



Pengembangan Model Optimasi untuk Meminimalkan Total Biaya Persediaan pada Gudang Bahan Baku Daur Ulang Plastik dengan Metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP)

Julio Febrian

1906354702

Dosen Pembimbing :
Inaki Maulida Hakim, S.T., M.T.

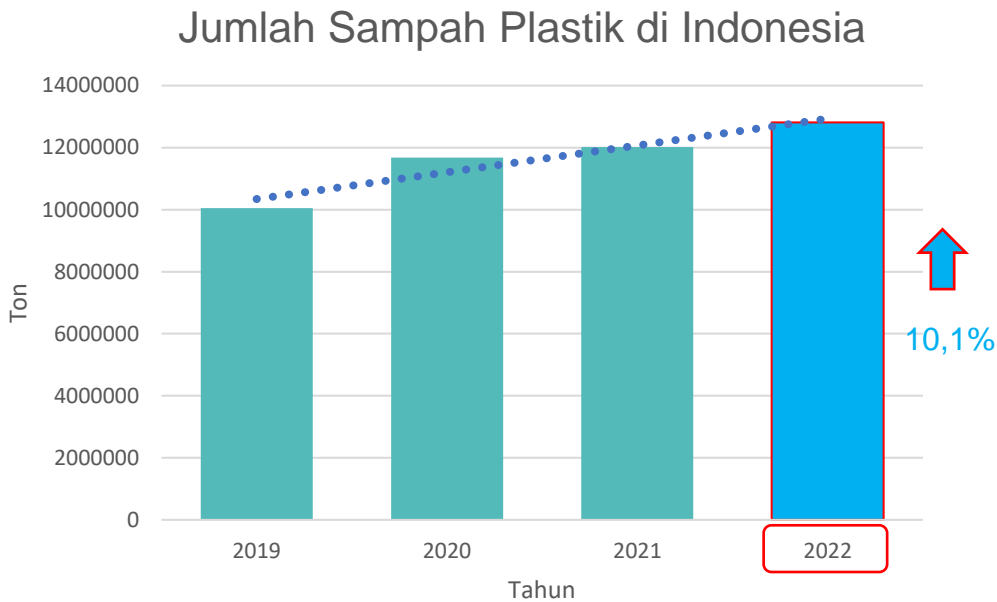


OUTLINE

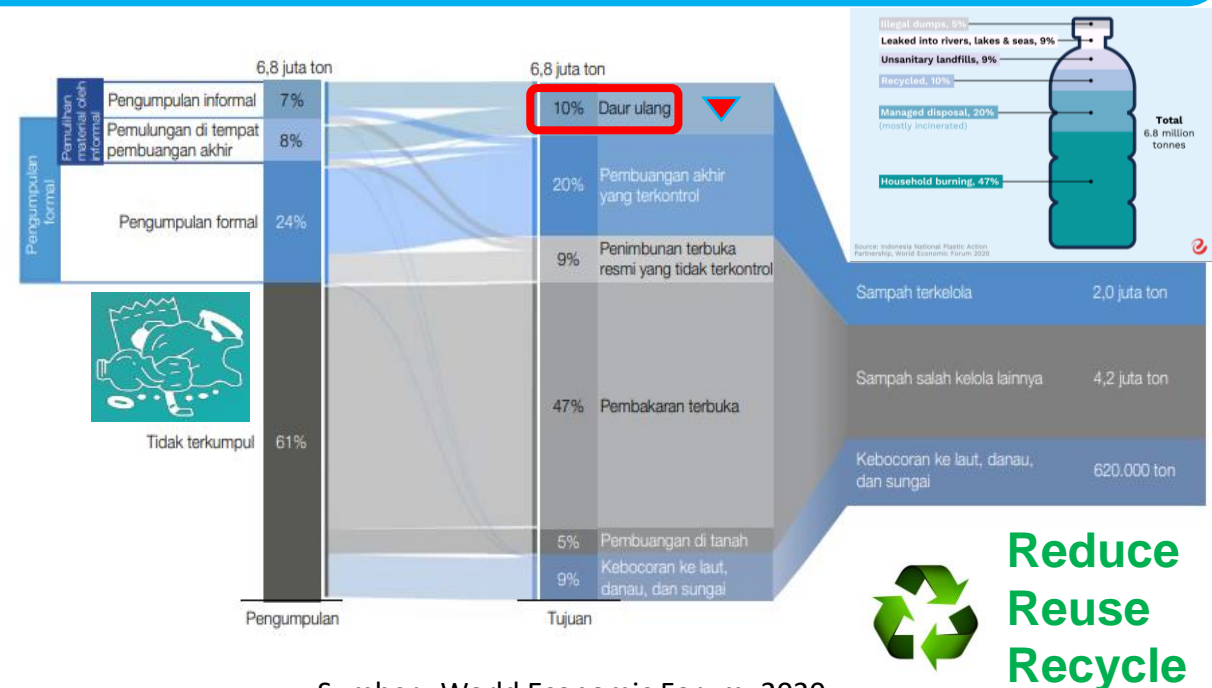


Kondisi umum mengenai daur ulang plastik

Rata-rata peningkatan produksi plastik secara global sebesar **5,8** juta ton/tahun dimana setiap tahun sejumlah **300** juta ton plastik diproduksi dengan **14** juta ton berakhir di laut (IUCN, 2021), Indonesia merupakan negara dengan sampah plastik terbanyak kedua dimana **0,48 – 1,29** juta ton per tahun mencemari lautan (Jambeck et al., 2015)



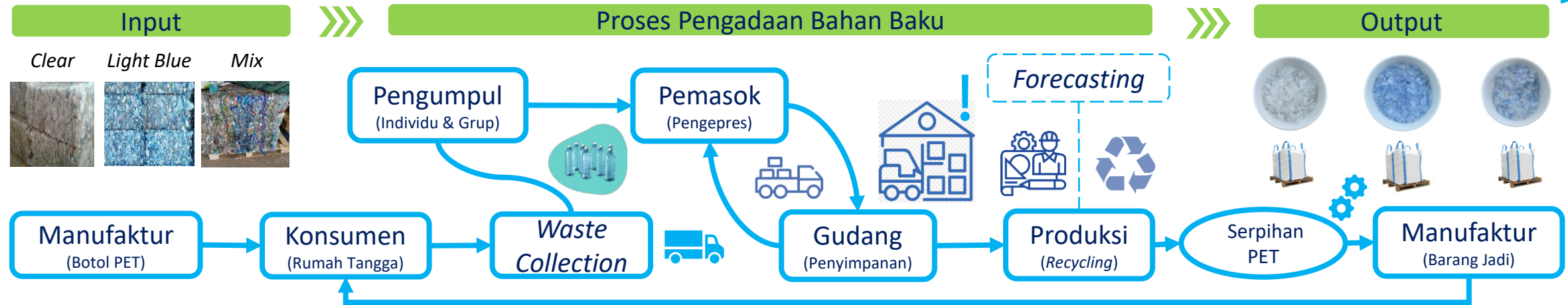
Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022



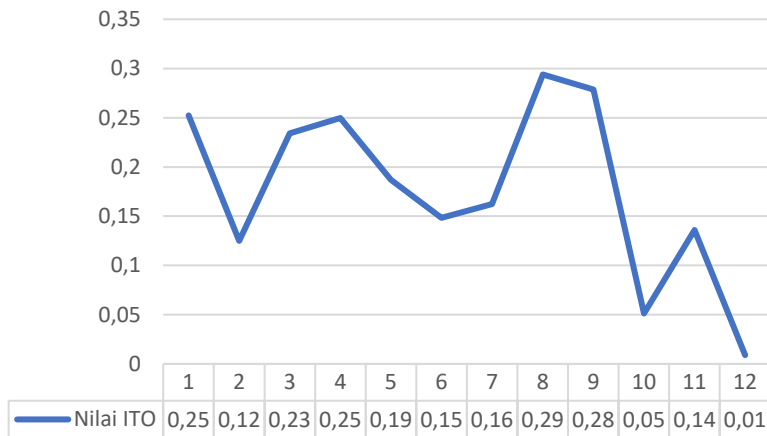
Sumber : World Economic Forum, 2020

Tingkat daur ulang sampah plastik di Indonesia sebesar **10%** masih tergolong rendah, Indonesia perlu meningkatkan kapasitas daur ulang hingga **4x** lipat (World Bank, 2021), berbagai program & kebijakan pemerintah mendorong pertumbuhan industri pengelolaan sampah (Kementerian Perindustrian, 2022)

Input-proses-output dan permasalahan

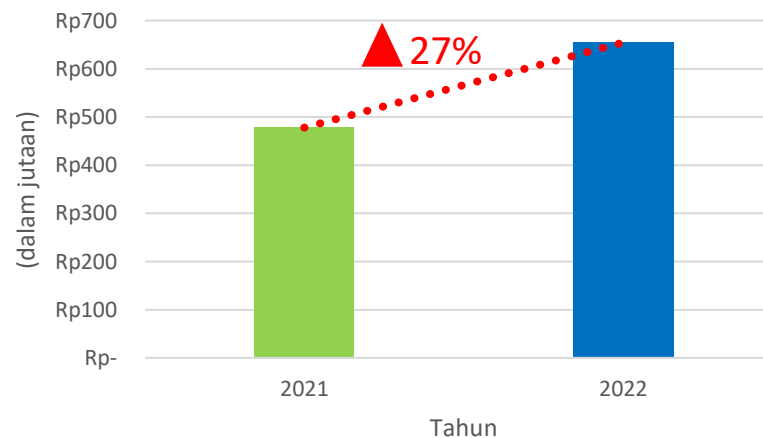


Akumulasi Nilai *Inventory Turnover* Tahun 2022



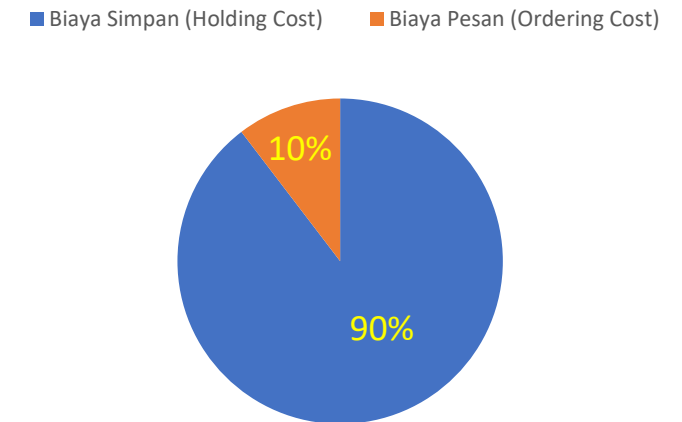
Nilai ITO Rendah

Peningkatan Biaya Persediaan



Biaya Persediaan Tinggi

Proporsi Biaya



Penumpukan Material

Teori-teori persediaan, manajemen persediaan, dan *mixed integer linear programming*

Persediaan

- Sumber daya yang digunakan perusahaan untuk melakukan kegiatan operasional dalam rangka memenuhi permintaan, salah satunya adalah persediaan bahan baku (*raw materials*) (Jacobs & Chase, 2014)

Keputusan investasi yang penting
(Johns & Harding, 2001)

Dapat dioptimalkan dengan manajemen persediaan yang baik
(Pinedo, 2005)

Manajemen Persediaan

- Menentukan kapan waktu dan berapa jumlah pesanan yang tepat harus dilakukan terutama dalam hal ini menyangkut perencanaan dan penjadwalan bahan baku (Jacobs & Chase, 2014)

Inventory Planning

Lot-sizing Problem

Inventory turnover & Biaya Persediaan

- Keputusan kuantitas dan waktu pesan yang efisien dapat menghasilkan biaya persediaan minimum (Kusuma & Hakim, 2020)
- Masalah optimasi persediaan kapan dan berapa banyak yang dipesan pada setiap periode dengan biaya minimum (Fiorotto et al., 2016)
- Parameter yang mengukur kinerja efisiensi dan efektivitas manajemen persediaan (Heizer & Render, 2014)

Mixed Integer Linear Programming

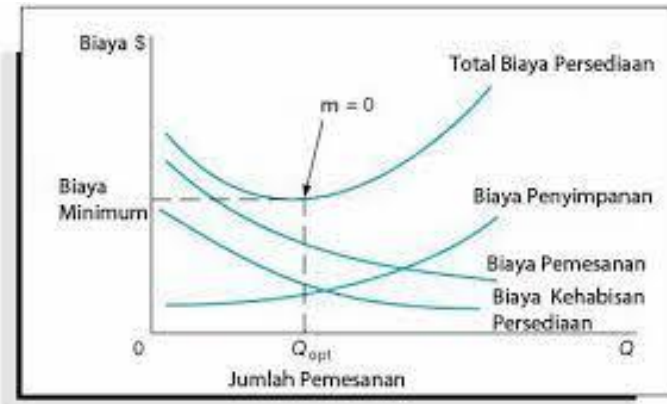
- Metode untuk mencapai hasil terbaik seperti keuntungan maksimum atau biaya minimum dalam model matematika dengan sifat hubungan linear (Jünger et al., 2010)
- Penyelesaian masalah penelitian operasi dimana pemrograman sebuah model yang dibuat memberikan sebagian output variabel bernilai integer (Taha, 2007)
- Program optimasi yang melibatkan variable-variabel integer dan kontinu (Pochet, 2005)

Kelebihan: fleksibel, realistis, *scalable*
(Atabay, 2018)




Kekurangan: waktu kalkulasi, *single-objective*
(Atabay, 2018)

Teori-teori biaya persediaan, peramalan permintaan (*demand forecasting*), dan persediaan pengaman (*safety stock*)

Biaya Persediaan



Sumber: Taha, 2007

-  **python** ➤ Bahasa pemrograman tingkat tinggi yang populer & mudah digunakan (McKinney, 2013)
-  **spyder** ➤ Aplikasi pengembangan program ilmiah *python*
-  **GUROBI OPTIMIZATION** ➤ *Solver* optimasi matematis terintegrasi

Demand Forecasting

- Prediksi dari proyeksi permintaan untuk produk atau layanan suatu perusahaan (Heizer & Render, 2014)
- Bagaimana mengestimasi siklus fluktuasi permintaan (Mohammadi & Shekarian, 2017)
- Terdapat berbagai macam metode dalam meramalkan permintaan antara lain *trend analysis*, *regression analysis*, *exponential smoothing*, *moving average*, *ARIMA* (Chopra & Mendl, 2016)
- Akurasi dari peramalan dapat diukur dengan *Mean Absolute Deviation* (MAD), *Mean Squared Deviation* (MSD), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) (Phakdeewongthep, 2021).

Safety Stock

- Mencegah disruption dalam manufaktur produk kepada pelanggan akibat ketidakpastian acak dari fluktuasi persediaan (Arnold et al., 2012)
- Nilai persediaan pengaman dapat dipengaruhi oleh beberapa factor antara lain *reorder point*, *service level*, *lead time*, dan variabilitas permintaan (Kusuma & Hakim, 2020)

$$Safety Stock = Z \times \sigma_{demand} \times \sqrt{Lead Time} \quad (\text{Waters, 2003})$$

Rumusan, tujuan, dan batasan penelitian

Rumusan Masalah



Manajemen persediaan dalam perencanaan dan penjadwalan kedatangan bahan baku kurang efektif & kurang efisien



Penggunaan metode yang kurang tepat membuat pengambilan keputusan kurang cepat dan akurat



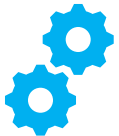
Kuantitas dan waktu pesan yang belum optimal menyebabkan kenaikan biaya pemesanan & biaya penyimpanan yang memicu peningkatan biaya persediaan bahan baku



Bagaimana model optimasi untuk meminimalkan total biaya bahan baku pada industri daur ulang plastik?



Tujuan



Mendapatkan model matematis untuk meminimalkan biaya bahan baku pada industri daur ulang plastik



Mendapatkan kuantitas pesan (Q) dan waktu pemesanan (Y) bahan baku pada industri daur ulang plastik

Batasan



Pada sebuah gudang bahan baku perusahaan daur ulang plastik di Kabupaten Tangerang

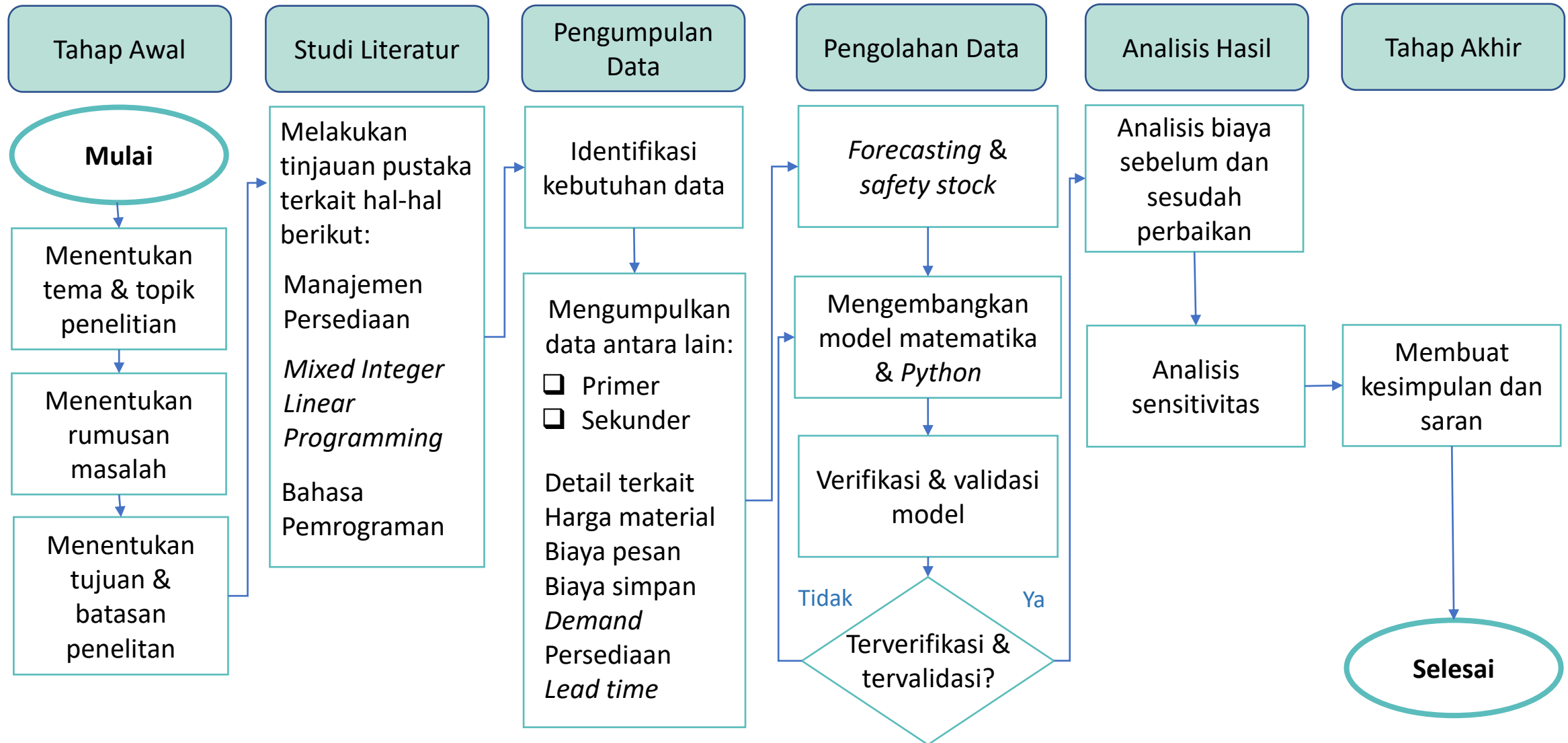


Data historis Januari sampai Desember 2022



Material yang diteliti adalah tiga bahan baku utama daur ulang (*Clear, Light Blue, dan Mix*)

Tahapan penelitian



Rangkuman data yang digunakan dalam mengembangkan model optimasi persediaan bahan baku

Data yang diambil terbagi menjadi data primer dan data sekunder:

- ✓ Data primer didapatkan melalui pengamatan dan wawancara langsung dengan penanggung jawab gudang dan pihak terkait
- ✓ Data sekunder didapatkan dari data historis perusahaan pada bulan Januari sampai dengan Desember tahun 2022

Data Sekunder

Permintaan Historis

Periode	Nama Bahan Baku		
	Clear (kg)	Light Blue (kg)	Mix (kg)
1	65838	40674	55097
...
52	76124	50891	63460

Harga

No.	Nama Bahan Baku	Harga Beli (Rp)
1	Clear	8.000
2	Light Blue	7.000
3	Mix	7.300

Lead Time

No.	Nama Bahan Baku	Lead Time (hari)
1	Clear	1, 2, 3
2	Light Blue	1, 2, 3
3	Mix	1, 2, 3

Biaya Pesan

No.	Komponen Biaya Pemesanan	Biaya Pesan (Rp)
1	Pengiriman truk	100.000
2	Administrasi	24.000
-	Total	124.000

Biaya Simpan

No.	Nama Bahan Baku	Komponen Biaya Penyimpanan	Biaya Simpan (Rp)
1	Clear	Operasional penyimpanan	84
		Faktor harga bahan baku	
2	Light Blue	Operasional penyimpanan	70
		Faktor harga bahan baku	
3	Mix	Operasional penyimpanan	77
		Faktor harga bahan baku	

Pengembangan model matematika

Batasan:

- 1) Periode perencanaan (*planning horizon*) diketahui, yaitu 1 periode = 1 minggu
- 2) Biaya pesan dan harga di semua periode dianggap tetap dan tidak tergantung pada jumlah pemesanan
- 3) Semua demand harus terpenuhi, tidak diperbolehkan adanya kekurangan persediaan (*shortage*)
- 4) Tiap bahan baku berasal dari pemasok-pemasok yang berbeda sehingga pemesanan terpisah

Sets:

- i : jenis bahan baku ($i = 1, 2, 3$)
 t : periode waktu ($t = 0, \dots, T$), $T = \text{planning horizon}$

Parameter:

- D_{it} = *forecasted demand* bahan baku i pada periode t
- o_i = *ordering cost* 1 kali pemesanan bahan baku i
- g_i = harga satuan bahan baku i
- h_i = *holding cost* 1 hari per unit kg bahan baku i
- l_i = *lead time* bahan baku i
- SS_{it} = *safety stock* bahan baku i pada periode t
- C_i = kapasitas gudang bahan baku i

Variabel Keputusan:

$Y_{it} = \{1, 0\}$ variabel biner menyatakan keputusan pesan

Keterangan:

1 = melakukan pemesanan i pada periode t

0 = tidak melakukan pemesanan i pada periode t

X_{it} = *level* persediaan bahan baku i pada periode t

Q_{it} = jumlah bahan baku i yang dipesan pada periode t

Fungsi Tujuan:

Meminimalkan total biaya persediaan bahan baku

Fungsi tujuan dan fungsi kendala (*constraint*) dalam pengembangan model matematika dan model *python*

Fungsi Tujuan: Meminimalkan Z (total biaya persediaan)

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^n o_i Y_{it} + \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^n h_i X_{it}$$

Ordering Cost + Holding Cost

```
# Fungsi Tujuan: Meminimalkan Total Biaya Persediaan
model_1.setObjective(gp.quicksum(o_1[t] * Y_1[t] + h_1[t] * X_1[t]
                                for t in periode_1), GRB.MINIMIZE)
model_2.setObjective(gp.quicksum(o_2[t] * Y_2[t] + h_2[t] * X_2[t]
                                for t in periode_2), GRB.MINIMIZE)
model_3.setObjective(gp.quicksum(o_3[t] * Y_3[t] + h_3[t] * X_3[t]
                                for t in periode_3), GRB.MINIMIZE)
```

Fungsi Kendala

Demand & Inventory Level Constraint

$$X_{it} = X_{i(t-1)} + Q_{i(t-1)} - D_{i(t-1)} \quad \forall_{i,t} \quad (1)$$

```
# Fungsi Kendala 1: Memastikan bahan baku tiap periode memenuhi demand
# dan mendefinisikan nilai level persediaan awal (X_it)
for t in range(1, t_1+1):
    model_1.addConstr((X_1[t-1] + Q_1[t-1] - D_1[t-1]) == X_1[t], "c11")
for t in range(1, t_2+1):
    model_2.addConstr((X_2[t-1] + Q_2[t-1] - D_2[t-1]) == X_2[t], "c21")
for t in range(1, t_3+1):
    model_3.addConstr((X_3[t-1] + Q_3[t-1] - D_3[t-1]) == X_3[t], "c31")
```

Safety Stock Constraint

$$X_{it} \geq SS_{it} \quad \forall_{i,t} \quad (2)$$

```
# Fungsi kendala 2: Memastikan persediaan tidak kurang dari safety stock
for t in range(1, t_1+1):
    model_1.addConstr(X_1[t] >= SS_1, "c12")
for t in range(1, t_2+1):
    model_2.addConstr(X_2[t] >= SS_2, "c22")
for t in range(1, t_3+1):
    model_3.addConstr(X_3[t] >= SS_3, "c32")
```


Fungsi kendala (*constraint*) dalam pengembangan model matematika dan model *python*

Fungsi Kendala (Lanjutan)

Big-M Value Constraint

$$Q_{it} \leq MY_{it} \quad \forall_{i,t} \quad (3)$$



```
# Fungsi Kendala 3: Mendefinisikan keputusan Y bergantung pada kuantitas Q
for t in periode_1:
    model_1.addConstr((Q_1[t] <= M_1[t]*Y_1[t]), "c13")
for t in periode_2:
    model_2.addConstr((Q_2[t] <= M_2[t]*Y_2[t]), "c23")
for t in periode_3:
    model_3.addConstr((Q_3[t] <= M_3[t]*Y_3[t]), "c33")
```

Capacity Constraint

$$X_{it} \leq C_i \quad \forall_{i,t} \quad (4)$$



```
# Fungsi Kendala 4: Memastikan persediaan tidak lebih dari kapasitas gudang
for t in periode_1:
    model_1.addConstr((X_1[t] <= C_1), "c14")
for t in periode_2:
    model_2.addConstr((X_2[t] <= C_2), "c24")
for t in periode_3:
    model_3.addConstr((X_3[t] <= C_3), "c34")
```

Binary Constraint

$$Y_{it} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \forall_{i,t} \quad (5)$$



```
# Fungsi Kendala 5: Mendefinisikan keputusan biner Y (pesan=1/tidak pesan=0)
Y_1 = model_1.addVars(t_1, name="c15", vtype=GRB.BINARY)
Y_2 = model_2.addVars(t_2, name="c25", vtype=GRB.BINARY)
Y_3 = model_3.addVars(t_3, name="c35", vtype=GRB.BINARY)
```

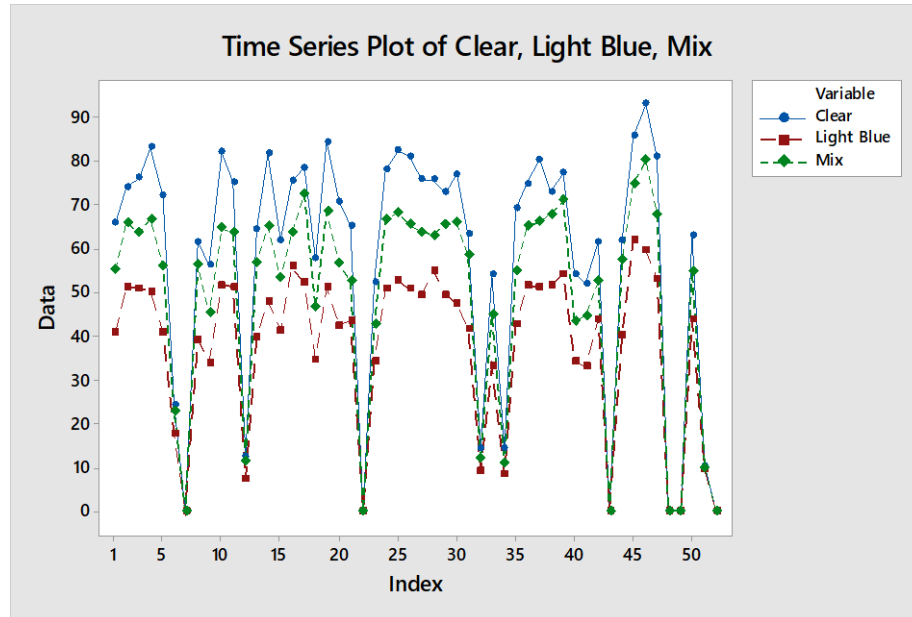
Non-negativity Constraint

$$Q_{it}, X_{it}, Y_{it} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall_{i,t} \quad (6)$$



```
# Fungsi Kendala 6: Mendefinisikan variabel keputusan adalah non-negatif
for t in periode_1:
    model_1.addConstr((Y_1[t] >= 0), "c16")
    model_1.addConstr((Q_1[t] >= 0), "c16")
    model_1.addConstr((X_1[t] >= 0), "c16")
```

Demand forecasting dan perhitungan nilai *safety stock*



No.	Metode peramalan	Ukuran Akurasi		
1	Moving Average m=2	1,4	2,9	11
2	Moving Average m=3	1,3	2,6	10,4
3	Moving Average m=4	1,3	2,4	9,8
4	Simple Exponential Smoothing	1,2	2	9,1
5	Holt's Model	1,6	4,1	12,6
6	Winter's Model	1,1	1,9	8,9
7	ARIMA (1,1,0)	1,3	1,8	11

Metode *Winter's Model* menghasilkan nilai MAD, MSD, dan MAPE yang terendah secara berurutan, yaitu 1,1, 1,9, dan 8,9%. Hal ini berarti metode *Winter's Model* memiliki nilai akurasi yang tertinggi sehingga dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini. Metode ini menghasilkan nilai terbaik karena mempertimbangkan parameter *level*, *trend*, dan *seasonality*

No.	Nama Bahan Baku	Safety Stock (kg)
1	Clear	46321
2	Light Blue	30419
3	Mix	39251

Jumlah *safety stock* setiap bahan baku untuk menjaga fluktuasi permintaan berbeda dimana terbanyak pada bahan baku 1 karena memiliki variabilitas permintaan paling tinggi sedangkan terendah pada bahan baku 3 sesuai jumlah permintaan historis, *service level*, *safety factor*, dan *lead time*

Verifikasi model

Verifikasi Model

- ✓ Pengujian model dengan menjalankan model optimasi menggunakan data historis

Model dijalankan pada *Python 3.9.7* dengan bantuan *solver Gurobi Optimizer v10.0* dengan spesifikasi perangkat berikut:

- *Intel (R) Core i5-10300H CPU @2.50 Ghz RAM 16 GB*
- *Windows 10, sistem operasi 64-bit, x64-based processor*

Branch-and-Bound

Metode untuk memecahkan masalah optimasi MILP dengan memecah sub-masalah yang lebih kecil dan menggunakan fungsi pembatas untuk mengeliminasi sub-masalah yang tidak dapat memuat solusi optimal dengan algoritma yang meliputi *preprocessing, relaxation, branching variable, search tree*, dan *nodes*

Optimal Solution Found yang memiliki arti bahwa hasil dari fungsi tujuan yang didapatkan merupakan solusi yang optimal dengan *gap* < 0.1% dan **tidak ada error / debugging**

```
Gurobi Optimizer version 10.0.0 build v10.0.0rc2 (win64)
CPU model: Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz, instruction set [SSE2|AVX|AVX2]
Thread count: 4 physical cores, 8 logical processors, using up to 8 threads

Optimize a model with 1098 rows, 471 columns and 1566 nonzeros
Model fingerprint: 0xaf0951af
Variable types: 315 continuous, 156 integer (156 binary)
Coefficient statistics:
  Matrix range      [1e+00, 1e+06]
  Objective range   [1e+01, 1e+05]
  Bounds range      [1e+00, 1e+00]
  RHS range         [1e+04, 1e+06]
Found heuristic solution: objective 4.002105e+07, 2.492695e+07, 3.281822e+07
Presolve removed 810 rows and 33 columns
Presolve time: 0.00s
Presolved: 288 rows, 438 columns, 723 nonzeros
Variable types: 288 continuous, 150 integer (150 binary)

Root relaxation 1: objective 2.006112e+08, 46 iterations, 0.00 seconds (0.00 work units)

  Nodes | Current Node | Objective Bounds | Work
Expl Unexpl | Obj Depth IntInf | Incumbent BestBd Gap | It/Node Time
  -----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
    0     0 2.0061e+08  0  44 2.4518e+08 2.0061e+08 18.2% - 0s
H    0     0          2.054484e+08 2.0061e+08 2.35% - 0s
    0     0 1.1279e+08  0  44 1.3952e+08 1.1279e+08 19.2% - 0s
H    0     0          1.177184e+08 1.1279e+08 4.18% - 0s
    0     0 cutoff    0          1.1772e+08 1.1772e+08 0.00% - 0s
    0     0 1.5855e+08  0  44 1.9476e+08 1.5855e+08 18.6% - 0s
H    0     0          1.634321e+08 1.5855e+08 2.98% - 0s

Cutting planes: (model 1, 2, 3)
Gomory: 0, 0, 1
Cover: 0, 2, 0
Implied bound: 8, 84, 20
MIR: 0, 2, 0
Flow cover: 0, 2, 2
Flow path: 0, 3, 0

Explored 1 nodes (182 simplex iterations) in 0.09 seconds (0.00 work units)
Thread count was 8 (of 8 available processors)

Solution count 2: 2.05448e+08 2.45179e+08
Solution count 2: 1.17718e+08 1.39521e+08
Solution count 2: 1.63432e+08 1.9476e+08
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 2.054484400000e+08, best bound 2.054484400000e+08, gap 0.0000%
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 1.177183500000e+08, best bound 1.177183500000e+08, gap 0.0000%
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 1.634321090000e+08, best bound 1.634321090000e+08, gap 0.0000%
```


Validasi model

- ✓ Peninjauan hasil model terhadap fungsi kendala

Fungsi Kendala	Hasil Tinjauan	Keterangan
(1) <i>Demand & Inventory Level Constraint</i>	Jumlah material yang dipesan memenuhi semua <i>demand</i>	Terpenuhi
(2) <i>Safety Stock Constraint</i>	Nilai persediaan awal tiap periode selalu lebih besar atau sama dengan jumlah <i>safety stock</i>	Terpenuhi
(3) <i>Big-M Value Constraint</i>	Terdapat sejumlah pemesanan yang totalnya sesuai dengan jumlah <i>demand</i>	Terpenuhi
(4) <i>Capacity Constraint</i>	Persediaan tiap periode selalu lebih kecil atau sama dengan kapasitas gudang bahan baku	Terpenuhi
(5) <i>Binary Constraint</i>	Keputusan pesan selalu bernilai 1 (pesan) atau 0 (tidak pesan)	Terpenuhi
(6) <i>Non-negativity Constraint</i>	Tidak ditemukan variabel keputusan yang lebih kecil dari nol	Terpenuhi

- ✓ Perbandingan hasil perhitungan dengan hasil model memastikan model mampu merepresentasikan kondisi aktual
- ✓ Pengujian dengan data *dummy* atau data lain dapat menghasilkan output yang sesuai tujuan model

No.	Komponen Biaya	Biaya (Rp)
1	Holding Cost	469.486.899
2	Ordering Cost (138 kali pesan)	17.112.000
	Total biaya persediaan	486.598.899

```
Optimize a model with 1098 rows, 471 columns and 1566 nonzeros
Model fingerprint: 0x0d6b1df5, 0x9f51dd7f, 0x53907955
Variable types: 315 continuous, 156 integer (156 binary)
Explored 1 nodes (182 simplex iterations) in 0.09 seconds (0.00 work units)
Total biaya persediaan minimum bahan baku 1 (Clear): Rp. 205448440.0
-----
Total biaya persediaan minimum bahan baku 2 (Light Blue): Rp. 117718350.0
-----
Total biaya persediaan minimum bahan baku 3 (Mix): Rp. 163432109.0
-----
Total biaya persediaan minimum ketiga bahan baku: Rp. 486598899.0
```

Berdasarkan hasil pengujian, disimpulkan bahwa **model terverifikasi dan tervalidasi**

Hasil pengolahan data

Hasil model pada data historis 52 periode

No.	Nama Bahan Baku	Permintaan (kg)	Kuantitas Pemesanan (kg)	Total Biaya Persediaan (Rp)
1	Clear	2.999.572	2.999.572	205.448.440
2	Light Blue	1.953.108	1.953.108	117.718.350
3	Mix	2.542.053	2.542.053	163.432.109
Total		7.494.733	7.494.733	486.598.899

Jumlah kuantitas pemesanan setiap bahan baku sesuai dengan jumlah *demand* pada tahun 2022, yaitu sebesar 7.494.733 kg sehingga semua *demand* bahan baku terpenuhi dengan biaya yang minimum, yaitu Rp486.598.899

Hasil model pada data *forecasted demand* 12 periode

No.	Nama Bahan Baku	Permintaan (kg)	Kuantitas Pemesanan (kg)	Total Biaya Persediaan (Rp)
1	Clear	884.833	884.833	44.288.604
2	Light Blue	654.554	654.554	24.910.630
3	Mix	773.940	773.940	34.733.597
Total		2.313.327	2.313.327	103.932.831

Total biaya persediaan untuk 12 periode peramalan pada tahun 2023 sebesar Rp103.932.831 dengan pemesanan sebesar 2.313.327 kg sesuai detail per periode, hasil ini menunjukkan bahwa *forecasting* dapat digunakan pada model optimasi

Detail kuantitas pesan (Q) dan periode pesan (Y) hasil pengolahan data historis

Periode (2022)	Q_{it}	Y_{it}	Material 1	Q_{it}	Y_{it}	Material 2	Q_{it}	Y_{it}	Material 3
			Clear (kg)			Light Blue (kg)			Mix (kg)
1	Q(1,1)	1	96620	Q(2,1)	1	22257	Q(3,1)	1	47732
2	Q(1,2)	1	73998	Q(2,2)	1	51131	Q(3,2)	1	65982
3	Q(1,3)	1	76124	Q(2,3)	1	50891	Q(3,3)	1	63460
4	Q(1,4)	1	82991	Q(2,4)	1	50057	Q(3,4)	1	66582
5	Q(1,5)	1	72013	Q(2,5)	1	40959	Q(3,5)	1	56036
6	Q(1,6)	1	24411	Q(2,6)	1	17493	Q(3,6)	1	22884
7	Q(1,7)	0	0	Q(2,7)	0	0	Q(3,7)	0	0
8	Q(1,8)	1	61513	Q(2,8)	1	39083	Q(3,8)	1	56131
...
52	Q(1,52)	0	0	Q(2,52)	0	0	Q(3,52)	0	0
Total Biaya Persediaan (Rp)					Rp486.598.899				

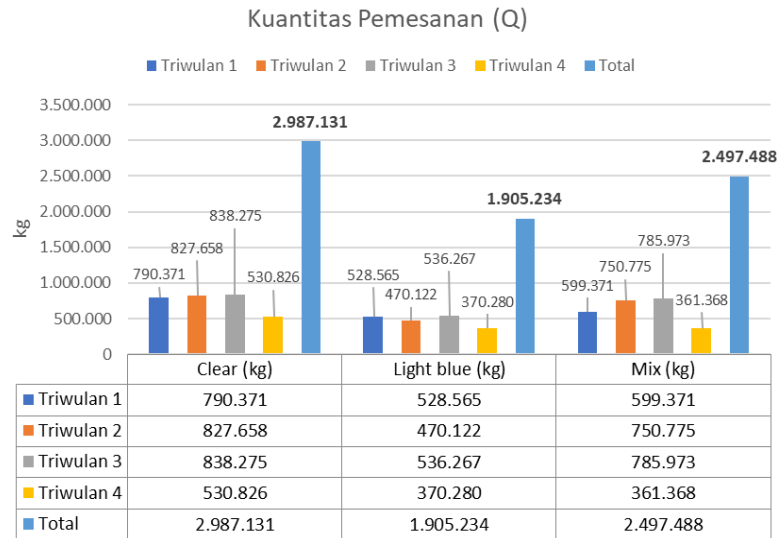
Untuk meminimalkan total biaya persediaan, maka harus diupayakan melakukan pemesanan sesuai dengan hasil model per periode yang bervariasi jumlahnya sesuai dengan pola permintaan historis

Detail kuantitas pesan (Q) dan periode pesan (Y) hasil pengolahan data *forecast*

Periode Forecast (2023)	Q_{it}	Y_{it}	Material 1	Q_{it}	Y_{it}	Material 2	Q_{it}	Y_{it}	Material 3
			<i>Clear</i>			<i>Light Blue</i>			Mix
1	Q(1,1)	1	124560	Q(2,1)	1	83435	Q(3,1)	1	105707
2	Q(1,2)	1	74939	Q(2,2)	1	54644	Q(3,2)	1	66224
3	Q(1,3)	1	77128	Q(2,3)	1	54121	Q(3,3)	1	66839
4	Q(1,4)	1	75449	Q(2,4)	1	55211	Q(3,4)	1	66132
5	Q(1,5)	1	76518	Q(2,5)	1	54385	Q(3,5)	1	65957
6	Q(1,6)	1	76013	Q(2,6)	1	56469	Q(3,6)	1	65971
7	Q(1,7)	1	63251	Q(2,7)	1	46607	Q(3,7)	1	55616
8	Q(1,8)	1	75560	Q(2,8)	1	57286	Q(3,8)	1	65993
...
12	Q(1,12)	1	62522	Q(1,12)	1	49147	Q(1,12)	1	55309
Total Biaya Persediaan (Rp)					Rp103.932.831				

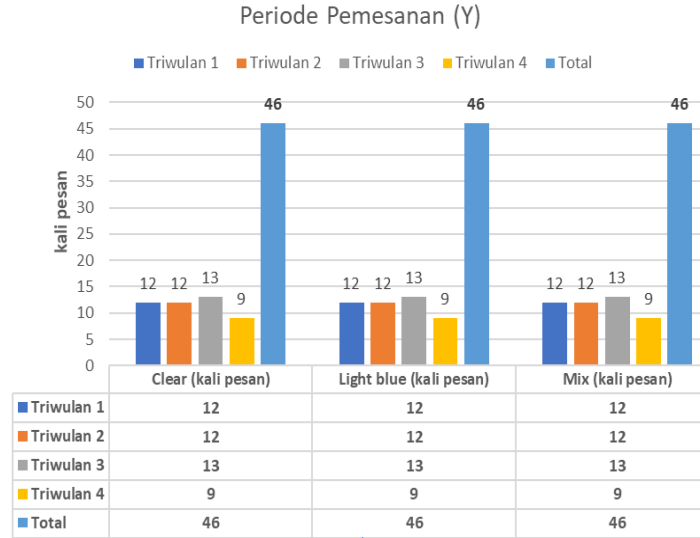
Penggunaan model *forecast* ini menghasilkan rencana penjadwalan bahan baku sesuai permintaan hasil peramalan dan semua permintaan terpenuhi dengan biaya yang minimum

Analisis hasil kuantitas pemesanan (Q) dan periode pemesanan (Y) serta total biaya persediaan



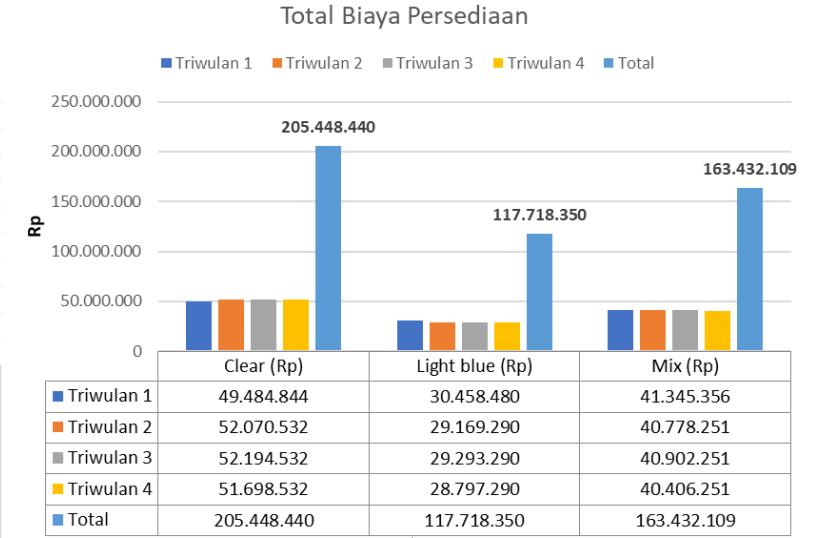
Jumlah Q *Clear* tertinggi dipengaruhi oleh jumlah *demand* dan *safety stock* yang paling banyak

Kuantitas pemesanan terbesar terdapat pada triwulan 3 karena mengalami lonjakan permintaan dan terendah pada triwulan 4 karena mengalami masalah produksi



Jumlah Y adalah 138 kali pemesanan bahan baku dengan pembagian yang merata akibat efisiensi hasil model

Frekuensi pemesanan terbanyak terdapat pada triwulan 3 dan terendah pada triwulan 4 karena sesuai dengan pola tinggi rendahnya kuantitas pemesanan



Total biaya persediaan yang paling besar ditemukan pada bahan baku *clear*.

Hal ini disebabkan karena bahan baku *clear* memiliki harga beli dan biaya simpan yang paling besar serta Q yang paling tinggi dengan jumlah Y yang sama dan begitu juga bahan baku lain

Analisis perbandingan biaya dan nilai *inventory turnover* (ITO) kondisi aktual dan model

Komponen Biaya	Biaya Aktual (dalam jutaan rupiah)			Biaya Model (dalam jutaan rupiah)		
	Clear	Light Blue	Mix	Clear	Light Blue	Mix
Biaya Simpan	201,5	161,4	223,7	199,7	112,0	157,7
Biaya Pesan	22,3	22,8	22,8	5,7	5,7	5,7
Biaya Persediaan	223,8	184,2	246,5	205,4	117,7	163,4
Total	654,6			486,5		

Kondisi Hasil	Rata-rata Saldo (dalam jutaan rupiah)	Total Penjualan (dalam jutaan rupiah)	Nilai ITO
Aktual	355.174	60.668	0,17
Model	44.279	60.668	1,37

Biaya Simpan

▼ -20%

(-Rp117.209.200)

Biaya Pesan

▼ -3/4

(-Rp50.840.000)

Biaya Persediaan

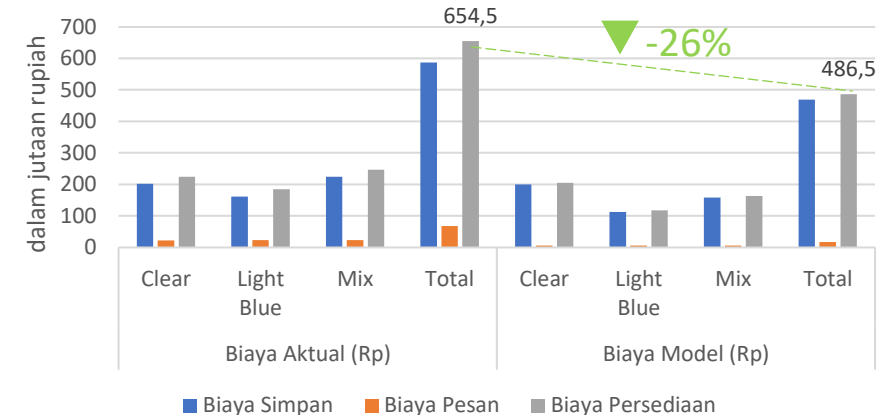
▼ -26%

(-Rp168.049.200)

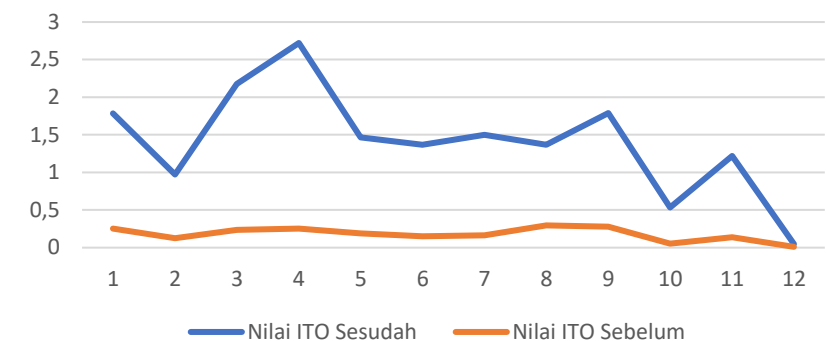
Nilai ITO

▲ +1,2

Perbandingan Biaya



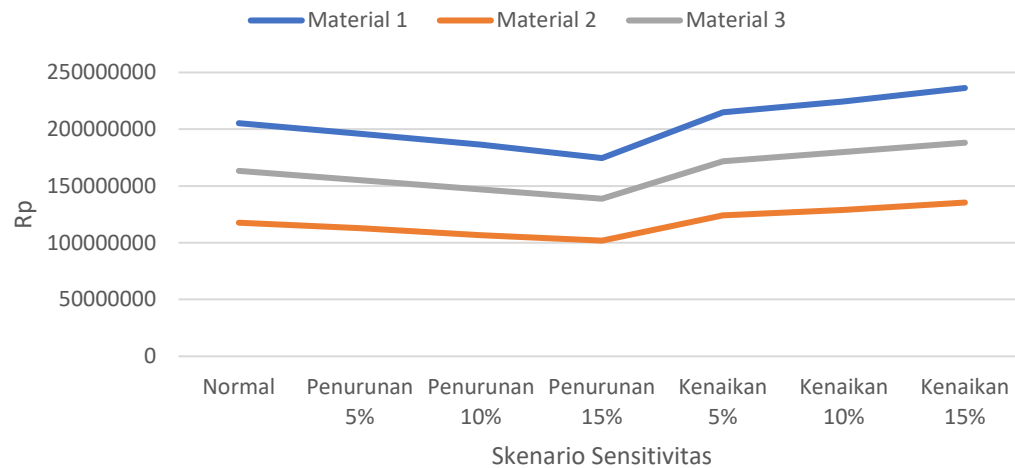
Peningkatan Nilai ITO



Pengurangan biaya dan peningkatan nilai ITO ini menunjukkan bahwa model mampu mengeliminasi jumlah pemesanan yang kurang efisien sehingga membuat penjadwalan bahan baku yang lebih baik serta mengurangi sejumlah penumpukan bahan baku berlebih pada gudang terutama pada bahan baku 2 dan 3 sehingga selain meminimalkan total biaya persediaan juga menyelesaikan masalah perputaran persediaan yang rendah pada gudang. Peningkatan ini dapat terjadi dikarenakan jumlah bahan baku yang disimpan akurat sesuai kebutuhan. Kedua tujuan penelitian berhasil tercapai

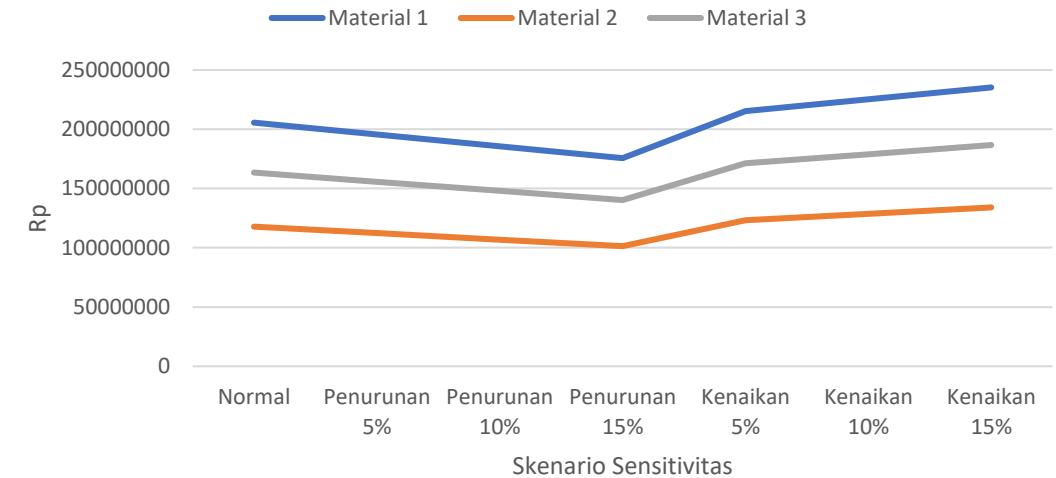
Analisis sensitivitas perubahan parameter harga dan jumlah permintaan

Total Biaya Persediaan Akibat Perubahan Harga Material



Skenario harga beli bahan baku dapat berubah secara fluktuatif dipengaruhi berbagai faktor seperti ketersediaan bahan baku pada pemasok atau musim pengumpulan sampah botol PET. Ditemukan bahwa harga beli bahan baku berbanding lurus dengan total biaya persediaan. Semakin murah harga bahan baku, maka total biaya persediaan akan semakin menurun, dan begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan karena harga bahan baku mempengaruhi besar biaya pembelian dan biaya simpan gudang

Total Biaya Persediaan Akibat Perubahan Jumlah Permintaan



Skenario kenaikan dan penurunan permintaan dapat terjadi akibat berbagai faktor seperti regulasi pemerintah atau munculnya kompetitor baru. Ditemukan bahwa jumlah permintaan berbanding lurus dengan total biaya persediaan. Semakin banyak permintaan bahan baku, maka total biaya persediaan akan semakin meningkat, dan begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan karena jumlah permintaan bahan baku menentukan besar dan kecilnya berapa banyak kuantitas bahan baku yang perlu dipesan dan juga disimpan



Kesimpulan

- ✓ Pengembangan model hasil metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dapat **meminimalkan total biaya persediaan sebesar 26%** atau setara dengan Rp168.049.200 dari biaya awal persediaan sebesar Rp654.648.099 menjadi Rp486.598.899. Penggunaan metode MILP ini juga dapat meningkatkan nilai *inventory turnover* perusahaan sebesar 1,20 dari 0,17 menjadi 1,37.
- ✓ Kuantitas pesan (Q) dan waktu pesan (Y) yang dihasilkan model menunjukkan **nilai optimal sebesar 7.494.333 kg** dari total tiga jenis bahan baku daur ulang plastik yang didapatkan dengan **melakukan pemesanan sebanyak 138 kali** pada periode sesuai dengan masing-masing waktu perencanaan dan penjadwalan bahan baku yang telah ditemukan dari model. Dengan melakukan keputusan sesuai dengan hasil model, maka akan total biaya persediaan minimum gudang bahan baku pada industri daur ulang plastik.

Saran

Peningkatan untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan **penggunaan data historis yang lebih banyak** untuk mendapatkan hasil peramalan yang lebih akurat

Membandingkan **penggunaan jenis model dan metode yang berbeda** dalam peramalan permintaan, perhitungan persediaan pengaman, serta pemrograman model optimasi.

Penerapan **model optimasi persediaan dengan MILP dapat digunakan oleh perusahaan** sebagai rekomendasi untuk memperbaiki penjadwalan bahan baku dan mendapatkan nilai biaya minimum

Sumber-sumber acuan dalam penelitian

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., Zhu, D., & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of the Total Environment*, 771, 144719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144719>
- Arnold, T., Chapman, S. N., & Clive, L. M. (2012). *Introduction to materials management* (7th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Atabay, D. (2018). Comparison of Optimization Methods for Model Predictive Control: An Application to a Compressed Air Energy Storage System. *Universitätsbibliothek der TU München*.
- Fiorotto, D. J., Jans, R., & Silvio. (2017). An analysis of formulations for the capacitated lot sizing problem with setup crossover. *Computers & Industrial Engineering*, 106, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.037>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gurobi Optimization. (2021). Documentation: Gurobi Optimization Reference Manual. <https://www.gurobi.com/documentation/>
- Heizer, J. & Barry, R. (2014). *Operations management: sustainability and supply chain management*. Pearson Education
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and Opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- International Union for Conservation of Nature - IUCN. (2021). Marine plastic pollution. <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/marine-plastic-pollution>
- Jacobs, F. R., & Chase, R. B. (2014). *Operations and Supply Chain Management* 14th edition. McGraw-Hill Education
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). *Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean*. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Johns, D. T., & Harding, H. A. (2001). *Operations Management*, alih bahasa Kresnohadi Ariyoto. Salemba Empat. (Original work published 1989)
- Jünger, M., Liebling, T. M., Naddef, D., Nemhauser, G. L., Pulleyblank, W. R., Reinelt, G., Rinaldi, G., & Wolsey, L. A. (2010). *50 Years of Integer Programming 1958-2008*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2021, April 3). Kemenperin: Kemenperin Dorong Transformasi Pembangunan Industri Berkelanjutan. <https://kemenperin.go.id/artikel/22439/>
- Kusuma, R. I., & Hakim, I. M. (2020). Designing Inventory Models to Minimize Total Inventory Costs by Using Mixed Integer Linear Programming (MILP) in the Warehouse of MRO Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1003(1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1003/1/012100>
- Kwak, J. K. (2019). Analysis of Inventory Turnover as a Performance Measure in Manufacturing Industry. *Processes*, 7(10), 760. <https://doi.org/10.3390/pr7100760>

Sumber-sumber acuan dalam penelitian

- Letcher, T. M. (2020). Plastic waste and recycling : environmental impact, societal issues, prevention, and solutions. Academic Press.
- Majumdar, A., Shukla, S., Singh, A. A., & Arora, S. (2020). Circular fashion: Properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (PET) bottles. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104915. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104915>
- McKinney, W. (2013). Python for data analysis. O'reilly.
- Miller, S. A. (2020). Five Misperceptions Surrounding the Environmental Impacts of Single-Use Plastic. *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14143–14151. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05295>
- Mohammadi, M., & Shekarian, E. (2017). A mixed integer linear programming model for the multi-item uncapacitated lot-sizing problem: a case study in the trailer manufacturing industry. *International Journal of Multivariate Data Analysis*, 1(2), 173. <https://doi.org/10.1504/ijmda.2017.10008572>
- Mohammadi, M., & Tap, M. M. (2012). A Mixed Integer Programming Model Formulation for Solving the Lot-Sizing Problem. *ArXiv.org*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.6179>
- PET Resin Association - PETRA. (2015). An Introduction to PET (polyethylene terephthalate). *Petresin.org*. <https://petresin.org/an-introduction-to-pet/>
- Phakdeewongthep, P., Saelek, P., Wisedsin, T., & Norasedsophon, S. (2023). Finding Methods for Forecasting Storage Space Demand of Waste Recycle Company. Case Study of ABC Waste Recycle Company, Samutsakhon Province. *International Academic Multidisciplines Research Conference*, 98–101.
- Pinedo, M. (2005). Planning and scheduling in manufacturing and services. Springer.
- Pochet, Y., & Wolsey, L. A. (2008). Production Planning by Mixed Integer Programming. Springer.
- Chopra, S. & Meindl, P. (2016). Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation (6th ed.). Pearson.
- Taha, H. A. (2007). Operations research : an introduction (8th ed.). Prentice Hall.
- Waters, D. J. (2003). Inventory Control and Management. John Wiley & Sons.
- Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 865–875. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.009>
- World Bank. (2021). Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia. Marine Plastics Series, East Asia and Pacific Region. Washington DC
- World Economic Forum. (2020). Mengurangi Polusi Plastik Secara Radikal di Indonesia. https://www.systemiq.earth/wpcontent/uploads/2020/05/NPAP_Indonesia_Action_Roadmap_BahasaLow-1.pdf

A group of students wearing blue gloves and light-colored shirts are working together to clean a large pile of white, crumbly debris. They are using their hands to move the material. In the background, a person in a dark blue hijab is also visible, working on the same pile. The scene is outdoors, and the overall atmosphere is one of active participation in a community service or environmental cleanup activity.

TERIMA KASIH