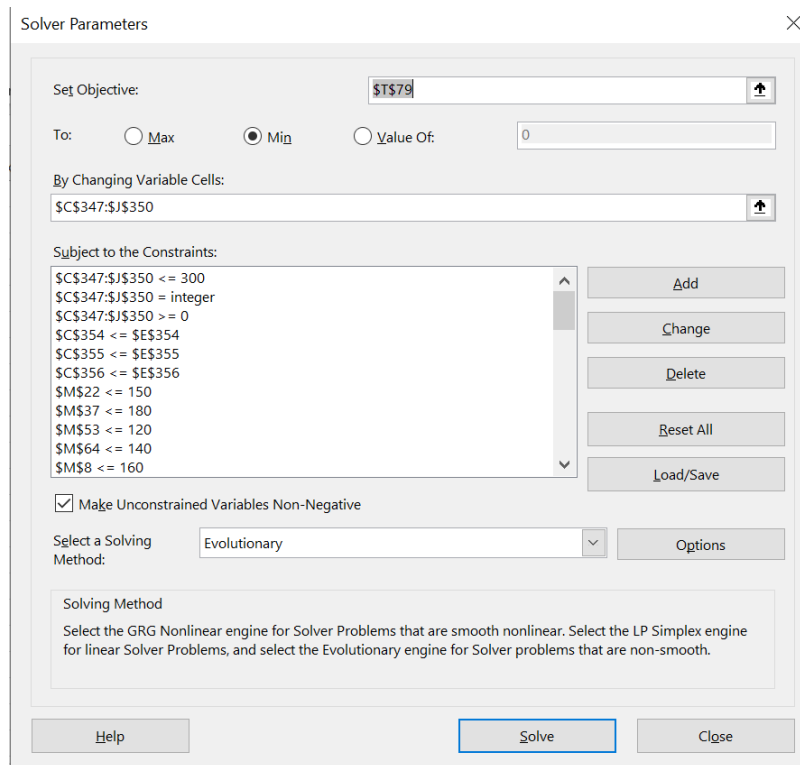
Namun, penerapan volume produksi massal yang kaku di setiap periode ini memberikan konsekuensi tersendiri terhadap komponen biaya di sektor persediaan gudang. Kebijakan memproduksi barang dalam kuantitas yang sama secara terus-menerus memicu munculnya beban biaya simpan (*Holding Cost*) yang berfluktuasi secara dinamis di setiap periode, dengan nilai berkisar dari yang tertinggi sebesar Rp2.027.700,00 pada periode 3 hingga nilai terendah sebesar Rp36.600,00 pada periode 8. Biaya simpan ini muncul akibat adanya penumpukan produk jadi yang mengendap di dalam gudang selama beberapa waktu. Di sisi lain, karena besarnya pasokan dari kebijakan rata-rata ini mampu memenuhi seluruh volume permintaan konsumen secara lancar, pengeluaran untuk biaya penalti pesanan tertunda (*Backorder Cost*) dan biaya penalti kehilangan penjualan (*Lost Sales Cost*) seluruhnya tercatat nihil atau bernilai nol di sepanjang horizon perencanaan.

Akumulasi dari penjumlahan seluruh komponen biaya produksi untuk ketiga varian produk beserta biaya simpan tersebut pada akhirnya membentuk nilai total biaya operasional perusahaan sebelum optimasi. Angka akumulasi akhir yang dihasilkan pada tahapan sebelum optimasi ini menunjukkan nilai pengeluaran operasional yang cukup besar, yaitu menyentuh angka final sebesar Rp2.483.834.200,00. Kondisi *baseline* finansial yang dihasilkan oleh kebijakan konvensional ini memberikan gambaran objektif mengenai total biaya premium yang harus ditanggung akibat ketidakmampuan sistem

dalam menyelaraskan jadwal produksi secara fleksibel terhadap dinamika pergeseran permintaan. Nilai total biaya operasional akhir inilah yang nantinya akan digunakan oleh algoritma evolusioner pada mesin pengoptimasi sebagai titik awal (*baseline*) untuk dicari, dipangkas, dan diseimbangkan alokasi produksinya sehingga dapat ditemukan solusi alternatif dengan pengeluaran operasional yang jauh lebih minimum dan efisien bagi perusahaan.

4.4.5 Optimasi *Evolutionary Algorithm*

Tahapan puncak sekaligus penutup dari seluruh rangkaian sistem pengolahan data dalam penelitian ini adalah melakukan eksekusi simulasi optimasi kapasitas menggunakan modul pengolah angka pembantu. Proses komputasi ini bertujuan untuk mencari jalan keluar terbaik berupa kombinasi jadwal manufaktur yang dapat menghasilkan pengeluaran finansial paling rendah namun tetap patuh pada seluruh batasan operasional pabrik. Berdasarkan karakteristik model gabungan yang memiliki banyak fungsi logika pemutus arus biaya, maka metode pencarian solusi yang dipilih adalah *evolutionary algorithm*. Metode berbasis seleksi genetika ini sengaja diterapkan guna menjamin penemuan titik optimal global dan mencegah sistem terhenti pada zona optimal lokal akibat sifat data yang tidak berkelanjutan.



Gambar 4. 4 Optimasi *Evolutionary Algorithm*

Konfigurasi pertama yang ditetapkan di dalam sistem adalah menentukan sel yang nantinya akan dijadikan sebagai fungsi tujuan utama dengan opsi pengkondisian berupa minimalisasi nilai. Sel fungsi tujuan ini diarahkan langsung pada akumulasi total biaya operasional yang merupakan penjumlahan dari biaya manufaktur variabel, biaya penalti pesanan tertunda, serta biaya pinalti akibat kehilangan peluang penjualan di sepanjang delapan periode perencanaan. Langkah berikutnya adalah mendefinisikan sel variabel berubah yang bertindak sebagai variabel keputusan independen di mana nilainya akan dihitung dan dimanipulasi secara otomatis pada proses optimasi. Sel variabel yang berubah ini diatur secara spesifik pada baris *Planned Order Received* untuk ketiga varian produk jadi ECM di setiap periodenya. Melalui skema ini, mesin pengoptimasi diberikan otoritas penuh untuk menentukan kuantitas manufaktur mingguan yang paling ideal untuk menekan total pengeluaran perusahaan.

Agar hasil pencarian kuantitas produksi tetap realistis dan dapat diimplementasikan di rantai pabrik, sistem dikunci oleh beberapa kelompok

batasan/*constraint* operasional atau kendala yang ketat. Kelompok kendala pertama adalah batasan kapasitas stasiun kerja, di mana total akumulasi beban kerja mingguan pada masing-masing stasiun kerja, mulai dari stasiun pertama hingga stasiun kelima, tidak diperbolehkan melampaui batas maksimal jam kerja tersedia yang telah diidentifikasi pada bagian pengumpulan data. Kelompok kendala kedua bertugas menjaga kualitas pelayanan konsumen, di mana jumlah total unit produk yang mengalami penalti kehilangan penjualan dan pesanan tertunda diakumulasikan lalu divalidasi agar tidak melebihi batas maksimal dua belas persen dari total permintaan, demi terpenuhinya target tingkat pelayanan minimal sebesar delapan puluh delapan persen sesuai kebijakan manajemen.

Kelompok kendala terakhir diatur secara khusus untuk memenuhi prasyarat mekanis dari prosedur kerja *evolutionary algorithm* di dalam program komputer. Kendala ini menetapkan batas bawah dan batas atas yang ketat bagi nilai variabel keputusan rencana penerimaan produksi, di mana kuantitas produk diset tidak boleh lebih kecil dari angka nol sebagai batas minimum fisik, dan tidak boleh melampaui angka tiga ratus unit sebagai batas maksimum kapasitas teoritis yang dapat ditoleransi. Selain itu, variabel keputusan tersebut wajib dikunci ke dalam format bilangan bulat atau integer guna memastikan bahwa kuantitas produk yang dijadwalkan oleh sistem tidak berupa angka pecahan yang mustahil untuk diproduksi secara fisik. Melalui seluruh jalinan konfigurasi fungsi tujuan, variabel keputusan, dan batasan operasional ini, mesin pembantu akan mengeksekusi iterasi pencarian hingga menghasilkan tabel perencanaan kebutuhan material yang optimal dan seimbang secara finansial maupun kapasitas.

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Hasil MRP Usulan

Berdasarkan hasil eksekusi optimasi menggunakan algoritma evolusioner, seluruh data lembar kerja perencanaan kebutuhan material yang terperinci untuk tingkatan produk jadi, sub-perakitan, hingga komponen dasar telah dipindahkan ke bagian lampiran guna memenuhi asas proporsionalitas halaman pembahasan. Sebagai gantinya, visualisasi hasil keputusan pengerjaan difokuskan pada ringkasan kuantitas rencana penerimaan produksi untuk tiga varian produk tingkat tertinggi sepanjang delapan periode perencanaan sebagaimana disajikan pada Tabel 5.2. Temuan utama yang sangat krusial dari hasil pengolahan ini menunjukkan bahwa mesin pengoptimasi tidak membagi kuantitas produksi secara merata, melainkan membentuk pola fluktuasi penjadwalan yang dinamis untuk merespons keterbatasan kapasitas stasiun kerja dan fluktuasi total permintaan gabungan.

Tabel 5. 1 *Planned Order Received* Awalan

Komponen	Periode							
	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	95	95	95	95	95	95	95	95
P2	46	46	46	46	46	46	46	46
P3	116	116	116	116	116	116	116	116

Tabel 5. 2 *Planned Order Received* Usulan

Komponen	Periode							
	1	2	3	4	5	6	7	8
P1 (SWMN)	67	145	31	39	59	130	105	86
P2 (IVM)	17	28	93	55	14	26	37	48
P3 (CCTL)	88	39	100	118	138	147	63	119

Temuan utama yang sangat krusial dari hasil pengolahan ini menunjukkan adanya perbedaan paradigma yang ekstrem antara kondisi awal dan usulan. Pada kondisi awal, perusahaan menerapkan *Level Production Strategy* dengan membagi kuantitas produksi secara merata di setiap periode berdasarkan rata-rata kebutuhan bersih (*net requirements*). Sebaliknya, mesin pengoptimasi melalui *Evolutionary Algorithm* tidak membagi kuantitas produksi secara merata, melainkan membentuk pola fluktuasi penjadwalan yang dinamis untuk merespons keterbatasan kapasitas stasiun kerja dan fluktuasi total permintaan gabungan hibrida MTS-MTO secara real-time.

Pola keputusan manufaktur yang paling menonjol dapat diamati pada lini produk pertama (SWMN), di mana lonjakan volume pengerjaan terbesar dipusatkan oleh sistem pada periode kedua dengan kuantitas mencapai seratus empat puluh lima unit. Keputusan ini dinilai sangat logis secara operasional karena proses optimasi sengaja memacu aktivitas perakitan produk P1 di awal horizon waktu untuk memanfaatkan ketersediaan jam kerja yang masih longgar pada stasiun kerja keempat dan kelima. Langkah ini diambil guna membangun persediaan pengaman yang akan dialokasikan untuk menutup kebutuhan kotor periode-periode berikutnya yang memiliki tren permintaan semakin membesar. Sebaliknya, ketika horizon perencanaan memasuki periode ketiga dan keempat, kuantitas produk P1 diturunkan secara drastis masing-masing menjadi tiga puluh satu dan tiga puluh sembilan unit. Penurunan ini merupakan strategi penyeimbangan beban agar stasiun kerja akhir tidak mengalami kondisi kelebihan beban akibat pada saat yang bersamaan lini produksi harus memprioritaskan lonjakan kebutuhan produk kedua dan ketiga.

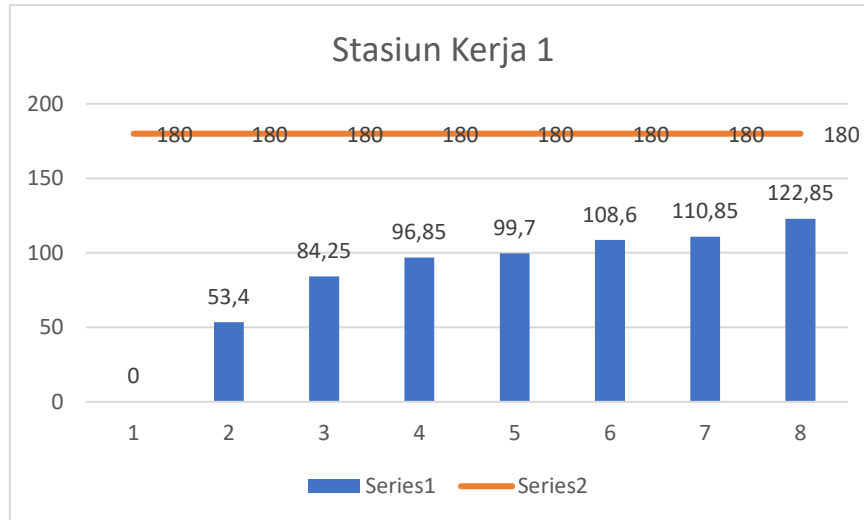
Kondisi penyeimbangan kapasitas tersebut terlihat jelas pada perilaku penjadwalan produk ketiga (CCTL), yang mencatatkan tren peningkatan volume produksi secara masif mulai dari periode ketiga hingga menyentuh titik puncak sebesar seratus empat puluh tujuh unit pada periode keenam. Solver secara cerdas menggeser pemenuhan produk P3 ke periode pertengahan dan akhir karena durasi waktu proses standar untuk varian ini pada stasiun kerja keempat dan kelima merupakan yang paling singkat dibandingkan varian lainnya. Dengan karakteristik waktu pemrosesan yang efisien

tersebut, perusahaan dapat melipatgandakan volume *output* perakitan P3 untuk mengamankan target tingkat pelayanan minimal tanpa melanggar batasan jam kerja maksimal mingguan yang tersedia di rantai produksi.

Implikasi finansial mendasar dari perubahan angka-angka rencana produksi ini berhubungan erat dengan pembalikan nilai pada struktur parameter total biaya perusahaan. Sebelum dilakukannya langkah optimasi, total biaya operasional berada pada angka ratusan juta rupiah yang murni disebabkan oleh tumpukan penalti kegagalan pelayanan. Setelah algoritma komputer berhasil menetapkan kuantitas produksi riil seperti yang tertera pada Tabel 5.1, akumulasi akhir biaya memang mengalami peningkatan menjadi miliaran rupiah. Perubahan ini diklasifikasikan sebagai temuan positif yang normal, karena investasi modal yang dialokasikan untuk mendanai estimasi biaya manufaktur variabel tersebut terbukti efektif mengeliminasi munculnya penalti pesanan tertunda serta penalti kehilangan peluang penjualan yang jauh lebih merugikan secara ekonomi. Penjadwalan terstruktur ini membuktikan bahwa integrasi model matematika mampu menuntun perusahaan keluar dari jebakan biaya penalti tanpa melewati batas kemampuan kapasitas fisik pabrik.

Meskipun model optimasi usulan ini terbukti superior dalam menekan total biaya operasional dan menyeimbangkan kapasitas lini produksi, terdapat keterbatasan mendasar yang menjadi kelemahan dalam penelitian ini. Model matematis yang dikembangkan saat ini masih mengasumsikan bahwa horizon perencanaan berjalan dalam kondisi statis dan kaku sepanjang delapan periode waktu (*statically fixed horizon*). Dalam realitas industri elektronika yang bergerak sangat cepat, pola fluktuasi permintaan konsumen dan ketidakpastian waktu tunggu material dapat berubah secara mendadak di tengah periode berjalan. Ketidakmampuan model usulan saat ini dalam melakukan pembaruan data secara berkala (*real-time update*) berpotensi menimbulkan bias perencanaan apabila terjadi deviasi ekstrem pada pasokan komponen di periode berikutnya. Keterbatasan ruang lingkup ini membuka celah evaluasi yang besar, di mana diperlukan pengembangan penelitian lanjutan di masa mendatang yang mengintegrasikan model optimasi dengan pendekatan *Rolling Horizon Strategy* guna menghasilkan keputusan perencanaan material yang jauh lebih dinamis dan tangguh.

5.2 Analisis Beban Stasiun Kerja

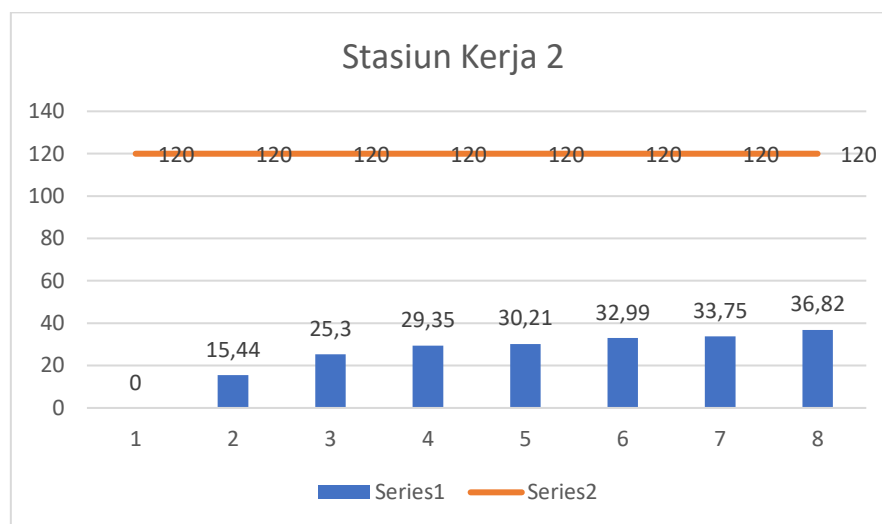


Gambar 5. 1 Grafik Beban Stasiun Kerja 1

Gambar 5.1 menunjukkan visualisasi perbandingan pada Stasiun Kerja 1 yang merepresentasikan lini perakitan papan sirkuit elektronik utama, terlihat garis orisontal kapasitas tersedia berada konstan pada tingkat seratus delapan puluh jam per minggu. Batas atas yang melebihi jumlah jam kalender mingguan ini mencerminkan struktur operasional pabrik yang menggunakan beberapa unit mesin pemasangan komponen secara paralel serta pembagian kelompok kerja yang berjalan terus-menerus. Hasil optimasi menunjukkan bahwa pada periode pertama, diagram batang pembebanan masih berada pada posisi nol. Kondisi ini terjadi karena pergeseran waktu tunggu komponen di mana sistem belum melepas perintah produksi massal pada minggu awal horizon perencanaan.

Memasuki periode kedua hingga periode kedelapan, diagram batang utilisasi menunjukkan tren kenaikan beban secara bertahap dan konsisten, mulai dari lima puluh tiga koma empat puluh jam hingga menyentuh volume tertinggi sebesar seratus dua puluh dua koma delapan puluh lima jam pada akhir periode. Pola pertumbuhan vertikal ini merupakan akibat langsung dari posisi Stasiun Kerja 1 sebagai hulu produksi. Sistem komputer sengaja memacu tingkat pengerjaan komponen antara secara bertahap guna mengantisipasi akumulasi kebutuhan perakitan hilir pada minggu-minggu berikutnya.

Temuan penting dari grafik ini menegaskan bahwa seluruh balok pembebanan di setiap periode berada aman di bawah garis horizontal batas atas. Jarak longgar yang lebar ini membuktikan bahwa stasiun kerja hulu memiliki ketahanan kapasitas yang sangat prima untuk mengantisipasi gangguan pasokan bahan baku tanpa mengganggu siklus mingguan.

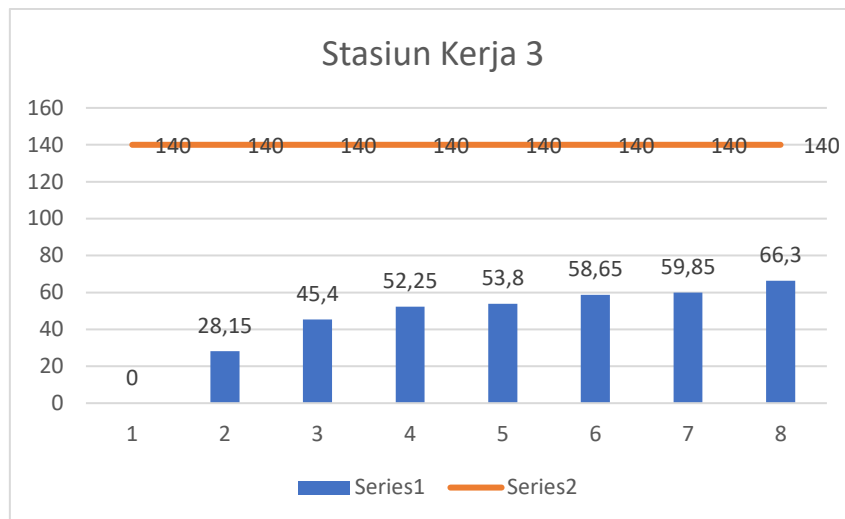


Gambar 5. 2 Grafik Beban Stasiun Kerja 2

Visualisasi grafik untuk Stasiun Kerja 2 pada Gambar 5.2 yang mengendalikan proses pembuatan rangkaian kabel dan pemotongan material dasar menunjukkan garis batas kapasitas maksimal yang dikunci pada tingkat seratus dua puluh jam kerja per minggu. Dari hasil diagram batang yang terbentuk, beban kerja aktual bergerak sangat rendah dan stabil di sepanjang delapan minggu perencanaan, dengan nilai pembebanan terendah di luar periode pertama berada pada angka lima belas koma empat puluh empat jam dan titik tertinggi hanya menyentuh angka tiga puluh enam koma delapan puluh dua jam di periode terakhir.

Rendahnya diagram batang utilisasi pada stasiun kerja ini dipengaruhi oleh karakteristik nilai waktu pemrosesan standar komponen yang relatif sangat singkat, yaitu hanya sebesar nol koma sepuluh jam untuk setiap unit material dasar. Karena durasi pengerjaan per unit yang sangat efisien tersebut, fluktuasi volume produksi produk jadi tidak memberikan tekanan yang berarti pada kapasitas ruang kerja di sektor ini. Penegasan penting dari grafik Stasiun Kerja 2 adalah tercapainya efisiensi utilisasi yang konstan, di mana perusahaan dipastikan tidak perlu mengalokasikan biaya tambahan

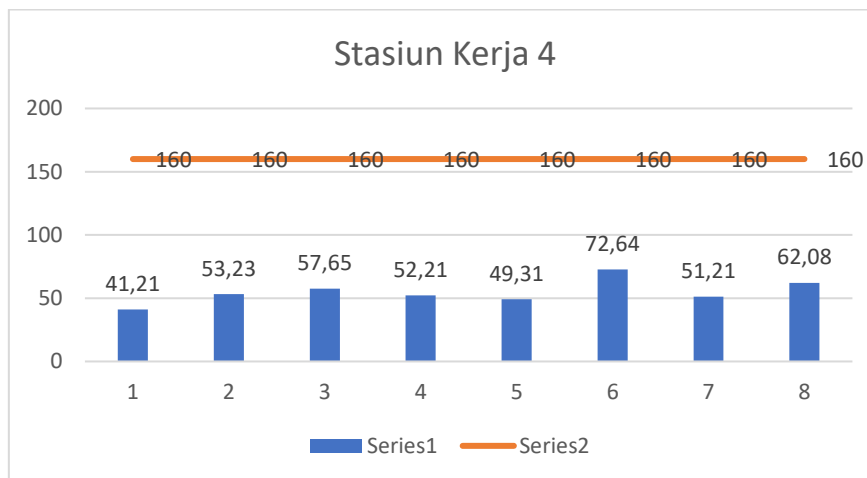
untuk lembur maupun penambahan tenaga kerja baru karena beban nyata tidak pernah melewati tiga puluh persen dari total ruang kapasitas yang tersedia.



Gambar 5. 3 Grafik Beban Stasiun Kerja 3

Pada grafik Stasiun Kerja 3 yang memproses integrasi sub-perakitan untuk unit daya dan komunikasi, parameter kapasitas maksimum ditetapkan konstan sebesar seratus empat puluh jam kerja mingguan. Pola distribusi diagram batang pada bagian ini menyerupai karakteristik stasiun kerja pertama, di mana pembebanan melonjak dari nilai nol pada minggu pertama menjadi dua puluh delapan koma lima belas jam pada minggu kedua, dan terus merangkak naik hingga mencapai beban tertinggi sebesar enam puluh enam koma tiga puluh jam pada minggu terakhir.

Kemiripan tren kenaikan beban ini disebabkan oleh adanya keterikatan struktur komponen di dalam diagram *Bill of Material*. Karena produk yang diproses pada stasiun kerja ketiga merupakan komponen level satu yang mendukung perakitan akhir, maka pergerakan diagram batangnya mengikuti dinamika jadwal pelepasan pemesanan produk utama. Berdasarkan posisi diagram batang terhadap garis batas atas, model komputasi berhasil membuktikan keandalannya dengan menjaga sisa kapasitas ruang tetap aman di atas lima puluh persen pada setiap periode. Hal ini menjamin kelancaran suplai komponen antara menuju stasiun kerja perakitan akhir tanpa risiko penundaan waktu.

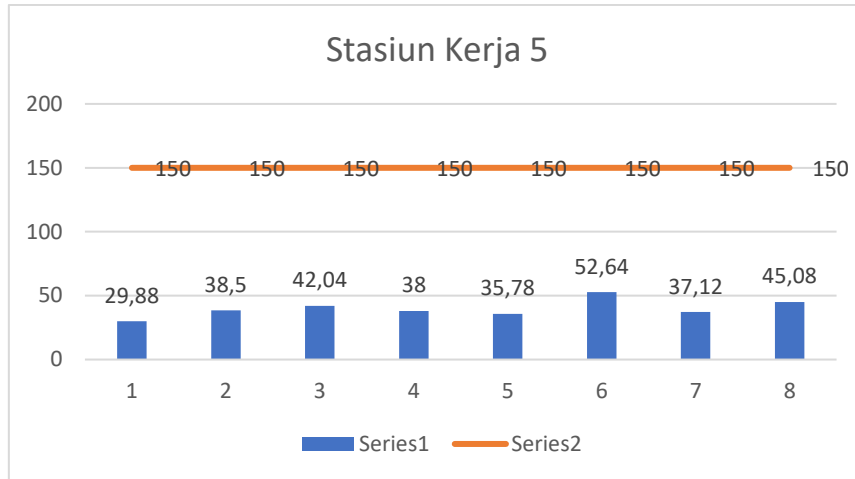


Gambar 5. 4 Grafik Beban Stasiun Kerja 4

Grafik perbandingan pada Stasiun Kerja 4 pada Gambar 5.4 memegang peranan yang sangat krusial dalam analisis ini karena sektor ini menangani tahapan perakitan akhir serta pembuatan wadah pelindung untuk ketiga varian produk jadi utama. Batas kapasitas maksimal untuk stasiun kerja hilir ini ditentukan sebesar seratus enam puluh jam per minggu. Berbeda dengan tiga stasiun kerja sebelumnya yang menunjukkan grafik merangkak naik, diagram batang pada Stasiun Kerja 4 menunjukkan distribusi beban yang jauh lebih merata dan fluktuatif sejak minggu pertama perencanaan. Beban kerja sudah langsung terisi di periode awal sebesar empat puluh satu koma dua puluh satu jam dan menyentuh titik tertinggi sebesar tujuh puluh dua koma enam puluh empat jam pada periode keenam.

Pola diagram batang yang fluktuatif namun seimbang ini merupakan temuan utama (*the major findings*) yang menunjukkan kecerdasan dari algoritma evolusioner. Sistem komputer secara aktif memecah kuantitas pengerjaan ketiga varian produk jadi dan menggeser pemenuhannya ke periode-periode awal yang masih memiliki kelonggaran waktu. Langkah penggeseran ini diambil untuk menghindari penumpukan beban kerja berlebih pada periode akhir yang memiliki volume permintaan konsumen sangat tinggi. Hasil visualisasi membuktikan secara mutlak bahwa tidak ada satu pun diagram batang yang menembus atau menyentuh garis kapasitas seratus enam puluh jam. Penyeimbangan beban berbasis komputasi ini berhasil membebaskan rantai produksi dari

ancaman kemacetan aliran material (*bottleneck*) yang sering merugikan kelancaran manufaktur.



Gambar 5. 5 Grafik Beban Stasiun Kerja 5

Grafik terakhir menyajikan analisis perbandingan pada Stasiun Kerja 5 yang mengendalikan proses akhir berupa pengisian program sistem serta pengujian fungsional seluruh produk jadi sebelum siap dikirimkan kepada konsumen. Batas kemampuan kapasitas operasional maksimal pada area pengujian ini dikunci pada angka seratus lima puluh jam kerja dalam satu minggu. Karakteristik sebaran diagram batang pada stasiun kerja kelima ini bergerak selaras dan proporsional dengan pola yang terjadi pada stasiun kerja keempat sebelumnya, di mana aktivitas pembebanan langsung berjalan di periode awal sebesar dua puluh sembilan koma delapan puluh delapan jam dan mencapai puncaknya pada periode keenam sebesar lima dua koma enam puluh empat jam.

Keselarasan bentuk grafik ini dinilai sangat tepat secara teoritis karena aktivitas pengujian fungsional pada stasiun kerja kelima hanya dapat dieksekusi sesaat setelah produk menyelesaikan tahapan perakitan fisik di stasiun kerja keempat. Melalui hasil visualisasi akhir ini, penegasan mengenai keberhasilan optimasi kapasitas dapat ditarik secara utuh. Fakta bahwa seluruh diagram batang dari kelima stasiun kerja kritis berada di bawah garis batas kapasitas membuktikan bahwa target tingkat pelayanan minimal perusahaan sebesar delapan puluh delapan persen berhasil dipenuhi secara murni melalui pemanfaatan waktu kerja reguler yang tersedia. Sistem usulan ini menjamin tingkat

utilisasi yang sehat bagi kesehatan mesin dan tenaga kerja tanpa memicu pembengkakan pengeluaran finansial penalti operasional.

5.3 Analisis *Total Cost*

Evaluasi terhadap kinerja finansial sistem usulan dilakukan dengan membandingkan parameter total biaya operasional antara asumsi kebijakan awal (produksi rata-rata) dengan hasil intervensi algoritma komputasi (Solver). Perubahan nilai fungsi tujuan ini memegang peranan paling krusial dalam membuktikan keberhasilan pemodelan, sekaligus memaparkan temuan utama (*the major findings*) mengenai bagaimana keputusan penentuan ukuran lot manufaktur berinteraksi secara sensitif dengan struktur pembiayaan persediaan perusahaan. Berdasarkan hasil pengolahan data terbaru, terjadi efisiensi angka yang sangat signifikan. Nilai total biaya operasional pada kondisi awal sebelum optimasi yang menyentuh angka dua miliar empat ratus delapan puluh tiga juta delapan ratus tiga puluh empat ribu dua ratus rupiah (Rp2.483.834.200,00) berhasil dipangkas menjadi dua miliar seratus enam puluh juta tujuh puluh ribu rupiah (Rp2.160.070.000,00) setelah dieksekusi menggunakan metode *evolutionary algorithm*.

Penelusuran logis terhadap struktur pembentuk biaya mengindikasikan bahwa tingginya total biaya pada kebijakan awal disebabkan oleh pendekatan produksi konvensional yang kaku. Pada kondisi sebelum optimasi, keputusan untuk memukul rata kuantitas produksi di setiap periode memang berhasil menghapus biaya penalti pesanan tertunda (*backorder*) dan kehilangan penjualan (*lost sales*) hingga bernilai nol, serta mengamankan *Service Level* secara mutlak di angka 100%. Namun, kebijakan heroik ini menuntut kompensasi finansial yang sangat mahal. Akibat memproduksi barang dalam volume besar secara stagnan di saat permintaan asli konsumen pada periode-periode awal sebenarnya masih landai, perusahaan harus menanggung konsekuensi berupa penumpukan material jadi yang ekstrem di dalam gudang. Akumulasi barang mati yang mengendap inilah yang memicu pembengkakan drastis pada sektor biaya simpan (*holding cost*) sebelum optimasi, yang secara akumulatif mendongkrak grafik pengeluaran total perusahaan hingga meledak di angka dua koma empat puluh delapan miliar rupiah.

Ketika metode optimasi berbasis *evolutionary algorithm* mulai mengintervensi model, sistem secara aktif mengubah status kuantitas rencana penerimaan produksi (PORec) dari semula kaku menjadi sangat dinamis dan responsif terhadap pergeseran waktu. Poin krusial yang menjadi pembeda utama sekaligus keunggulan dari hasil usulan ini terletak pada fenomena pertukaran biaya (*cost trade-off*) yang berhasil dikendalikan secara cerdas oleh komputer. Solver memahami bahwa mempertahankan kesempurnaan pelayanan di angka 100% adalah keputusan yang tidak efisien secara komersial. Oleh karena itu, sistem usulan secara taktis menurunkan *Service Level* secara terkendali ke kisaran angka 88,6%. Penurunan yang terukur ini terbukti menjadi kunci utama bagi penghematan finansial perusahaan.

Dengan menurunkan sedikit tingkat pelayanan namun tetap menjaga posisinya berada di atas ambang batas toleransi minimal yang diizinkan oleh manajemen (88%), Solver berhasil menekan volume penumpukan barang di gudang secara masif. Implikasinya, biaya simpan (*holding cost*) yang semula sangat membebani kas perusahaan berhasil dipangkas secara radikal. Meskipun penurunan *Service Level* ini memicu munculnya sedikit biaya penalti operasional, nilai penalti tersebut jauh lebih kecil dan tidak berarti jika dibandingkan dengan keuntungan masif yang diperoleh dari penghematan biaya simpan di sektor persediaan.

Melalui mekanisme ini, pengeluaran sebesar dua koma enam belas miliar rupiah pada sistem usulan tidak dapat dikategorikan sebagai bentuk pemborosan, melainkan sebuah investasi operasional yang rasional dan terstruktur. Model usulan ini berhasil membimbing manajemen untuk beroperasi pada titik keseimbangan baru, yaitu mengeluarkan biaya produksi yang nyata demi mengamankan target tingkat pelayanan konsumen minimal sebesar delapan puluh delapan persen, sekaligus menghindarkan perusahaan dari sanksi penalti finansial serta penurunan reputasi bisnis akibat kegagalan pemenuhan produk di pasar. Pembahasan kritis ini menegaskan bahwa angka miliaran rupiah hasil optimasi merupakan representasi biaya riil yang sehat dan terkontrol untuk menjalankan roda manufaktur perusahaan secara berkelanjutan.

5.4 Analisis Capaian Target *Service Level*

Indikator keberhasilan utama dari implementasi model integrasi perencanaan kebutuhan material berbasis optimasi ini diukur melalui kemampuan sistem dalam menyeimbangkan antara biaya operasional gudang dengan target tingkat pelayanan konsumen (*service level*). Pada kondisi operasional awal sebelum optimasi dijalankan, pendekatan produksi rata-rata konstan sebenarnya mampu menghasilkan tingkat pelayanan konsumen secara mutlak menyentuh angka 100% karena seluruh pesanan *Make to Order* (MTO) maupun *Make to Stock* (MTS) berhasil terpenuhi tanpa memicu adanya *backorder* maupun *lost sales*. Namun, kesempurnaan pelayanan tersebut terbukti tidak efisien secara komersial karena mengorbankan sisi finansial pabrik akibat pemboncosan biaya simpan. Setelah algoritma evolusioner diintervensi dengan menetapkan batasan ketat bahwa akumulasi jumlah kehilangan penjualan dan pesanan tertunda tidak boleh melebihi batas toleransi maksimal sebesar 12% dari total permintaan (target *service level* minimal manajemen adalah 88%), sistem usulan berhasil memetakan pencapaian angka pemenuhan baru yang jauh lebih rasional dan ekonomis.

Berdasarkan hasil kalkulasi rasio komparasi antara kuantitas produk yang berhasil terpenuhi terhadap total volume permintaan aktual sepanjang delapan periode horizon perencanaan, ketiga varian produk jadi utama pada sistem usulan berhasil dikendalikan secara presisi agar tetap berada di atas ambang bawah pelayanan yang ditetapkan oleh manajemen. Lini produk pertama (P1) berhasil mencapai *service level* sebesar 88,4%, di mana dari total kebutuhan sebanyak 848 unit, sistem menjadwalkan pemenuhan fisik secara tepat waktu sebanyak 750 unit. Penurunan terkendali dari 100% menjadi 88,4% ini membuktikan bahwa penumpukan volume penerimaan produksi P1 yang sebelumnya sangat ekstrem dan kaku di setiap periode berhasil diatur ulang oleh Solver secara dinamis. Pola penjadwalan usulan ini terbukti efektif bertindak sebagai bantalan persediaan pengaman yang efisien guna meredam efek lonjakan permintaan konsumen tanpa menimbulkan risiko penumpukan barang mati di gudang ataupun pelanggaran kapasitas jam kerja reguler pabrik.

Pola pemenuhan yang stabil dan ekonomis ini juga ditunjukkan oleh lini produk kedua (P2) dan produk ketiga (P3). Varian produk kedua menunjukkan angka capaian

service level usulan sebesar 88,2% dengan kuantitas terpenuhi sebanyak 359 unit dari total kebutuhan 407 unit. Sementara itu, produk ketiga mencatatkan performa optimal dengan tingkat pelayanan menyentuh angka 89%, di mana sistem mampu mengamankan 924 unit produk jadi dari total target 1038 unit permintaan pasar. Keberhasilan produk ketiga dalam meraih persentase pemenuhan tertinggi di antara ketiganya berkaitan erat dengan keputusan Solver yang melipatgandakan volume pengerjaan P3 pada pertengahan periode horizon. Karakteristik waktu proses standar P3 yang sangat efisien pada stasiun kerja akhir dimanfaatkan secara maksimal oleh program komputasi untuk mendulang volume output tanpa memicu risiko kelebihan beban kerja kapasitas lini produksi.

Temuan utama (*the major findings*) dari analisis *service level* ini menegaskan adanya fenomena pertukaran keputusan yang sehat antara pengorbanan tingkat pelayanan dengan efisiensi total biaya operasional perusahaan. Meskipun kebijakan jadwal usulan ini menurunkan tingkat pelayanan dari kesempurnaan semu 100% menjadi konvergen di kisaran 88% hingga 89%, keputusan ini justru menyelamatkan profitabilitas perusahaan. Dengan mengeluarkan total biaya operasional usulan yang jauh lebih murah yaitu sebesar Rp2.160.070.000,00 dibandingkan biaya awal yang membengkak hingga Rp2.483.834.200,00, perusahaan berhasil menghemat anggaran persediaan secara masif. Pencapaian angka ini memberikan jaminan logis bahwa perusahaan kini memiliki perencanaan kebutuhan material yang jauh lebih kuat, kokoh, dan kompetitif, sekaligus meminimalkan friksi finansial akibat pemborosan *holding cost* yang selama ini menjadi pelemah profitabilitas eksekutif rantai produksi.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian kegiatan pengumpulan data, pemodelan matematika, serta analisis kritis yang telah dilakukan dalam penelitian ini, kesimpulan yang dapat ditarik adalah sebagai berikut:

1. Sistem MRP usulan berhasil dimodelkan secara komprehensif bagi perusahaan manufaktur elektronik dengan mengintegrasikan karakteristik permintaan gabungan MTS dan MTO. Mekanisme pemodelan ini dijawab melalui tiga tahapan teknis utama: (1) menstrukturkan lembar kerja tabel MRP dinamis sepanjang delapan periode horizon perencanaan; (2) mengaitkan hubungan ketergantungan kebutuhan komponen hulu menggunakan koefisien struktur BOM; serta (3) mengonversikan volume rencana produksi menjadi beban kerja waktu standar (*standard processing time*) pada lima stasiun kerja perakitan aktual. Proses optimasi model ini diselesaikan menggunakan perangkat Excel Solver dengan *Evolutionary Algorithm*, yang dikonfigurasi menggunakan parameter model nyata di dalam sistem, yaitu: meminimalkan fungsi tujuan total biaya operasional (*Total Cost*), menentukan baris PORec sebagai variabel keputusan *integer*, serta mengunci batas toleransi *Service Level* minimal sebesar 88% sebagai batasan wajib (*constraint*). Melalui pendekatan ini, Excel Solver dengan algoritma evolusioner mampu mengintervensi model untuk mengisi baris keputusan PORec secara otomatis tanpa melanggar batasan kapasitas fisik rantai produksi.
2. Kuantitas produksi komponen yang optimal untuk memenuhi target permintaan gabungan dengan batas toleransi *demand* tertolak maksimal dua belas persen berhasil diidentifikasi secara spesifik untuk setiap varian produk di setiap periode. Hasil optimasi menunjukkan keputusan volume pengerjaan total sepanjang delapan minggu sebesar 750 unit untuk produk SWMN (dengan volume puncak 145 unit pada periode kedua), 359 unit untuk produk IVM (dengan volume puncak 93 unit pada periode ketiga), dan 924 unit untuk produk CCTL (dengan volume puncak 147 unit pada periode keenam). Distribusi volume yang fluktuatif namun taktis ini terbukti

efektif menjaga jumlah kehilangan penjualan (*lost sales*) dan pesanan tertunda (*backorder*) tetap berada di bawah ambang batas toleransi manajemen.

3. Evaluasi kinerja sistem MRP usulan hasil optimasi membuktikan performa yang sangat andal dan superior, baik dari aspek operasional maupun finansial.
 - Dari aspek finansial, terjadi pertukaran biaya (*cost trade-off*) yang rasional, di mana MRP usulan berhasil memangkas pengeluaran total operasional produksi secara signifikan menjadi Rp2.160.070.000,00, lebih hemat dibandingkan kebijakan awal (produksi dengan cara rata-rata konstan) yang membengkak hingga Rp2.483.834.200,00 akibat pemborosan pada biaya simpan gudang (*holding cost*).
 - Dari aspek kapasitas, model berhasil menyeimbangkan beban kerja aktual (*load*) di rantai produksi sehingga seluruh stasiun kerja berada aman di bawah kapasitas maksimal reguler mingguan tanpa memicu fenomena *bottleneck* maupun kebutuhan upah kerja lembur.
 - Dari aspek pelayanan, sistem usulan berhasil mengarahkan operasional perusahaan pada titik keseimbangan baru yang ekonomis. Dengan menurunkan tingkat pelayanan dari kesempurnaan semu 100% menjadi konvergen di atas ambang batas toleransi minimal 88%, perusahaan berhasil mengamankan pencapaian tingkat pelayanan riil sebesar 88,4% untuk produk SWMN, 88,2% untuk produk IVM, dan 89,0% untuk produk CCTL.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis, pengujian model, serta evaluasi terhadap keterbatasan sistem yang dikembangkan, penulis merumuskan beberapa saran strategis untuk implementasi praktis maupun pengembangan penelitian selanjutnya di masa depan:

1. Penelitian ini masih dilakukan menggunakan data historis permintaan dan kapasitas yang bersifat statis (*offline data*). Untuk implementasi praktis di masa mendatang, disarankan agar model perencanaan MRP gabungan berbasis algoritma evolusioner ini diintegrasikan secara langsung (*API-based integration*) dengan sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) atau *Manufacturing Execution System* (MES) yang ada di perusahaan. Hal ini memungkinkan sistem untuk langsung menangkap perubahan

data pesanan konsumen (*MTO demand stream*) secara *real-time* dan melakukan kalkulasi ulang jadwal secara dinamis ketika terjadi perubahan prioritas di pasar.

2. Mengingat algoritma pemrograman matematis dalam penelitian ini mengasumsi bahwa parameter kapasitas stasiun kerja bersifat konstan di setiap periode, kondisi riil rantai produksi sering kali dihadapkan pada ketidakpastian. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk memperluas model dengan memasukkan variabel kendala kapasitas yang dinamis dan bersifat acak (*stochastic*). Penambahan faktor risiko seperti waktu kerusakan mesin tiba-tiba (*machine breakdown*), fluktuasi efisiensi operator, atau keterlambatan pasokan material hulu akan membuat model penjadwalan usulan menjadi jauh lebih tangguh (*robust*) di lapangan.
3. Model usulan saat ini menerapkan ambang batas target *service level* minimal yang disamaratakan secara kaku sebesar 88% untuk seluruh varian produk. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk menerapkan fungsi batasan yang lebih fleksibel melalui pembobotan prioritas konsumen atau segmentasi pasar (*multi-threshold service level*). Melalui pendekatan tersebut, model matematika dapat membedakan target pelayanan yang lebih absolut (mendekati 100%) untuk karakteristik produk pesanan khusus (*Make to Order*) demi menjaga loyalitas pelanggan kritis, dan menetapkan target yang lebih longgar serta ekonomis untuk produk persediaan massal (*Make to Stock*).
4. Fungsi tujuan dari model matematika yang dibangun saat ini berfokus tunggal pada minimasi total biaya operasional (*single-objective optimization*). Akurasi dan relevansi keputusan strategis perusahaan dapat ditingkatkan pada penelitian berikutnya dengan menerapkan fungsi tujuan multi-objektif. Melalui pendekatan tersebut, algoritma tidak hanya meminimalkan pengeluaran finansial, tetapi juga dapat secara bersamaan memaksimalkan tingkat utilisasi mesin secara merata, atau meminimalkan waktu penyelesaian total (*makespan*) dari seluruh pesanan yang masuk ke rantai produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdellahi, L. S. A., Zoubeir, Z., Mohamed, Y., Haouba, A., & Hmetty, S. (2025). Deep Reinforcement Learning for Optimal Replenishment in Stochastic Assembly Systems. *Mathematics*, 13(14), Article 2229. <https://doi.org/10.3390/math13142229>
- Afrida Noor, R., Akbar, A., & Gunawan, F. E. (2022). Pemodelan Dinamika Sistem untuk Sistem Produksi dan Inventori dalam Remanufakturing Proses Studi Kasus: Perusahaan Kimia di Indonesia. *INFORMATION SYSTEM FOR EDUCATORS AND PROFESSIONALS*, 6(2), 187–198.
- Alnahhal, M., Ahrens, D., & Salah, B. (2021). Dynamic lead-time forecasting using machine learning in a make-to-order supply chain. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21), Article 10105. <https://doi.org/10.3390/app112110105>
- Beemsterboer, B., Land, M., & Teunter, R. (2016). Hybrid MTO-MTS Production Planning: An Explorative Study. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.037>
- Ben-Ammar, O., Bettayeb, B., & Dolgui, A. (2019). Optimization of multi-period supply planning under stochastic lead times and a dynamic demand. *International Journal of Production Economics*, 218, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.003>
- Ben-Ammar, O., Bettayeb, B., & Dolgui, A. (2021). Optimization of multi-period supply planning under stochastic lead times and a dynamic demand. *International Journal of Production Economics*, 218, 135–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.003>
- Chen, W. (2025). The decision-making problems in enterprise production are studied based on a Monte Carlo simulation. *Proceedings of the 2025 International Symposium on Artificial Intelligence and Computational Social Sciences*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3776759.3776760>
- Damand, D., Lahrichi, Y., & Barth, M. (2022). Parameterisation of Demand-Driven Material Requirements Planning: A Multi-Objective Genetic Algorithm. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8114–8129. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2155745>
- Daroini, M. A., & Himawan, A. F. I. (2021). Analisis Pengendalian Persediaan Bahan Baku Songkok ZNR dengan Menggunakan Metode Material Requirement Planning (MRP). *Jurnal Mahasiswa Manajemen*, 2(02), 155. <https://doi.org/10.30587/mahasiswamanajemen.v2i02.3035>
- Dinçer, K. F., & Turgay, S. (2023). Balancing Demand and Supply: Inventory Allocation in FMCG. *Industrial Engineering and Innovation Management*, 6(10), 38–46. <https://doi.org/10.23977/ieim.2023.061006>
- Dwipurwani, O. (2025). Pengembangan Model Inventori Probabilistik untuk Analisis Persediaan Bahan-Bahan Kimia di Perusahaan Daerah Air Minum. [Disertasi/Tesis, Universitas Sriwijaya]. Repository Universitas Sriwijaya.
- Fleuren, T., Merzifonluoglu, Y., Sotirov, R., & Hendriks, M. (2025a). Production–inventory planning in high-tech low-volume manufacturing supply chains. *International Journal of Production Economics*, 288, Article 109687. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109687>
- Fleuren, T., Merzifonluoglu, Y., Sotirov, R., & Hendriks, M. (2025b). Production–inventory planning in high-tech low-volume manufacturing supply chains.

- International Journal of Production Economics*, 288, Article 109687. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109687>
- Gobachew, A. M., & Haasis, H. D. (2023). Scenario-Based Optimization of Supply Chain Performance under Demand Uncertainty. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13), Article 10603. <https://doi.org/10.3390/su151310603>
- Hasanati, N., Permatasari, E., Nurhasanah, N., & Hidayat, S. (2019). Implementation of Material Requirement Planning (MRP) on Raw Material Order Planning System for Garment Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528(1), Article 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/528/1/012064>
- Hevlie, W., Nazry, S., Riza, F., Rizky, F., Gultom, Z. A., Haris, M., Debora, M., & Barus, B. (2025). *Model Optimasi Rute Transportasi Berbasis Pemrograman Linear*. *Jurnal Sistem Informasi Triguna Dharma*, 4(1), 45-53. <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jsi>
- Huang, Z., Yang, M., & Zhao, W. (2025). Research On Enterprise Production Decision Based on Monte Carlo Simulation and Dynamic Programming Algorithm. In *Business, Economics and Management EAIS* (Vol. 2025), 112-120.
- Jenkins, A. (2025). *What Is a Bill of Materials (BOM)? The Complete Guide to BOMs*. Oracle Net Suite. Oracle NetSuite. <https://www.netsuite.com/portal/resource/articles/inventory-management/bill-of-materials-bom.shtml>
- Jevtics, D., Guilhabert, B., Hurtado, A., Dawson, M. D., & Strain, M. J. (2022). Deterministic integration of single nanowire devices with on-chip photonics and electronics. In *Progress in Quantum Electronics* (Vol. 85), Article 100394. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100394>
- Karimi, M., Khademi-Zare, H., Zare-Mehrjerdi, Y., & Bagher Fakhrzad, M. (2022). Optimizing Service Level, Price, and Inventory Decisions for a Supply Chain with Retailers' Competition and Cooperation Under VMI Strategy. *RAIRO - Operations Research*, 56(2), 1051–1078. <https://doi.org/10.1051/ro/2022039>
- Lahrichi, Y., Damand, D., & Barth, M. (2022). A first MILP model for the parameterization of Demand-Driven MRP. *Computer & Industrial Engineering*, 171, Article 108381. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108381>
- Lindahl, S. B., Babi, D. K., Gernaey, K. V., & Sin, G. (2023). Integrated Capacity and Production Planning in the Pharmaceutical Supply Chain: Framework and Models. *Computers and Chemical Engineering*, 171, Article 108163. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108163>
- Lisdiarto, M. R. (2022). *Peramalan Permintaan dan Simulasi dalam Implementasi Metode MRP terhadap Bahan Baku pada Menu Ice Coffee Latte di Cafe Casper and Luna* [Tugas Akhir, Universitas Muhammadiyah Malang]. Repository UMM
- Liu, Z., & Nishi, T. (2023). Surrogate-Assisted Evolutionary Optimization for Perishable Inventory Management in Multi-Echelon Distribution Systems. *Expert Systems with Applications*, 238 (Part C), Article 122179. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122179>
- Madi, F., Al-Bazi, A., Buckley, S., Smallbone, J., & Foster, K. (2024). An agent-based heuristics optimisation model for production scheduling of make-to-stock connector

- plates manufacturing systems. *Soft Computing*, 28(7–8), 5899–5919. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09506-w>
- Maulida, S., Putri, M., Nisa, H., Gusfi Ardiansyah, M., Saputra Fakultas Ekonomi dan Bisnis, E., Djuanda Jl Tol Jagorawi No, U., Ciawi, K., Bogor, K., & Barat, J. (2025). Keuntungan Optimal Produksi Es Krim Menggunakan Pemrograman Linier Metode Simpleks. In *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika* (Vol. 9, Number 2), 340–347.
- Nayeem, M. K., & Alam, S. T. (2022). A Scenario-Based Stochastic Programming Model for Multi-Commodity Distribution Considering Disruption in Distribution Network. *Results in Control and Optimization*, 8, Article 100167. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2022.100167>
- Nursyanti, Y., & Shalsabila, K. (2020). Optimasi Inventori Dengan Pendekatan Deterministik Dinamis Pada Industri Manufaktur Roti. *OPSI*, 13(2), 76–85. <https://doi.org/10.31315/opsi.v13i2.3517>
- Pereira, D. F., Oliviera, J. F., & Carravilla, M. A. (2022). Merging make-to-stock/make-to-order decisions into sales and operations planning: A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, 245, Article 108392. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108392>.
- Puspitasari, E. (2024). *Aplikasi Metode Mixed Integer Linear Programming (MILP) dalam Heterogeneous Fleet Capacited Vehicle Routing Problem (HFCVRP) (Studi Kasus UMKM Bakpia Pathok Terbit)* [Skripsi, Universitas Negeri Yogyakarta]. Digital Repository UNY.
- Putri, A. E., Larasati, A., & Darmawan, V. E. B. (2024). Pengendalian Persediaan Kemasan Botol Air Minum Dalam Kemasan Menggunakan Simulasi Monte Carlo dan EOQ Probabilistik. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, 23(2), 107–114. <https://doi.org/10.20961/performa.23.2.84602>
- Qoblex. (2025). *Guide to Understanding Make-to-Stock (MTS)*. Qoblex Inventory Management. <https://qoblex.com/blog/make-to-stock/>
- Refta, L. N., Kurnia, I., & Hadiwijaya, S. (2025). Optimasi Permintaan dengan Simulasi Monte Carlo serta Optimasi Persediaan New Baleno dengan Silver-Meal Heuristic di PT SEJAHTERA BUANA TRADA. *Jurnal Industrikrisna*, 14(2), 107–118.
- Safitri, D., Dahdah, S., & Andesta, D. (2021). Penerapan Metode Monte Carlo pada Jumlah Produksi Pestisida (Studi Kasus: PT. Petrokimia Kayaku Plant Cair 1). *JUSTI (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, 2(1), 88–95.
- Sato, Y., Maeda, H., Toshima, R., Nagasawa, K., Morikawa, K., & Takahashi, K. (2023). Switching decisions in a hybrid MTS/MTO production system comprising multiple machines considering setup. *International Journal of Production Economics*, 264, Article 108967.
- Schlenkrich, M., Seiringer, W., Altendorfer, K., & Parragh, S. N. (2024a). *Enhancing Rolling Horizon Production Planning Through Stochastic Optimization Evaluated by Means of Simulation*. *International Journal of Production Research*, 62(14), 5120–5138. <http://arxiv.org/abs/2402.14506>
- Seiringer, W., Altendorfer, K., Castaneda, J., Panadero, J., & Juan, A. A. (2021). Applying Simheuristics for Safety Stock and Planned Lead Time Optimization in a

- Rolling Horizon MRP System under Uncertainty. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2021-December*. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715294>
- Selvi, R. P., Sivasankari, B., & Vasanthi, R. (2020). Optimization Using MS-Excel Solver. *INFORMS Transactions on Education*, 2(2), 40–46. <https://doi.org/10.1287/ited.2.2.40>
- Slama, I., Ben-Ammar, O., Dolgui, A., & Masmoudi, F. (2021). Genetic Slgorithm and Monte Carlo Simulation for a Stochastic Capacitated Disassembly Lot-Sizing Problem Under Random Lead Times. *Computers & Industrial Engineering*, 161, Article 107468. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107468>
- Subekti, & Nursyanti, Y. (2023). Optimasi Persediaan Dengan Pendekatan Deterministik Dinamis Pada Industri Manufaktur. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, 2(2), 98-105.
- Sunarni, T., Jauhari, W. A., Laksono, P. W., & Kurdhi, N. (2025). *Integrated Lot Sizing and Scheduling Model with Hybrid Production Lines, Reworking and Energy Consumption*. *International Journal of Production Research*, 63(2), 412-430.
- Thevenin, S., Adulyasak, Y., & Cordeau, J. F. (2021). Material Requirements Planning Under Demand Uncertainty Using Stochastic Optimization. *Production and Operations Management*, 30(2), 475–493. <https://doi.org/10.1111/poms.13277>
- Upadhyay, S., Garg, S. K., & Sharma, R. (2023). Analyzing the Factors for Implementing Make-to-Order Manufacturing System. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13), Article 10312. <https://doi.org/10.3390/su151310312>
- Uyun, S. Z., Indrayanto, A., & Kurniasih, R. (2020). *Analisis Pengendalian Persediaan Bahan Baku dengan Menggunakan Metode Material Requirement Planning (MRP)*. *Jurnal Ekonomi dan Teknik Industri*, 8(1), 22-31.
- Veza, O., Illya Badri, R., & kunci-Monte Carlo, K. (2021). Simulasi Pengendalian Produksi Pupuk Menggunakan Metode Monte Carlo. *Engineering And Technology International Journal Juli*, 3(2), 2714–2755. <https://doi.org/10.55642/eatij.v3i02>
- Wood, L. (2024, August). *Automotive Electronics Control Unit Management (ECU/ECM) Strategic Industry Report 202: Market to Reach \$126.4 Billion by 2030 - Feature Rich Smart Cars Spur the Need for ECUs*. Research and Markets.
- Younespour, M., Esmaelian, M., & Kianfar, K. (2024). Optimizing the Strategic and Operational Levels of Demand-Driven MRP Using a Hybrid GA-PSO Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 193, Article 110306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110306>
- Zhagi, A., Agustina, F., Bambang, D., & Priatna, A. (2021). *Perencanaan Produksi dan Pengendalian pada Kombinasi Metode MRP dan MILP*. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 14(1), 35-42. <https://ejournal.upi.edu/index.php/JEM>

LAMPIRAN
A – TABEL MRP USULAN

Product	P1	Hr/# in WS 4		0,25	Hr/# in WS 5		0,18		
	Dec-25	Jan-26				Feb-26			
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		60	70	65	75	80	85	90	95
MTO Demand		25	27	24	29	27	32	30	34
Total		85	97	89	104	107	117	120	129
Scheduled Receipt		48	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	40	70	118	60	0	0	13	0	0
Net Requirements		0	27	0	44	107	117	107	129
Planned Order Received		67	145	31	39	59	130	105	86
Planned Order Release	67	145	31	39	59	130	105	86	
Lost Sales		0	0	0	0	0	0	0	0
Backorder		0	0	0	5	48	0	2	43

Product	P2	Hr/# in WS 4		0,3	Hr/# in WS 5		0,22		
	Dec-25	Jan-26				Feb-26			
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		25	30	28	32	35	38	40	45

Product	P2	Hr/# in WS 4		0,3	Hr/# in WS 5		0,22		
	Dec-25	Jan-26				Feb-26			
MTO Demand		14	16	14	17	16	19	17	21
Total		39	46	42	49	51	57	57	66
Scheduled Receipt		26							
Projected Available Balance	15	19	1	52	58	21	0	0	0
Net Requirements		0	27	41	0	0	36	57	66
Planned Order Received		17	28	93	55	14	26	37	48
Planned Order Release	17	28	93	55	14	26	37	48	
Lost Sales		0	0	0	0	0	0	0	0
Backorder		0	0	0	0	0	10	20	18

Product	P3	Hr/# in WS 4		0,22	Hr/# in WS 5		0,16		
	Dec-25	Jan-26				Feb-26			
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	5	6	7	8
MTS Demand		80	90	85	95	100	105	110	120
MTO Demand		20	31	29	33	31	35	34	40
Total		100	121	114	128	131	140	144	160
Scheduled Receipt		57							
Projected Available Balance	55	100	18	4	0	7	14	0	0
Net Requirements		0	21	96	124	131	133	130	160
Planned Order Received		88	39	100	118	138	147	63	119

Planned Order Release	88	39	100	118	138	147	63	119	
Lost Sales		0	0	0	0	0	0	0	0
Backorder		0	0	0	6	0	0	67	41

Product	A1	Hr/# in WS 1		0,35					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		67	145	31	39	59	130	105	86
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	30	0	0	58	123	171	158	173	216
Net Requirements		37	145	31	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	54	89	104	107	117	120	129
Planned Order Release	0	54	89	104	107	117	120	129	

Product	A2	Hr/# in WS 3		0,2					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		67	145	31	39	59	130	105	86
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	25	0	0	58	123	171	158	173	216

Net Requirements		42	145	31	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	54	89	104	107	117	120	129
Planned Order Release	0	54	89	104	107	117	120	129	

Product	A3	Hr/# in WS 3		0,2					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		67	145	31	39	59	130	105	86
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	40	0	0	58	123	171	158	173	216
Net Requirements		27	145	31	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	54	89	104	107	117	120	129
Planned Order Release	0	54	89	104	107	117	120	129	

Product	B1	Hr/# in WS 1		0,45					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		17	28	93	55	14	26	37	48
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	10	0	0	0	0	37	68	88	106

Net Requirements		7	28	93	55	14	0	0	0
Planned Order Received		0	4	42	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	4	42	49	51	57	57	66	

Product	B2	Hr/# in WS 3		0,25					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		17	28	93	55	14	26	37	48
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	12	0	0	0	0	37	68	88	106
Net Requirements		5	28	93	55	14	0	0	0
Planned Order Received		0	4	42	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	4	42	49	51	57	57	66	

Product	B3	Hr/# in WS 2		0,07					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		17	28	93	55	14	26	37	48
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	18	1	0	0	0	37	68	88	106
Net Requirements		0	27	93	55	14	0	0	0
Planned Order Received		0	4	42	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	4	42	49	51	57	57	66	

Product	C1	Hr/# in WS 1		0,3					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		88	39	100	118	138	147	63	119
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	45	0	70	84	94	87	80	161	202
Net Requirements		43	39	30	34	44	60	0	0
Planned Order Received		0	109	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	109	114	128	131	140	144	160	

Product	C2	Hr/# in WS 3		0,15					
	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		88	39	100	118	138	147	63	119
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	35	0	70	84	94	87	80	161	202
Net Requirements		53	39	30	34	44	60	0	0
Planned Order Received		0	109	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	109	114	128	131	140	144	160	

Product	C3	Hr/# in WS 2		0,04					
---------	----	--------------	--	------	--	--	--	--	--

	Dec-25		Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Gross Requirement		88	39	100	118	138	147	63	119
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	60	0	70	84	94	87	80	161	202
Net Requirements		28	39	30	34	44	60	0	0
Planned Order Received		0	109	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	109	114	128	131	140	144	160	

Product	X1	Buy								
	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	167	245	281	289	314	321	355
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		180	180	140	140	140	140	140	140	140
Net Requirements			0	0	105	141	149	174	181	215
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Product	X2	Buy										
	Nov-25		Dec-25			Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement					0	167	245	281	289	314	321	355

Product	X2	Buy										
	Nov-25		Dec-25		Jan-26				Feb-26			
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			120	120	80	80	80	80	80	80	80	80
Net Requirements				0	47	165	201	209	234	241	275	275
Planned Order Received				0	127	245	281	289	314	321	355	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355				

Product	X3	Buy										
	Nov-25	Dec-25				Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	2
Gross Requirement				0	54	89	104	107	117	120	129	129
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			80	80	40	40	40	40	40	40	40	40
Net Requirements				0	0	49	64	67	77	80	89	89
Planned Order Received				0	14	89	104	107	117	120	129	129
Planned Order Release	0	14	89	104	107	117	120	129				

Product	X4	Buy										
	Nov-25		Dec-25		Jan-26				Feb-26			
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
Gross Requirement					0	4	42	49	51	57	57	66
Scheduled Receipt					0	0	0	0	0	0	0	0

Product	X4	Buy											
	Nov-25			Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Projected Available Balance					40	40	36	0	0	0	0	0	0
Net Requirements						0	0	6	49	51	57	57	66
Planned Order Received						0	0	6	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	0	6	49	51	57	57	66					

Product	X5	Buy										
	Nov-25			Dec-25			Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement					0	4	42	49	51	57	57	66
Scheduled Receipt					0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance				50	50	46	10	10	10	10	10	10
Net Requirements					0	0	0	39	41	47	47	56
Planned Order Received					0	0	6	49	51	57	57	66
Planned Order Release	0	0	6	49	51	57	57	66				

Product	X6	Buy									
	Nov-25	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement				0	109	114	128	131	140	144	160
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			130	130	90	90	90	90	90	90	90

Product	X6	Buy									
	Nov-25	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Net Requirements				0	0	24	38	41	50	54	70
Planned Order Received				0	69	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	69	114	128	131	140	144	160			

Product	X7	Buy											
	Nov-25		Dec-25				Jan-26				Feb-26		
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement						0	54	89	104	107	117	120	129
Scheduled Receipt						0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance					35	35	0	0	0	0	0	0	0
Net Requirements						0	19	89	104	107	117	120	129
Planned Order Received						0	14	89	104	107	117	120	129
Planned Order Release	0	14	89	104	107	117	120	129					

Product	X8	Buy									
	Nov-25	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement				0	167	245	281	289	314	321	355
Scheduled Receipt				0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance			160	160	120	120	120	120	120	120	120
Net Requirements				0	7	125	161	169	194	201	235

Planned Order Received				0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355			

Product	X9	Buy								
	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	167	245	281	289	314	321	355
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		200	200	160	160	160	160	160	160	160
Net Requirements			0	0	85	121	129	154	161	195
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Product	X10	Buy								
	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	167	245	281	289	314	321	355
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		250	250	210	210	210	210	210	210	210
Net Requirements			0	0	35	71	79	104	111	145
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Product	X11	Buy								
	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement			0	334	490	562	578	628	642	710
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		300	300	260	260	259	259	259	259	259
Net Requirements			0	34	230	302	319	369	383	451
Planned Order Received			0	294	490	561	578	628	642	710
Planned Order Release	0	294	490	561	578	628	642	710		

Product	X12	Hr/# in WS 2		0,1					
	Dec-25			Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement		0	112	220	257	265	291	297	324
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	90	318	295	175	13	0	0	0	0
Net Requirements		0	0	0	82	252	291	297	324
Planned Order Received		228	89	100	95	162	181	162	192
Planned Order Release	228	89	100	95	162	181	162	192	

Product	X13	Buy								
	Dec-25				Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2

Gross Requirement			0	167	245	281	289	314	321	355
Scheduled Receipt			0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance		220	220	180	180	180	180	180	180	180
Net Requirements			0	0	65	101	109	134	141	175
Planned Order Received			0	127	245	281	289	314	321	355
Planned Order Release	0	0	65	101	109	134	141	175		

Product	X14	Buy								
		Dec-25			Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
Gross Requirement		0	167	245	281	289	314	321	355	
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0	
Projected Available Balance	260	260	220	220	220	220	220	220	220	
Net Requirements		0	0	25	61	69	94	101	135	
Planned Order Received		0	127	245	281	289	314	321	355	
Planned Order Release	0	127	245	281	289	314	321	355		

Product	X15	Buy								
		Dec-25			Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
Gross Requirement		0	109	114	128	131	140	144	160	
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0	
Projected Available Balance	200	200	160	160	160	160	160	160	160	

Net Requirements		0	0	0	0	0	0	0	0
Planned Order Received		0	69	114	128	131	140	144	160
Planned Order Release	0	69	114	128	131	140	144	160	

Product	X16	Buy							
		Dec-25		Jan-26				Feb-26	
Period (Overdue)	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Gross Requirement		0	8	84	98	102	114	114	132
Scheduled Receipt		0	0	0	0	0	0	0	0
Projected Available Balance	100	100	92	60	60	60	60	60	60
Net Requirements		0	0	0	38	42	54	54	72
Planned Order Received		0	0	52	98	102	114	114	132
Planned Order Release	0	0	52	98	102	114	114	132	

B – TABEL BEBAN STASIUN KERJA

Workstation	1							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
A1	0	18,9	31,15	36,4	37,45	40,95	42	45,15
B1	0	1,8	18,9	22,05	22,95	25,65	25,65	29,7
C1	0	32,7	34,2	38,4	39,3	42	43,2	48
Load	0	53,4	84,25	96,85	99,7	108,6	110,85	122,85

Workstation	2							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
X12	22,8	8,9	10	9,5	16,2	18,1	16,2	19,2
A3	0	10,8	17,8	20,8	21,4	23,4	24	25,8
B3	0	0,28	2,94	3,43	3,57	3,99	3,99	4,62
C3	0	4,36	4,56	5,12	5,24	5,6	5,76	6,4
Load	0	15,44	25,3	29,35	30,21	32,99	33,75	36,82

Workstation	3							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
A2	0	10,8	17,8	20,8	21,4	23,4	24	25,8
B2	0	1	10,5	12,25	12,75	14,25	14,25	16,5
C2	0	16,35	17,1	19,2	19,65	21	21,6	24

Load	0	28,15	45,4	52,25	53,8	58,65	59,85	66,3
-------------	---	-------	------	-------	------	-------	-------	------

Capacity								
Workstation	4							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	16,75	36,25	7,75	9,75	14,75	32,5	26,25	21,5
P2	5,1	8,4	27,9	16,5	4,2	7,8	11,1	14,4
P3	19,36	8,58	22	25,96	30,36	32,34	13,86	26,18
Load	41,21	53,23	57,65	52,21	49,31	72,64	51,21	62,08

Workstation	5							
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	12,06	26,1	5,58	7,02	10,62	23,4	18,9	15,48
P2	3,74	6,16	20,46	12,1	3,08	5,72	8,14	10,56
P3	14,08	6,24	16	18,88	22,08	23,52	10,08	19,04
Load	29,88	38,5	42,04	38	35,78	52,64	37,12	45,08

C – TABEL *TOTAL COST*

Costs								
Period	1	2	3	4	5	6	7	8
P1	Rp 77.050.000,00	Rp 166.750.000,00	Rp 35.650.000,00	Rp 44.850.000,00	Rp 67.850.000,00	Rp 149.500.000,00	Rp 120.750.000,00	Rp 98.900.000,00
P2	Rp 37.400.000,00	Rp 61.600.000,00	Rp 204.600.000,00	Rp 121.000.000,00	Rp 30.800.000,00	Rp 57.200.000,00	Rp 81.400.000,00	Rp 105.600.000,00
P3	Rp 74.800.000,00	Rp 33.150.000,00	Rp 85.000.000,00	Rp 100.300.000,00	Rp 117.300.000,00	Rp 124.950.000,00	Rp 53.550.000,00	Rp 101.150.000,00
Backorder Cost	Rp -	Rp -	Rp -	Rp 379.500	Rp 1.656.000	Rp 345.000	Rp 3.070.500	Rp 3.519.000
Lost Sales Cost	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -	Rp -
							Total Cost	Rp 2.160.070.000,00