

MODEL PERSEDIAAN PADA *SUPPLY CHAIN* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN EMISI KARBON DAN PERMINTAAN YANG BERGANTUNG PADA HARGA JUAL PRODUK

Shabrina Chairunnisaa Novia Ramadhany¹, Wakhid Akhmad Jauhari²,
Cucuk Nur Rosyidi³

Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
e-mail: ¹shabrinacnr@student.uns.ac.id, ²wakhidjauhari@gmail.com, ³cucuknur@staff.uns.ac.id

ABSTRAK

Emisi dari manufaktur berkontribusi besar dalam peningkatan polusi gas rumah kaca. Salah satu kegiatan dari manufaktur adalah *supply chain*. Untuk menangani terjadinya resiko akibat emisi karbon, perlu dilakukan *green supply chain management*, salah satunya dengan menerapkan *hybrid production*, yaitu *regular production* dan *green production*. Sebuah perusahaan perlu mempertimbangkan *trade-off* antara penggunaan *green technology* dan keuntungan yang akan didapatkan. Penelitian ini dilakukan untuk membentuk model persediaan *supply chain* dengan mempertimbangkan kebijakan karbon dan harga jual produk untuk memperoleh keuntungan yang maksimum. Pengembangan model dilakukan dengan menetapkan asumsi, memformulasikan model, dan dilanjutkan dengan perhitungan menggunakan data sekunder. Pencarian solusi optimal dilakukan dengan perhitungan algoritma. Penelitian dilanjutkan dengan analisis sensitivitas dari beberapa skenario yang diajukan. Analisis sensitivitas tersebut dapat dijadikan pertimbangan bagi seorang manajer dalam mengambil keputusan sesuai skenario tersebut. Hasil dari penelitian ini adalah penambahan fasilitas *green production* yang dilakukan melalui investasi terbukti dapat mengurangi emisi karbon yang dihasilkan *supply chain* dengan mempertimbangkan harga jual produk, lot pengiriman, jumlah pengiriman, dan *safety factor*.

Kata kunci: persediaan, produksi hijau, produksi hybrid, rantai pasok

ABSTRACT

Emission from manufacturing contributes greatly to the increasing of greenhouse gas pollution. One of the activity in manufacturing is the *supply chain*. To deal with the risk of carbon emission, it is necessary to carry out *green supply chain management*, which is by implementing *hybrid production*, by *regular production* and *green production*. A company needs to consider the *trade-off* between the use of *green technology* and the benefits that will be obtained. This research was conducted to form a *supply chain inventory model* by considering carbon policies and productselling price to maximize the joint total profit. The development of this model is carried by set the assumptions, formulating models, and gave the numerical examples by using secondary data. We used algorithm from the formulation model to find the optimal solution. The research is continued with a sensitivity analysis of the proposed scenarios by changing some of the parameter. This sensitivity analysis can be used as a consideration for a manager in making decisions according to those scenarios. The results of this study are the addition of *green production facility* is proven to reduce carbon emission by considering product selling price, lot size, number of shipping, and *safety factor*.

Keywords: green production, hybrid production, inventory, supply chain

PENDAHULUAN

Seiring berubahnya pandemi Covid-19 menjadi sebuah endemi, kegiatan masyarakat mulai tidak terlalu dibatasi pada tahun 2021. Perubahan ini mengakibatkan peningkatan emisi karbon sebesar 6% dari tahun 2020. Peningkatan ini mencapai 36,3 miliar ton CO₂ pada tahun 2021 [1]. Berdasarkan catatan *International Monetary Fund* (IMF), salah satu penyumbang emisi terbesar secara global adalah manufaktur, di mana salah satu kegiatannya adalah *supply chain*. Menurut *Customer Data Platform* [2], emisi dari kegiatan *supply chain* lebih tinggi sebesar 11,4 kali lipat dibandingkan kegiatan operasional manufaktur. Untuk mengurangi emisi dalam kegiatan *supply chain*, perusahaan dapat menerapkan *green supply chain management* (GSCM).

GSCM adalah suatu konsep integrasi yang berorientasi pada lingkungan ke dalam lingkup *supply chain* [3]. *Green production* merupakan salah satu aktivitas dalam GSCM dengan menerapkan teknologi yang ramah lingkungan dan dapat mengurangi emisi pada proses produksi [4]. Untuk menggunakan *green production* akan melibatkan biaya yang tinggi untuk mulai berinvestasi pada *green production* [5]. Selain itu, pemerintah juga ikut andil dalam usaha mengurangi emisi secara global, salah satunya adalah dengan menetapkan kebijakan pajak emisi karbon. Hal ini dapat mendorong manufaktur untuk mulai menggunakan konsep *green production* agar dapat mengurangi pembayaran pajak emisi tersebut. Menurut Jauhari et al. [6], perusahaan dapat menerapkan sistem *hybrid production*, yaitu dengan *regular production* dan *green production*. *Regular production* memiliki biaya produksi yang lebih kecil dibandingkan *green production*, tetapi jumlah emisi karbon yang dihasilkan lebih besar dibandingkan *green production*. Maka dari itu, perusahaan perlu mempertimbangkan *trade-off* antara ekonomi dan dampak lingkungan dari kegiatan manufaktur [7].

Permintaan pada pasar dipengaruhi oleh beberapa faktor. Umumnya, sesuai *law of demand*, harga jual dan jumlah permintaan akan berbanding terbalik [8]. Selain harga jual terdapat faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi. Belakangan ini, kepedulian konsumen terhadap isu lingkungan mulai meningkat. Konsumen mulai tertarik terhadap *green product*. *Green level* dari sebuah produk dapat diukur dari bahan baku dan proses produksi yang ramah lingkungan dari produk tersebut. Hal ini juga dapat mendorong manufaktur untuk mulai berinvestasi pada *green production* untuk ikut andil menjaga lingkungan, khususnya dalam upaya mengurangi emisi karbon [9, 10]. Beberapa perusahaan, seperti Nike Inc., Gap Inc., dan H&M, berkomitmen dalam mengurangi emisi untuk menekan laju pemanasan global [11].

Penelitian mengenai model persediaan yang mempertimbangkan emisi karbon diawali oleh Hua et al. [12]. Model tersebut bertujuan untuk menentukan *order quantity* yang optimal di bawah cap-and-trade dan membandingkannya dengan EOQ biasa. Jaber et al. [13] melanjutkan pengembangan model optimasi *joint production-inventory* pada *supply chain* antara pamanufaktur dan pengecer dengan mempertimbangkan biaya emisi dan penalti dari kelebihan emisi pada *supply chain*. Martí et al. [14] mengembangkan model *supply chain* untuk memaksimalkan efektivitas biaya yang dikeluarkan di bawah kebijakan emisi karbon. Ghosh et al. [3] mengembangkan model *supply chain* untuk meminimasi total biaya *supply chain* dalam memenuhi batasan emisi karbon perusahaan.

Lou et al. [15] mengembangkan model *supply chain* untuk memaksimalkan keuntungan dengan mempertimbangkan investasi *green technology* sebagai upaya mengurangi emisi karbon. Pada model ini, permintaan bergantung pada harga jual dan *green level*. Sepehri [16] melanjutkan penelitian dengan model persediaan di bawah kebijakan pajak emisi dan *carbon-cap*. Mishra et al. [5] mengembangkan model persediaan di bawah kebijakan pajak emisi karbon dan *cap based production* untuk mengontrol emisi yang dihasilkan dalam keadaan *shortage*.

Jauhari et al. [6] mengembangkan model persediaan pada *supply chain* yang terdiri atas pengecer dan pamanufaktur. Dalam model ini, pamanufaktur memiliki fasilitas *hybrid production* serta emisi karbon dihasilkan dari aktivitas produksi, transportasi, dan penyimpanan. Model ini bertujuan untuk meminimalkan total biaya gabungan pada *supply chain* dengan mempertimbangkan tingkat produksi, alokasi produksi, *safety factor*, dan jumlah lot yang dikirim. Biaya yang dicakup pada model ini adalah biaya pemesanan, pengiriman, penyimpanan, backorder, produksi, dan pajak emisi karbon. Pada penelitian ini, model yang dikembangkan belum mengakomodasi besarnya investasi *green production* dan permintaan yang bergantung pada harga jual produk.

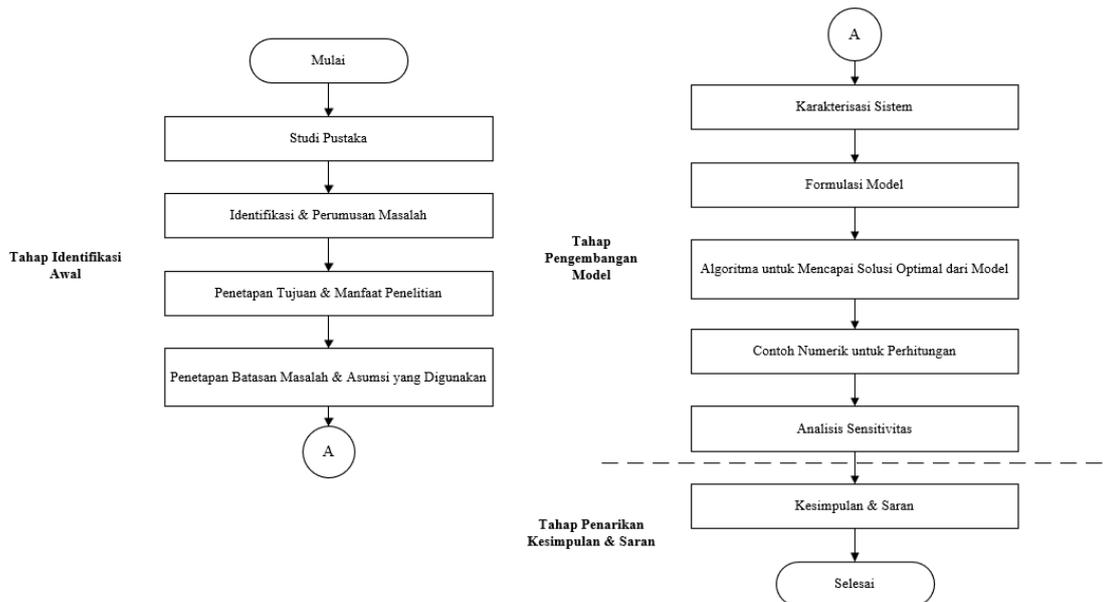
Berdasarkan penelitian di atas, belum ada peneliti yang mengembangkan model persediaan pada *supply chain* yang mempertimbangkan tingkat investasi dan harga jual produk untuk menerapkan *hybrid production* pada manufaktur. Penelitian ini mengembangkan model Jauhari et al. [6] sebagai model acuan. Model yang dikembangkan mempertimbangkan kebijakan pajak emisi dan fungsi rata-rata permintaan yang bergantung pada harga jual produk. Biaya-biaya dalam model ini mencakup biaya pemesanan, penyimpanan produk pada pengecer, *shortage*, transportasi, *setup* produksi, penyimpanan produk pada pamanufaktur, produksi produk, investasi terhadap *green technology*, dan pajak emisi karbon yang ditanggung oleh pengecer dan pamanufaktur. Tingkat investasi untuk *green production* ini merupakan alokasi produksi pada fasilitas *green production* dan juga dapat diartikan sebagai tingkat investasi yang dikeluarkan oleh pamanufaktur untuk mengadakan fasilitas tersebut Tujuan dari model ini adalah untuk memaksimalkan keuntungan gabungan dalam *supply chain*. Pencarian solusi model yang optimal dilakukan dengan perhitungan algoritma dan dianalisis sensitivitasnya secara lebih lanjut.

Tabel 1. *State of The Art* Penelitian

Autor	Variabel/Asumsi				
	Demand	Kebijakan Inventori	Hybrid Production	Investasi Green Tech.	Sumber Emisi
Hua et al.	Deterministik	EOQ	-	-	Penyimpanan dan pengiriman
Jaber et al.	Deterministik	EOQ	-	-	Produksi
Lou et al.	Variabel	-	-	✓	Produksi
Marti et al.	Variabel	EOQ	-	-	Operasional
Ghosh et al.	Stokastik	Continuous review	-	-	Produksi, penyimpanan, pengiriman
Mishra et al.	Deterministik	EPQ	-	✓	Produksi, penyimpanan
Sepehri	Variabel	EOQ	-	✓	Pesanan dan inventori
Jauhari, et al.	Stokastik	Continuous review	✓	-	Produksi, penyimpanan, pengiriman
Model Usulan	Stokastik (D[<i>pb</i>])	Continuous review	✓	✓	Produksi, penyimpanan, pengiriman

METODE PENELITIAN

Penelitian secara garis besar dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu tahap identifikasi awal, tahap pengembangan model, serta tahap penarikan kesimpulan dan saran. Secara rinci, tahapan ini digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Metodologi Penelitian

Asumsi Model

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Permintaan konsumen berdistribusi normal dengan rata-rata permintaan D dan memiliki standar deviasi sebesar σ .
2. *Green production* menghasilkan tingkat emisi karbon yang lebih rendah tetapi memerlukan biaya yang lebih mahal.
3. Kebijakan pajak emisi karbon T_E diimplementasikan oleh pemerintah untuk menekan jumlah emisi.
4. Kapasitas penyimpanan pamanufaktur dan pengecer tidak terbatas.
5. Jumlah produk yang dikirimkan oleh pamanufaktur ke pengecer pada tiap proses pengiriman memiliki jumlah yang sama sebesar Q .
6. *Lead time* pengiriman dari pamanufaktur ke pengecer bergantung pada waktu produksi dan pengiriman produk $L(Q) = \frac{Q}{p} + T_s$

Notasi

Parameter untuk pengecer

- D : Rata-rata permintaan (unit/tahun)
 d : Permintaan dasar (unit/tahun)
 γ_1 : Sensitivitas faktor harga jual pengecer ($\gamma_1 > 0$)
 σ : Standar deviasi permintaan (unit/tahun)
 A : Biaya pesan (\$/pesan)
 F : Biaya transportasi (\$/pengiriman)
 h_b : Biaya simpan pengecer (\$/unit/tahun)
 π : Biaya *backorder* (\$/unit)
 T_s : Waktu transportasi beserta waktu *delay*, *setup*, dan waktu non-produktif (tahun)
 L : *Lead time* (tahun)
 W_b : Jumlah emisi yang dihasilkan oleh aktivitas penyimpanan pada pengecer (kgCO₂/unit/tahun)
 T_E : Pajak emisi karbon (\$/kgCO₂)
 ϑ_{T1} : Emisi tidak langsung yang dihasilkan oleh aktivitas pengiriman (kgCO₂/L)
 ϑ_{T2} : Emisi langsung yang dihasilkan oleh aktivitas pengiriman (kgCO₂/kg)
 ε : Bahan bakar transportasi (L/km)
 J_b : Jarak yang ditempuh transportasi (km)
 m : Massa produk (kg/unit)

Parameter untuk pamanufaktur

- P : Tingkat produksi (unit/tahun)
 p_t : Biaya bahan baku (\$/unit)
 $K_{g/r}$: Biaya *setup* untuk *green production* (*regular production*) (\$/setup)
 h_m : Biaya simpan pamanufaktur (\$/unit/tahun)
 $W_{g/r}$: Jumlah emisi yang dihasilkan oleh aktivitas penyimpanan dari *green production* (*regular production*) (kgCO₂/unit/tahun)
 T_E : Pajak emisi karbon (\$/kgCO₂)
 $X_{g/r1}$: Biaya per unit waktu pada *green production* (*regular production*) untuk menjalankan mesin produksi (\$/tahun)
 $X_{g/r2}$: Penambahan biaya per unit waktu pada *green production* (*regular production*) karena penambahan 1 unit tingkat produksi (\$/tahun/unit²)
 $a_{g/r}$: Parameter emisi pada proses *green production* (*regular production*) (kg CO₂ tahun²/unit³)
 $b_{g/r}$: Parameter emisi pada proses *green production* (*regular production*) (kg CO₂ tahun/unit²)

- $c_{g/r}$: Parameter emisi pada proses *green production (regular production)* (kg CO₂ /unit)
- α : Tingkat investasi untuk *green production* ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- β : Parameter untuk proyek *green investment* (\$/tahun)

Variabel keputusan

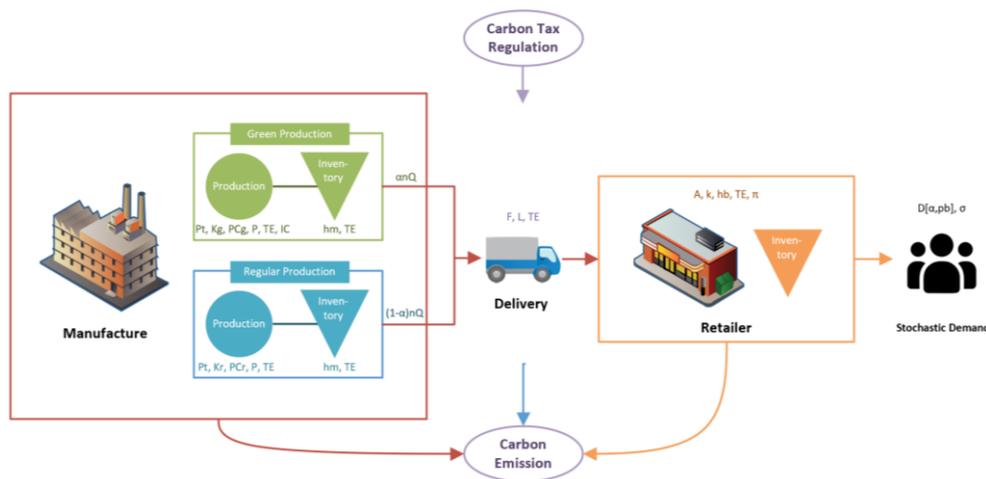
- p_b : Harga jual produk pengecer (\$/unit)
- Q : *Lot size* pengiriman (unit)
- k : *Safety factor*
- n : Jumlah pengiriman per *batch* produksi (kali)

Model Dasar

Dalam model ini, permintaan yang diterima pengecer bersifat stokastik dan bergantung pada harga jual produk yang diberikan pengecer sesuai dengan Persamaan 1. Fungsi permintaan ini mengacu pada model Sarakhsi et al. [17], dengan d merupakan permintaan dasar yang tidak bergantung pada variabel lain.

$$D(p_b) = d - \gamma_1 p_b \tag{1}$$

Pengecer akan memesan sebanyak nQ unit produk ke pamanufaktur. Pamanufaktur akan memenuhi pesanan tersebut dengan menggunakan *green production* dan/atau *regular production*. Pamanufaktur akan mengalokasikan sebanyak αnQ unit ke *green production* dan sebanyak $(1-\alpha)nQ$ unit ke *regular production*.



Gambar 2. Model Persediaan pada Penelitian

Biaya Pamanufaktur

Pamanufaktur akan mendapatkan penghasilan dari penjualan produk ke pengecer sesuai dengan Persamaan (2).

$$RM = p_m \times D \tag{2}$$

Untuk menjalankan proses produksi, pamanufaktur perlu membeli bahan baku dari pemasok. Besarnya biaya yang ditanggung pamanufaktur untuk bahan baku diformulasikan pada Persamaan (3) dan (4).

$$MC_g = p_t \alpha D \tag{3}$$

$$MC_r = p_t (1 - \alpha) D \tag{4}$$

Untuk menjalankan produksi, pamanufaktur mengeluarkan biaya untuk *setup* produksi. Biaya *setup* untuk *green production* lebih mahal dibandingkan dengan *regular production* ($K_g > K_r$).

$$SC_g = \frac{DK_g}{nQ} \quad (5)$$

$$SC_r = \frac{DK_r}{nQ} \quad (6)$$

Biaya untuk *green production* lebih mahal dibandingkan dengan *regular production* ($X_{g1}, X_{g2} > X_{r1}, X_{r2}$).

$$PC_g = \left(\frac{X_{g1}}{\alpha P} + X_{g2} \alpha P \right) \alpha D \quad (7)$$

$$PC_r = \left(\frac{X_{r1}}{(1-\alpha)P} + X_{r2} (1-\alpha)P \right) (1-\alpha)D \quad (8)$$

Rata-rata penyimpanan pada pamanufaktur ditunjukkan pada Persamaan (9) dan (10) di mana total biaya yang dikeluarkan dari aktivitas ini diformulasikan pada Persamaan (11).

$$INV_g = \frac{\alpha Q}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) \quad (9)$$

$$INV_r = \frac{(1-\alpha)Q}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) \quad (10)$$

$$H_m = h_m (INV_g + INV_r) \quad (11)$$

Biaya investasi keluar jika pamanufaktur mulai menggunakan *green production*. Formulasi biaya investasi mengacu pada model Jauhari et al [18].

$$IM_g = \frac{1}{2} \beta \alpha^2 \quad (12)$$

Emisi karbon yang dihasilkan oleh pamanufaktur berasal dari aktivitas produksi dan penyimpanan. Persamaan (13) dan (14) menunjukkan jumlah emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas produksi dengan $a_g, c_g < a_r, c_r$.

$$TEM_{produksi_g} = (a_g (\alpha P)^2 - b_g (\alpha P) + c_g) \quad (13)$$

$$TEM_{produksi_r} = (a_r ((1-\alpha)P)^2 - b_r ((1-\alpha)P) + c_r) \quad (14)$$

Pada aktivitas penyimpanan, terdapat parameter emisi karbon W_g dan W_r dari per unit produk.

$$TEM_{storage_g} = W_g \times INV_g \quad (15)$$

$$TEM_{storage_r} = W_r \times INV_r \quad (16)$$

Untuk memudahkan notasi, digunakan persamaan sebagai berikut.

$$Z1 = n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \quad (17)$$

Dari rincian biaya-biaya di atas, total keuntungan pemufaktur dapat dijabarkan sesuai dengan persamaan (18).

$$\begin{aligned} PM = & \left(p_t \alpha D - \frac{\alpha DK_g}{n \alpha Q} + (h_m + T_E W_g) \frac{\alpha Q}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) + \left(\frac{X_{g1}}{\alpha P} + X_{g2} \alpha P \right) \alpha D \right. \\ & + T_E \alpha D (a_g (\alpha P)^2 - b_g (\alpha P) + c_g) + \frac{1}{2} \beta \alpha^2 + p_t (1-\alpha) D \\ & + \frac{(1-\alpha) DK_r}{n(1-\alpha)Q} + (h_m + T_E W_r) \frac{(1-\alpha)Q}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) \\ & + \left(\frac{X_{r1}}{(1-\alpha)P} + X_{r2} (1-\alpha)P \right) (1-\alpha) D \\ & \left. + T_E (1-\alpha) D (a_r ((1-\alpha)P)^2 - b_r ((1-\alpha)P) + c_r) \right) \quad (18) \end{aligned}$$

Biaya Pengecer

Pengecer akan mendapatkan penghasilan dari hasil penjualan produk ke konsumen sesuai dengan Persamaan (19).

$$RB = p_b \times D \quad (19)$$

Pengecer akan memesan nQ unit kepada pemanufaktur dengan menanggung biaya pemesanan yang terdiri atas biaya pesan A dan biaya transportasi F .

$$OTC = \frac{D}{nQ} (A + nF) \quad (20)$$

Sistem persediaan yang diterapkan oleh pengecer adalah sistem *continuous review*. Sistem ini memberlakukan pemesanan ulang terhadap pemanufaktur jika persediaan sudah mencapai *re-order point*. Persamaan (21) menunjukkan jumlah rata-rata persediaan di pengecer dan Persamaan (22) menunjukkan total biaya penyimpanan pengecer.

$$INV_b = \frac{Q}{2} + k\sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \quad (21)$$

$$H_b = h_b \left(\frac{Q}{2} + k\sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \right) \quad (22)$$

Jika dalam masa *lead time* pengiriman produk dari pemanufaktur ke pengecer terdapat *shortage*, permintaan itu akan dianggap *backorder* dengan biaya sebesar π per unitnya.

$$ESC = \frac{\pi D \sigma}{Q} \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \psi(k) \quad (23)$$

Dalam model ini, emisi karbon yang dihasilkan dari pihak pengecer terjadi karena aktivitas pengiriman dan penyimpanan. Pada aktivitas pengiriman terdapat ϑ_{T1} dan ϑ_{T2} , yaitu parameter emisi tidak langsung dan langsung. Pada aktivitas penyimpanan terdapat W_b sebagai parameter jumlah emisi karbon.

$$TEB_{transport} = \frac{D}{Q} \vartheta_{T1} \varepsilon J + \vartheta_{T2} m D \quad (24)$$

$$TEB_{storage} = W_b \left(\frac{Q}{2} + k\sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \right) \quad (25)$$

Untuk memudahkan notasi, digunakan persamaan sebagai berikut.

$$Z2 = \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \quad (26)$$

Sehingga total keuntungan pengecer dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$PB = (p_b \times D) - \left(\frac{D}{nQ} (A + nF) + (h_b + T_E W_b) \left(\frac{Q}{2} + k\sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \right) + T_E \left(\frac{D}{Q} \vartheta_{T1} \varepsilon J + \vartheta_{T2} m D \right) + \frac{\pi D \sigma}{Q} \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \psi(k) \right) \quad (27)$$

Total Keuntungan Gabungan

Dari persamaan pendapatan yang didapatkan dan biaya yang dikeluarkan oleh pemanufaktur dan pengecer, maka total keuntungan yang didapatkan dapat diformulasikan seperti Persamaan (28).

$$\begin{aligned}
 JTP = p_b \times D - \frac{D}{nQ} (A + nF) - (h_b + T_E W_b) & \left(\frac{Q}{2} + k\sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \right) - T_E \left(\frac{D}{Q} \vartheta_{T_1} \varepsilon J + \vartheta_{T_2} mD \right) \\
 - \frac{\pi D \sigma}{Q} \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \psi(k) - \frac{DK_g}{nQ} - (h_m + T_E W_g) & \frac{\alpha Q}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) \\
 - \left(\frac{X_{g1}}{\alpha P} + X_{g2} \alpha P \right) \alpha D - T_E \alpha D (a_g (\alpha P)^2 - b_g (\alpha P) + c_g) - p_t \alpha D - \frac{1}{2} \beta \alpha^2 & \quad (28) \\
 - \frac{DK_r}{nQ} - (h_m + T_E W_r) \frac{(1 - \alpha) Q}{2} & \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) \\
 - \left(\frac{X_{r1}}{(1 - \alpha) P} + X_{r2} (1 - \alpha) P \right) (1 - \alpha) D & \\
 - T_E (1 - \alpha) D (a_r ((1 - \alpha) P)^2 - b_r ((1 - \alpha) P) + c_r) - p_t (1 - \alpha) D &
 \end{aligned}$$

Dalam mencari solusi yang optimal pada model ini dilakukan turunan parsial dari total keuntungan gabungan (JTP) terhadap Q , k , dan p_b . Untuk nilai n dan α ($0 < \alpha < 1$) diasumsikan memiliki nilai yang tetap pada algoritma. Dengan menetapkan turunan parsial total keuntungan gabungan (JTP) terhadap Q , k , dan p_b sama dengan nol, maka dapat didapatkan persamaan Q , k , dan p_b sebagai berikut.

$$Q = \sqrt{\frac{\frac{D}{n} (A + nF) + T_E D \vartheta_{T_1} \varepsilon J + \pi D \sigma \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \psi(k) + \frac{DK_g}{n} + \frac{DK_r}{n}}{(h_b + W_b) \left(\frac{1}{2} + \frac{k\sigma}{2P \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s}} \right) + \frac{\pi D \sigma \psi(k)}{2QP \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s}} + \frac{(h_m + T_E W_g) \alpha}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right) + \frac{(h_m + T_E W_r) (1 - \alpha)}{2} \left(n \left[1 - \frac{D}{P} \right] - 1 + \frac{2D}{P} \right)} \quad (29)$$

$$F_s(k) = 1 - \frac{(h_b + T_E W_b) Q}{\pi D} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 p_b = \frac{1}{2\gamma_2} \left(d + \gamma_1 \alpha + \frac{\gamma_2}{nQ} (A + nF) + T_E \gamma_2 \left(\frac{\vartheta_{T_1} \varepsilon J}{Q} + m \vartheta_{T_2} \right) + \frac{\gamma_2 \pi \sigma}{Q} \sqrt{\frac{Q}{P} + T_s} \psi(k) + \frac{\gamma_2 K_g}{nQ} \right. \\
 - \frac{(h_m + T_E W_g) \alpha Q}{2} \left(\frac{\gamma_2 n}{P} - \frac{2\gamma_2}{P} \right) + \left(\frac{X_{g1}}{\alpha P} + X_{g2} \alpha P \right) \alpha \gamma_2 \\
 + T_E \alpha \gamma_2 (a_g (\alpha^2 P^2) - b_g \alpha P + c_g) + p_t \alpha \gamma_2 + \frac{\gamma_2 K_r}{nQ} \\
 - \frac{(h_m + T_E W_r) (1 - \alpha) Q}{2} \left(\frac{\gamma_2 n}{P} - \frac{2\gamma_2}{P} \right) + \left(\frac{X_{r1}}{(1 - \alpha) P} + X_{r2} (1 - \alpha) P \right) (1 - \alpha) \gamma_2 \\
 \left. + T_E (1 - \alpha) \gamma_2 (a_r (1 - \alpha)^2 P^2 - b_r (1 - \alpha) P + c_r) + p_t (1 - \alpha) \gamma_2 \right) \quad (31)
 \end{aligned}$$

Algoritma

Dalam mencari solusi yang optimal, persamaan-persamaan di atas dimasukkan ke dalam algoritma perhitungan sesuai dengan model Jauhari et al [6]. Berikut merupakan penjabaran langkah-langkah dalam algoritma pencarian solusi optimal.

- (1). Tetapkan $n = 1$ dan $JTP_{n-1}(p_{bn-1}, Q_{n-1}, k_{n-1}, n) = 0$.
- (2). Tetapkan nilai inisial untuk Q , k , dan p_b untuk iterasi pertama dan menentukan nilai D .
- (3). Hitung Q dengan menggunakan Persamaan (29) untuk disubsitusikan pada Persamaan (30) dan (31) untuk mencari k dan p_b selanjutnya.
- (4). Gunakan nilai $Q_n = Q$, $k_n = k$, dan $p_{bn} = p_b$ dan hitung $JTP_n(p_{bn}, Q_n, k_n, n)$ dengan menggunakan Persamaan (28).

- (5). Jika $JTP_n(p_{bn}, Q_n, k_n, n) \geq JTP_{n-1}(p_{bn-1}, Q_{n-1}, k_{n-1}, n-1)$ maka ulangi langkah 2-6 dengan $n = n + 1$, jika tidak lakukan langkah 8.
- (6). Atur $JTP_{n-1}(p_{bn-1}, Q_{n-1}, k_{n-1}, n-1) = JTP(p_b, Q, k, n)$ sebagai nilai maksimum dari total keuntungan gabungan dengan p_b, Q, k , dan n sebagai solusi dalam pemecahan masalah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Contoh Numerik

Untuk memperlihatkan contoh permasalahan model persediaan di atas, digunakan *data set* sebagai nilai parameter contoh perhitungan. Nilai parameter diambil dari penelitian Jauhari et al [6].

Tabel 2. Parameter Manufaktur untuk Contoh Numerik

Parameter Manufaktur			
P	3,200 unit	X_{r1}	\$20,000
p_t	\$200	X_{r2}	\$0.004
p_m	\$300	a_g	0.0000007 kg CO ₂ tahun ² /unit ³
K_g	\$400	b_g	0.0012 kg CO ₂ tahun/unit ²
K_r	\$400	c_g	1.4 kg CO ₂ /unit
h_m	\$0.5	a_r	0.0000012 kg CO ₂ tahun ² /unit ³
W_g	5 KgCO ₂	b_r	0.0008 kg CO ₂ tahun/unit ²
W_r	5 KgCO ₂	c_r	8.4 kg CO ₂ /unit
T_E	\$0.006	α	0.5
X_{g1}	\$25,000	β	\$10,000
X_{g2}	\$0.006		

Tabel 3. Parameter Pengecer untuk Contoh Numerik

Parameter Pengecer			
d	1,000 unit	W_b	10 KgCO ₂
γ_1	1.5	T_E	\$0.06
σ	5 unit	ϑ_{T1}	2.6 KgCO ₂ /L
A	\$100	ϑ_{T2}	2.5 KgCO ₂ /kg
F	\$50	ε	0.3 L/km
h_b	\$1	J_b	400 km
π	\$50	m	0.5 kg
T_s	0.05 tahun		

Dalam contoh perhitungan ini, diasumsikan manufaktur menggunakan kedua fasilitas produksi ($\alpha=0.5$). Dengan menggunakan prosedur algoritma yang dijelaskan di atas, didapatkan hasil yang optimal dari model yang diusulkan. Hasil perhitungan ini diringkas pada Tabel 4 dan 5. Dari tabel tersebut, didapatkan variabel keputusan yang optimal dengan harga jual pengecer sebesar \$446.45, *lot size* pengiriman sebesar 91.75, *safety factor* sebesar 2.35, dan jumlah pengiriman per *batch* sebanyak 7 kali. Total biaya yang dikeluarkan manufaktur untuk *green production* adalah sebesar \$38,758.55 dan untuk *regular production* adalah \$36,555.05. Total biaya yang dikeluarkan oleh pengecer adalah sebesar \$99,471.84. Total keuntungan yang didapatkan manufaktur adalah sebesar \$23,772.65. Total keuntungan yang didapatkan oleh pengecer adalah sebesar \$47,993.27. Sehingga total keuntungan gabungan pada *supply chain* adalah sebesar \$71,765.91.

Tabel 4. Output Nilai Variabel Keputusan Optimal dari Contoh Numerik

teve	Nilai
p_b	\$ 446.45
Q	91.75
k	2.35
n	7
D	330.33

Tabel 5. Output Biaya Optimal dari Contoh Numerik

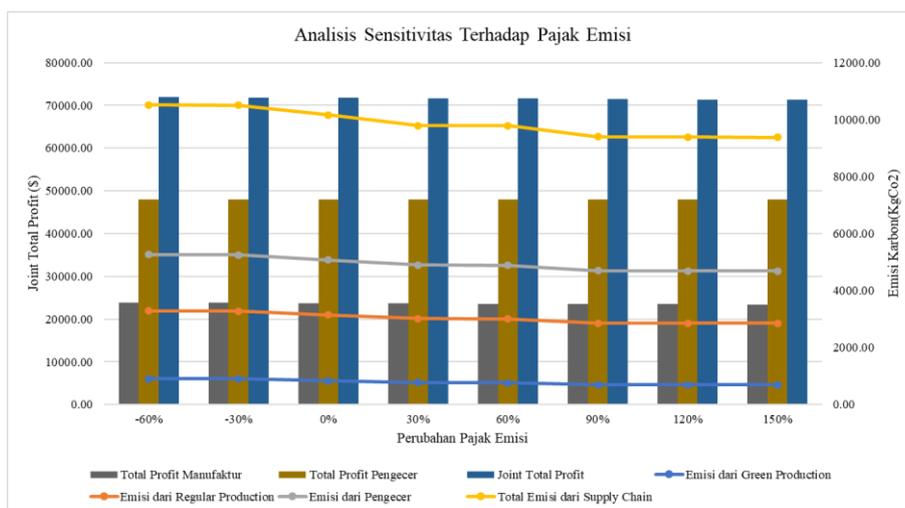
Biaya	Nilai
Total biaya manufaktur (<i>green production</i>)	\$ 38,758.55
Total biaya manufaktur (<i>regular production</i>)	\$ 36,555.05
Total biaya pengecer	\$ 99,471.84
Total keuntungan manufaktur	\$ 23,772.65
Total keuntungan pengecer	\$ 47,993.27
Total keuntungan gabungan	\$ 71,765.91

Analisis Sensitivitas terhadap Pajak Emisi Karbon

Adanya peningkatan nilai pajak emisi karbon akan menurunkan total emisi karbon yang dihasilkan dari manufaktur dan pengecer, sehingga total emisi karbon dalam *supply chain* akan menurun. Selain itu, keuntungan yang didapatkan oleh manufaktur dan pengecer akan mengalami penurunan, sehingga total keuntungan gabungan juga akan menurun.

Perubahan nilai pajak emisi karbon juga mempengaruhi variabel keputusan yang ditetapkan. Adanya peningkatan nilai pajak emisi akan meningkatkan harga jual pengecer dan jumlah *lot size* pengiriman. Hal ini berbanding terbalik dengan nilai *safety factor* dan jumlah pengiriman per *batch*, di mana nilai-nilai tersebut akan menurun seiring dengan peningkatan nilai pajak emisi karbon.

Ketika nilai pajak emisi karbon meningkat atau relatif mahal, pengecer akan meningkatkan harga jual produk kepada konsumen. *Lot size* pengiriman juga akan ditingkatkan dalam sekali pengiriman, sehingga jumlah pengiriman per *batch* akan menurun untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas pengiriman.



Gambar 3. Grafik Perubahan Model Terhadap Perubahan Pajak Emisi

Tabel 6. Perubahan Numerik Terhadap Perubahan Pajak Emisi

Pajak Emisi		0.02472 -60%	0.04326 -30%	0.0618 0%	0.08034 30%	0.09888 60%	0.11742 90%	0.13596 120%	0.1545 150%
Variabel Keputusan	pb	446.21	446.32	446.45	446.58	446.69	446.83	446.94	447.04
	Q	87.42	86.87	91.75	97.84	97.46	105.28	104.97	104.67
	k	2.44	2.41	2.35	2.30	2.27	2.21	2.19	2.16
	n	8	8	7	6	6	5	5	5
Keuntungan	Manufaktur	23932.43	23856.71	23772.65	23688.28	23618.08	23534.13	23466.90	23399.80
	Pengecer	48030.97	48006.22	47993.27	47982.71	47959.75	47952.53	47930.51	47908.48
	JTP	71963.40	71862.93	71765.91	71670.99	71577.83	71486.67	71397.42	71308.28

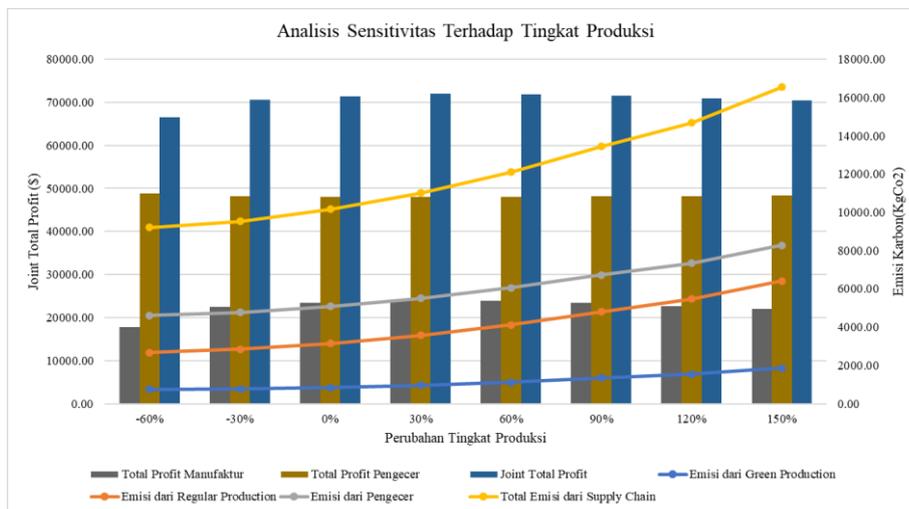
Analisis Sensitivitas terhadap Tingkat Produksi

Adanya peningkatan tingkat produksi akan meningkatkan total emisi karbon yang dihasilkan dari manufaktur dan pengecer, sehingga total emisi karbon dalam *supply chain*

akan meningkat. Selain itu, keuntungan yang didapatkan oleh manufaktur akan mengalami penurunan, sedangkan keuntungan yang didapatkan oleh pengecer akan meningkat.

Perubahan tingkat produksi juga mempengaruhi variabel keputusan yang ditetapkan. Adanya peningkatan tingkat produksi akan menurunkan harga jual produk, jumlah *lot size* pengiriman, *safety factor*, dan jumlah pengiriman per *batch*. Hal ini berbanding terbalik dengan nilai *safety factor* dan jumlah pengiriman per *batch*, di mana nilai-nilai tersebut akan menurun seiring dengan tingkat produksi.

Peningkatan tingkat produksi akan meningkatkan total emisi karbon karena adanya produksi yang cepat. Hal ini akan mempengaruhi biaya pajak emisi karbon yang dikeluarkan dalam *supply chain*, terutama pada manufaktur. Dari perhitungan, didapatkan total keuntungan yang didapatkan manufaktur akan menurun seiring dengan meningkatnya tingkat produksi. Biaya pajak emisi karbon dari aktivitas produksi dan penyimpanan produk yang perlu dibayar manufaktur akan ikut meningkat. Nilai *safety factor* akan ikut menurun untuk mengurangi *safety stock* dan juga biaya penyimpanan produk pada pengecer. Jumlah pengiriman per *batch* juga akan menurun karena adanya tingkat produksi produk yang tinggi.



Gambar 4. Grafik Perubahan Model Terhadap Perubahan Tingkat Produksi

Tabel 7. Perubahan Numerik Terhadap Perubahan Tingkat Produksi

Tingkat Produksi		1280	2240	3200	4160	5120	6080	7040	8000
		-60%	-30%	0%	30%	60%	90%	120%	150%
Variabel Keputusan	pb	454.02	447.99	446.45	446.31	446.79	447.60	448.64	449.80
	Q	86.94	91.98	91.75	91.49	91.20	90.91	97.15	96.83
	k	2.36	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.33	2.33
	n	8	7	7	7	7	7	6	6
Keuntungan	Manufaktur	17766.22	22430.29	23397.65	24038.64	23823.68	23352.81	22718.28	21998.61
	Pengecer	48747.10	48162.60	47993.27	47977.13	48030.35	48119.17	48239.31	48358.01
	JTP	66513.32	70592.89	71390.91	72015.77	71854.03	71471.97	70957.60	70356.62

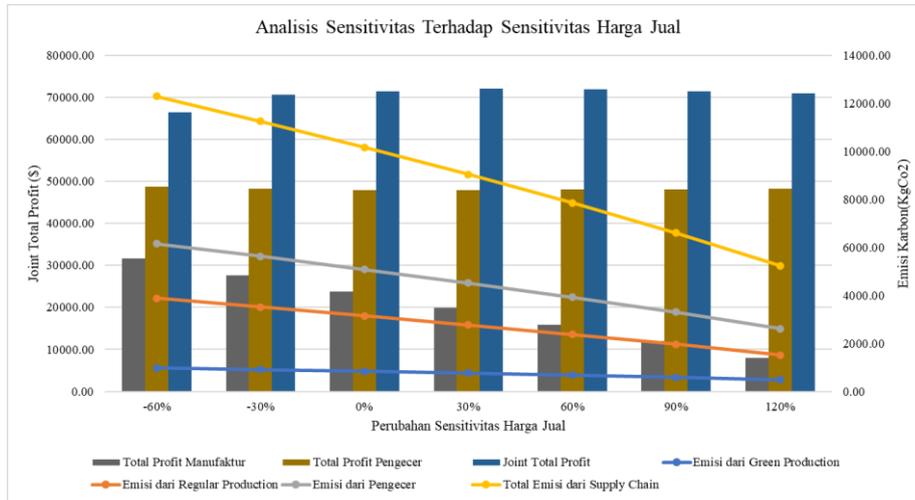
Analisis Sensitivitas terhadap Sensitivitas Faktor Harga Jual

Adanya peningkatan sensitivitas harga jual akan menurunkan total emisi karbon yang dihasilkan dari manufaktur dan pengecer, sehingga total emisi karbon dalam *supply chain* akan menurun. Selain itu, keuntungan yang didapatkan oleh manufaktur dan pengecer akan mengalami penurunan, sehingga total keuntungan gabungan juga akan menurun.

Perubahan sensitivitas harga jual juga mempengaruhi variabel keputusan yang ditetapkan. Adanya peningkatan sensitivitas harga jual akan menurunkan harga jual pengecer jumlah *lot size* pengiriman, *safety factor*, dan jumlah pengiriman per *batch*.

Peningkatan sensitivitas harga jual akan menurunkan tingkat permintaan pada *supply chain*. Pengecer akan menurunkan harga jual produk agar produk yang dijual dapat memenangkan pasar dan menarik konsumen untuk membeli produk tersebut. Jumlah *lot size*

yang dikirim dari manufaktur ke pengecer akan dikurangi untuk mengurangi biaya penyimpanan serta biaya pajak emisi karbon dari aktivitas pengiriman dan penyimpanan produk. *Safety factor* akan ikut menurun untuk mengurangi *safety stock* yang ada pada pengecer karena tingkat permintaan yang menurun.



Gambar 5. Grafik Perubahan Model Terhadap Perubahan Sensitivitas Harga Jual

Tabel 8. Perubahan Numerik Terhadap Perubahan Sensitivitas Harga Jual

Sensitivitas Faktor	Harga Jual	0.6	1.05	1.5	1.95	2.4	2.85	3.3
		-60%	-30%	0%	30%	60%	90%	120%
Variabel Keputusan	pb	946.30	589.22	446.45	369.62	321.68	288.97	265.34
	Q	105.52	98.85	91.75	84.13	75.82	66.52	55.71
	k	2.40	2.38	2.35	2.33	2.29	2.25	2.19
	n	7	7	7	7	7	7	7
Keuntungan	Manufaktur	31601.10	27688.29	23772.65	19852.51	15924.79	11983.13	8011.62
	Pengecer	278901.44	109872.01	47993.27	19092.18	4629.50	-2217.81	-4534.72
	JTP	310502.54	137560.30	71765.91	38944.68	20554.28	9765.32	3476.90

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model persediaan pada *supply chain* yang terdiri atas dua pihak, yaitu pamanufaktur dan pengecer di bawah kebijakan pajak emisi karbon. Peneliti memanfaatkan model *hybrid production* pada manufaktur, yang terdiri atas *green production* dan *regular production*. Model ini bertujuan untuk memaksimalkan total keuntungan gabungan pada *supply chain* dengan tingkat permintaan yang bergantung pada harga jual produk pengecer. Untuk mendapatkan keuntungan yang maksimal, dapat diperoleh variabel keputusan yang optimal, yaitu harga jual produk pengecer, *lot size* pengiriman, *safety factor*, dan jumlah pengiriman per *batch*.

Seorang manajer dapat memanfaatkan model ini untuk mengatur persediaan dalam *supply chain* dengan mempertimbangkan *trade-off* antara ekonomi dan lingkungan, yaitu biaya yang dikeluarkan dan emisi karbon yang dihasilkan. Manajer dapat mengatur aktivitas-aktivitas dalam *supply chain* untuk mempertimbangkan emisi karbon yang dihasilkan serta membayar pajak emisi karbon yang dikeluarkan oleh pemerintah.

Hasil dari analisis sensitivitas menyajikan perubahan biaya dari beberapa skenario. Manajer harus dapat mempertimbangkan variabel keputusan untuk menyeimbangi emisi karbon dan keuntungan yang akan didapatkan. Pertama, jika nilai pajak emisi karbon ditingkatkan oleh pemerintah, manajer harus dapat menyesuaikan pengiriman dan penjualan produk. *Lot size* pengiriman perlu ditingkatkan, sedangkan jumlah pengiriman per *batch* perlu dikurangi untuk mengurangi jumlah emisi karbon yang dihasilkan dalam pengiriman. *Safety factor* untuk pengendalian persediaan di pengecer juga perlu dikurangi untuk mengurangi *safety stock* sehingga dapat meminimkan emisi karbon dari aktivitas

penyimpanan. Kedua, manajer perlu mempertimbangkan harga jual ke konsumen jika terjadi peningkatan sensitivitas harga jual. Dengan adanya peningkatan sensitivitas terhadap harga jual produk, tingkat permintaan konsumen akan cenderung turun, sehingga manajer perlu menyeimbangi variabel keputusan agar total keuntungan dapat dipertahankan. Ketiga, dengan adanya perubahan tingkat produksi, manajer manufaktur perlu mempertimbangkan biaya pajak emisi karbon yang akan dikeluarkan karena adanya aktivitas produksi dan penyimpanan produk. Adanya produksi produk berlebih dapat meningkatkan total emisi karbon yang berlebih, hal ini dapat mempengaruhi biaya pajak emisi karbon yang dikeluarkan.

Secara aktual, beberapa batasan yang digunakan pada model persediaan ini juga perlu diperhitungkan. Pertama, pada model ini manufaktur selalu memproduksi produk yang sempurna, di mana ini cenderung tidak aktual pada kehidupan nyata. Kedua, pada model ini kebijakan karbon yang digunakan hanyalah kebijakan pajak emisi karbon yang diterapkan oleh pemerintah. Ada beberapa jenis kebijakan karbon lain yang dapat diterapkan di kehidupan nyata, seperti *carbon cap* dan *carbon cap and trade*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, Global CO₂ emissions rebounded to their highest level in history in 2021, March 2022. <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>
- [2] Customer Data Platform, “Transparency to Transformation: A Chain Reaction”, 2022. [Online]. Available: <https://www.cdp.net/> [Accessed May. 30, 2023].
- [3] A. Ghosh, J.K. Jha, and S.P. Sarmah, Optimal Lot-Sizing Under Strict Carbon Cap Policy Considering Stochastic Demand, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 44, pp. 688-704, 2017.
- [4] I. D. Paul, G. P. Bhole, J. R. Chaudhari, A Review on Green Manufacturing: It's Important, Methodology and its Application, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 1644-1649, 2014.
- [5] U. Mishra, J. Z. Wu, and B. Sarkar, A Sustainable Production-Inventory Model for a Controllable Carbon Emissions Rate Under Shortages, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, No. 20, 2020.
- [6] W. A. Jauhari, I. N. Pujawan, M. Suef, and K. Govindan, Low Carbon Inventory Model for Vendor–Buyer System with Hybrid Production and Adjustable Production Rate Under Stochastic Demand, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 108, pp. 840-868, 2022.
- [7] T. P. Varela, A. P. F.D. Barbosa-Póvoa, and A. Q. Novais, Supply Chain Design and Planning with Environmental Impacts: An RTN approach, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 29, pp. 1155-1159, 2011.
- [8] R. S. Pindyck, and D. L. Rubinfeld, *Microeconomics 8th Editions*, 2013 www.myeconlab.com
- [9] T. Hadi, S. K. Chaharsooghi, M. Sheikhmohammady, and A. Hafezalkotob, Pricing Strategy for a Green Supply Chain with Hybrid Production Modes Under Government Intervention, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 268, No. 20, 2020.
- [10] S. Sarkar, N. M. Modak, B. C. Giri, A. Kr. Sarkar, and L. E. C. Barrón, Coordinating a Supplier–Retailer JELS Model Considering Product Quality Assessment and Green Retailing, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 356, No. 1, 2022.
- [11] Kadin Net Zero Hub, “Industri Fashion Global Menuju Rendah Emisi Karbon para. 7, Sept 22, 2022. [Online]. Available: <https://netzerohub.id/> [Accessed May. 30, 2023].
- [12] G. Hua, T.C.E. Cheng, and S. Wang, Managing Carbon Footprints in Inventory Management, *International Journal of Production Economics*, Vol. 132, No. 2 pp. 178-185, 2011.

- [13] M. Y. Jaber, C. H. Glock, and A. M. A. El Saadany, Supply Chain Coordination with Emissions Reduction Incentives, *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 1, pp. 69-82, 2013.
- [14] J. M. C. Martí, J. S. Tancrez, and R. W. Seifert, Carbon Footprint and Responsiveness Trade-offs in Supply Chain Network Design, *International Journal of Production Economics*, Vol. 166, pp. 129-142, 2015.
- [15] G. X. Lou, H. Y. Xia, J. Q. Zhang and T. J. Fan, Investment Strategy of Emission-Reduction Technology in a Supply Chain, *Sustainability*, Vol. 7, No. 8, 2015.
- [16] A. Sepehri, Controllable carbon emissions in an inventory model for perishable items under trade credit policy for credit-risk customers, *Carbon Capture Science & Technology*, Vol. 1, 2021.
- [17] M. K. Sarakhsi, S.M.T. F. Ghomi, and B. Karimi, Joint Economic Lot-Sizing Problem for a Two-Stage Supply Chain with Price-Sensitive Demand, *Scientia Iranica*, Vol. 23, No. 3, pp. 1474-1487, 2016.
- [18] W. A. Jauhari, N. A. F. P. Adam, C. N. Rosyidi, I. N. Pujawan, and N. H. Shah, A Closed-Loop Supply Chain Model with Rework, Waste Disposal, and Carbon Emissions, *Operations Research Perspectives*, Vol. 7, 2020.