

# PENGARUH CARBON CAP DAN NONCONFORMING PRODUCTS DALAM SUPPLY CHAIN DENGAN MULTI MODAL TRANSPORTATION

Sayogo Utomo\*<sup>1</sup>, Yosef Daryanto<sup>2</sup>

Departemen Teknik Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta<sup>1,2</sup>  
Email : [yohannessayogoutomo@gmail.com](mailto:yohannessayogoutomo@gmail.com) \*<sup>1</sup>, [yosef.daryanto@uajy.ac.id](mailto:yosef.daryanto@uajy.ac.id) <sup>2</sup>

**Abstract:** Carbon emissions are one of the causes of global warming. Thus, it is necessary to limit carbon emissions to reduce the impact. In this study, carbon restriction is associated with the supply chain of a product based on the carbon cap system. In addition, the fulfillment of market demand is also an important factor. With these factors, the objective function of the developed supply chain model is to optimize the number of products shipped to minimize the total costs incurred by not exceeding the specified carbon emission limits. The supply chain has several factories, several demand periods, and several customers that will be considered in the model. In addition, there is a combination of 2 types of transportation mode. Trucks are used for delivery from the factory to the departure station and from the destination station to the customers whereas the trains are used to send the product from the departure station to the destination station. During shipping, there are several nonconforming products. The obtained supply chain model is solved by Integer Linear Programming with the help of Lingo software. The experiment was carried out by changing the amount of carbon cap on the system to see the impact. From the results, it was found that there is a minimum limit of carbon cap so that the supply chain can run well. The greater the value of the carbon cap, the lower the total cost of the running supply chain and at a certain point the total cost will not change.

**Keywords:** supply chain; carbon cap; multimodal transportation; Integer Linear Programming

**Abstrak:** Emisi karbon merupakan salah satu masalah yang menyebabkan meningkatnya suhu bumi. Dengan demikian, diperlukan pembatasan emisi karbon demi mengurangi dampak yang dapat dirasakan. Dalam penelitian ini, pembatasan karbon dihubungkan dengan *supply chain* sebuah produk berdasarkan *carbon cap system*. Selain itu, pemenuhan permintaan pasar juga merupakan faktor penting yang diperlukan dalam sebuah *supply chain*. Dengan faktor-faktor ini, fungsi tujuan dari model *supply chain* yang dikembangkan adalah mengoptimalkan jumlah produk yang dikirimkan, agar meminimalkan total biaya yang dikeluarkan dengan tidak melebihi batas emisi karbon yang ditentukan. *Supply chain* yang dianalisis memiliki beberapa pabrik, beberapa periode permintaan dan beberapa pelanggan yang akan dipertimbangkan dalam model yang dibentuk. Selain itu, terdapat kombinasi 2 macam transportasi yang digunakan. Truk digunakan untuk pengiriman dari pabrik ke stasiun awal dan dari stasiun akhir ke pelanggan sedangkan kereta digunakan untuk mengirim produk dari stasiun awal ke stasiun tujuan. Saat pengiriman berlangsung, terdapat sejumlah *nonconforming product* yang terbuang. Model *supply chain* yang didapatkan merupakan *Integer Linear Programming* model yang dapat diselesaikan dengan bantuan *software Lingo*. Percobaan dilakukan dengan mengubah besarnya *carbon cap* pada sistem untuk dilihat dampak yang diberikan. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa terdapat batas minimal dari *carbon cap* agar *supply chain* dapat berjalan dengan baik. Semakin besar nilai *carbon cap* maka semakin rendah *total cost* dari *supply chain* yang berjalan dan pada satu titik tertentu *total cost* tidak akan berubah.

**Kata kunci:** rantai pasok; batas karbon; multimodal transportation; *Integer Linear Programming*

## 1. PENDAHULUAN

Tingginya emisi karbon akibat aktivitas manusia menyebabkan terjadinya pemanasan global dan *greenhouse gasses* yang terakumulasi menyebabkan dampak-dampak lainnya (World Economics, 2020). Aktivitas transportasi memiliki kontribusi yang cukup tinggi dalam emisi karbon yaitu sebesar 191 miliar metrik ton per tahun. Hal ini setara dengan 16,3% dari emisi

karbon (CO<sub>2</sub>) yang terdata dalam beberapa tipe emisi karbon (Yoro & Daramola, 2020). Salah satu solusi untuk membatasi emisi karbon yang terjadi adalah dengan penerapan beberapa aturan pajak karbon seperti *carbon cap*, *carbon tax*, dan *carbon cap-and-trade* (Huang et al., 2020; Hasan et al., 2021).

Transportasi logistik melalui kapal merupakan transportasi yang menghasilkan

emisi karbon terendah (Vallejo-Pinto et al., 2019; Lan et al., 2020). Maka dari itu, diperlukan solusi untuk memberikan efisiensi emisi karbon ketika melakukan distribusi logistik menggunakan kendaraan darat seperti truk dan kereta. Dengan diberlakukannya *carbon cap*, sistem *supply chain* akan terpengaruh oleh batasan yang terdapat pada sistem yang berjalan ini (Mashud et al., 2022).

Proses *supply chain* juga mempengaruhi jumlah stok yang tersedia, terutama ketika terjadi kerusakan produk saat transportasi berlangsung, untuk itu *extra stock* diperlukan untuk tetap memenuhi permintaan dari pelanggan (Niggl, 2019). Terdapat beberapa metode lain dalam mengatasi *nonconforming product* seperti *replacement* setelah pelanggan memberikan laporan (Sarwar, 2020). Metode kedua tersebut kurang efisien karena harus mengantar kembali produk dari pabrik ke pelanggan yang tentunya menambah emisi karbon (Daryanto et al., 2019; Daryanto & Wee, 2021).

*Multimodal transportation* merupakan hal yang juga menguntungkan bagi *supply chain*. *Multimodal transportation* dapat mengurangi tenaga kerja yaitu supir truk yang mengantarkan ke pelanggan, mengurangi waktu pengiriman dan dapat mengurangi emisi karbon karena jarak yang berkurang ketika menggunakan truk dan kereta (Turbaningsih et al., 2022). Perbandingan *cost* yang dikeluarkan juga menunjukkan bahwa penggunaan kereta lebih murah dibandingkan penggunaan truk (Zahraee et al., 2020). Ardliana et al. (2020a, 2020b) mempertimbangkan truk dan kereta sebagai moda transportasi dalam *supply chain* karena terdapat keterbatasan jarak antara pabrik dan stasiun.

Penelitian dalam naskah ini merupakan pengembangan model dari penelitian Ardliana et al. (2020a, 2020b). Pengembangan model dilakukan dengan mempertimbangkan *nonconforming product* yang terjadi saat pengiriman produk sedang berlangsung dari pabrik menuju ke pelanggan. Penelitian ini bermanfaat dalam membantu pengambil keputusan menentukan kuantitas pengiriman dan kuantitas persediaan yang dapat meminimalkan total biaya dengan mempertimbangkan emisi karbon dan *nonconforming products* ketika pengiriman sehingga permintaan pelanggan dapat terpenuhi tanpa harus mengirim ulang produk pengganti. Dalam model Ardliana et al.

(2020a, 2020b) juga terdapat kekurangan dalam keseimbangan antara produk yang dikirim dan permintaan dari pelanggan sehingga hasil yang didapatkan tidak muncul seperti seharusnya pada saat diselesaikan dengan *software Lingo*.

## 2. PENGEMBANGAN MODEL

Model dari rantai pasok (*supply chain*) yang akan dianalisis memiliki satu tipe produk dalam seluruh *supply chain*. Terdapat dua pabrik yang menjadi penyuplai barang ( $s_1, s_2$ ). Produk yang telah jadi kemudian dikirimkan ke stasiun pertama ( $w$ ) yang akan mengantarkan produk ke stasiun kedua ( $v$ ) menggunakan kereta. Produk dikirimkan ke pelanggan ( $a, b$ ) dari stasiun kedua menggunakan truk. Dalam contoh kasus *supply chain* ini, terdapat dua periode *supply* ( $t_1, t_2$ ).

Pabrik memiliki variabel berupa inventori pabrik pada periode tertentu ( $i_{st}$ ). Selain itu terdapat sejumlah parameter yang diketahui yaitu  $h_{st}$  (*holding cost* pabrik pada periode tertentu),  $Pr_{st}$  (jumlah produksi pabrik pada periode tertentu), dan  $G_s$  (kapasitas maksimum *warehouse* pabrik). Pengiriman dari pabrik menuju stasiun pertama memiliki variabel yaitu  $q_{st}$  (jumlah produk yang dikirimkan dari pabrik ke stasiun satu pada periode tertentu). Selain itu diketahui  $c_{swt}$  (*cost* pengiriman dari pabrik ke stasiun pertama). Faktor emisi dari pabrik dan pengiriman dilambangkan dengan  $e_{st}$  (total emisi *inventory holding* pada pabrik) dan  $e_{swt}$  (total emisi pengiriman dari pabrik ke stasiun pertama).

Pada stasiun pertama terdapat variabel yaitu inventori stasiun pertama pada periode tertentu ( $i_{wt}$ ), serta diketahui beberapa parameter yaitu  $h_{wt}$  (*holding cost* stasiun pertama pada periode tertentu),  $G_w$  (kapasitas maksimum *warehouse* stasiun pertama), dan  $c_{wvt}$  (biaya pengiriman dari stasiun pertama menuju stasiun kedua). Pengiriman dari stasiun pertama menuju stasiun kedua memiliki variabel yaitu  $q_{vt}$  (jumlah produk dikirimkan menuju stasiun kedua dari stasiun pertama). Perlambangan dari emisi yang berkaitan dengan stasiun pertama yaitu  $e_{wt}$  (total emisi *inventory holding* pada stasiun pertama) dan  $e_{wvt}$  (total emisi pengiriman dari stasiun pertama menuju stasiun kedua).

Stasiun kedua memiliki variabel yaitu inventori pada stasiun kedua pada periode tertentu ( $i_{vt}$ ), serta beberapa parameter yang berpengaruh pada sistem yaitu  $h_{vt}$  (*holding cost* pada stasiun kedua),  $G_v$  (kapasitas maksimum

dari *warehouse* stasiun kedua), dan  $c_{vit}$  (biaya pengiriman produk dari stasiun kedua menuju ke pelanggan). Pengiriman dari stasiun kedua ke pelanggan memiliki variabel yaitu  $q_{i(a,b)t}$  (jumlah produk yang dikirimkan dari stasiun kedua menuju pelanggan). Kemudian terdapat perlambangan bagi emisi karbon dari bagian ini yaitu  $e_{vt}$  (total emisi karbon dari *inventory holding* stasiun kedua) dan  $e_{vit}$  (total emisi karbon dari pengiriman produk dari stasiun kedua ke pelanggan). Terdapat juga perlambangan lainnya yaitu  $d_{it}$  yang merupakan *demand* dari pelanggan pada periode tertentu, dan % $d$  sebagai *nonconforming product* ketika pengiriman berlangsung.

Pada model *supply chain* ini, fungsi tujuan dari model matematisnya adalah untuk meminimalisasi total biaya yang terdiri dari biaya emisi karbon, biaya inventori, dan biaya pengiriman. Persamaan fungsi tujuan ditunjukkan pada persamaan (1) berikut:

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^n h_{st} I_{st} + \sum_{t=1}^T h_{wt} I_{wt} + \sum_{t=1}^T h_{vt} I_{vt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^n c_{swt} q_{swt} + \sum_{t=1}^T c_{wvt} q_{wvt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_{vit} q_{vit} \end{aligned} \quad (1)$$

Beberapa batasan terdapat pada persamaan-persamaan berikut:

Persamaan (2): Keseimbangan antara permintaan dan pengiriman.

$$\sum_{t=1}^T q_{vt} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n q_{vit} \quad (2)$$

Persamaan (3): Batas pengiriman agar tidak melebihi dari produksi.

$$I_{st} + q_{swt} = I_{s(t-1)} + Pr_{st} ; t > 1, \forall s \in S \quad (3)$$

Persamaan (4): Keseimbangan inventori pada stasiun pertama.

$$\sum_{s=1}^n q_{swt} + I_{w(t-1)} = q_{wvt} + I_{wt} ; t > 1, \forall s \in S \quad (4)$$

Persamaan (5): Keseimbangan inventori pada stasiun kedua.

$$q_{wvt} + I_{w(t-1)} = \sum_{i=1}^n d_{it} + I_{vt} ; t > 1, \forall i \in K \quad (5)$$

Persamaan (6): Batas emisi karbon yang dihasilkan.

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^n e_{st} I_{st} + \sum_{t=1}^T e_{wt} I_{wt} + \sum_{t=1}^T e_{vt} I_{vt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^n e_{swt} q_{swt} + \sum_{t=1}^T e_{wvt} q_{wvt} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n e_{vit} q_{vit} \leq C_{cap} ; \forall t \in T, \forall i \in K \end{aligned} \quad (6)$$

Persamaan (7,8,9): Kapasitas *warehouse* pada pabrik, stasiun pertama dan stasiun kedua.

$$I_{s(t-1)} + Pr_{st} \leq G_s ; \forall t > 1 \quad (7)$$

$$\sum_{s=1}^n q_{swt} + I_{w(t-1)} \leq G_w ; \forall s > S, \forall t > 1 \quad (8)$$

$$q_{wvt} + I_{v(t-1)} \leq G_v ; \forall t > 1 \quad (9)$$

Persamaan (10): *Nonconforming product* pada proses pengiriman.

$$q_{swt} = d_{it} \times \%d + d_{it} \quad (10)$$

Persamaan (11,12): Batas *non-negative* dan bilangan integral.

$$q_{swt} \geq 0, \text{ bilangan bulat} \quad (11)$$

$$q_{wvt} \geq 0, \text{ bilangan bulat} \quad (12)$$

Model *supply chain* tersebut merupakan *Integer Linear Programming* (ILP) model yang akan diselesaikan dengan bantuan *software Lingo*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

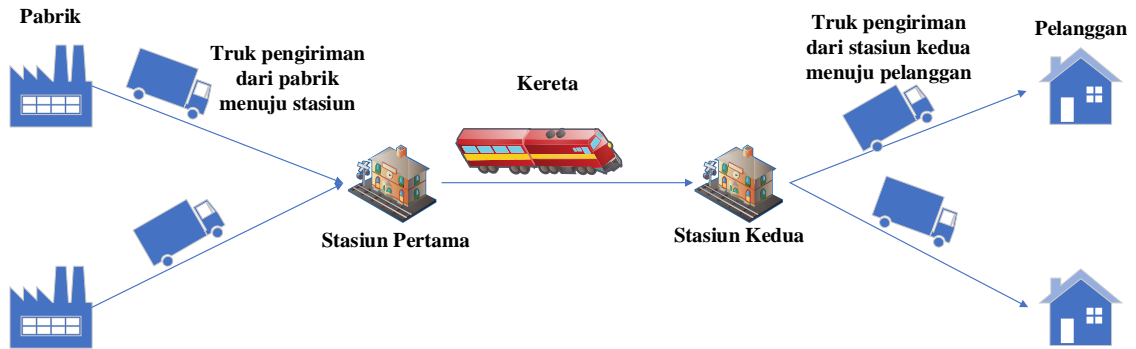
Percobaan dilakukan dengan menggunakan beberapa asumsi nilai untuk parameter yang dimiliki. Terdapat 2 pabrik, 1 stasiun pertama, 1 stasiun kedua, dan 2 pelanggan dalam sistem ini. Ilustrasi model *supply chain* ini ditampilkan Gambar 1. Terdapat 2 periode yang akan dianalisis selama sistem ini berlangsung. Pabrik pertama dan pabrik kedua mampu memproduksi 120 dan 100 unit produk pada dua periode analisis. Permintaan dari pelanggan pertama dan kedua sebanyak 80 dan 70 unit secara berturut-turut pada dua periode. Kapasitas *warehouse* dari pabrik pertama, pabrik kedua, stasiun pertama dan stasiun kedua sebesar 2000, 2000,

# PROSIDING

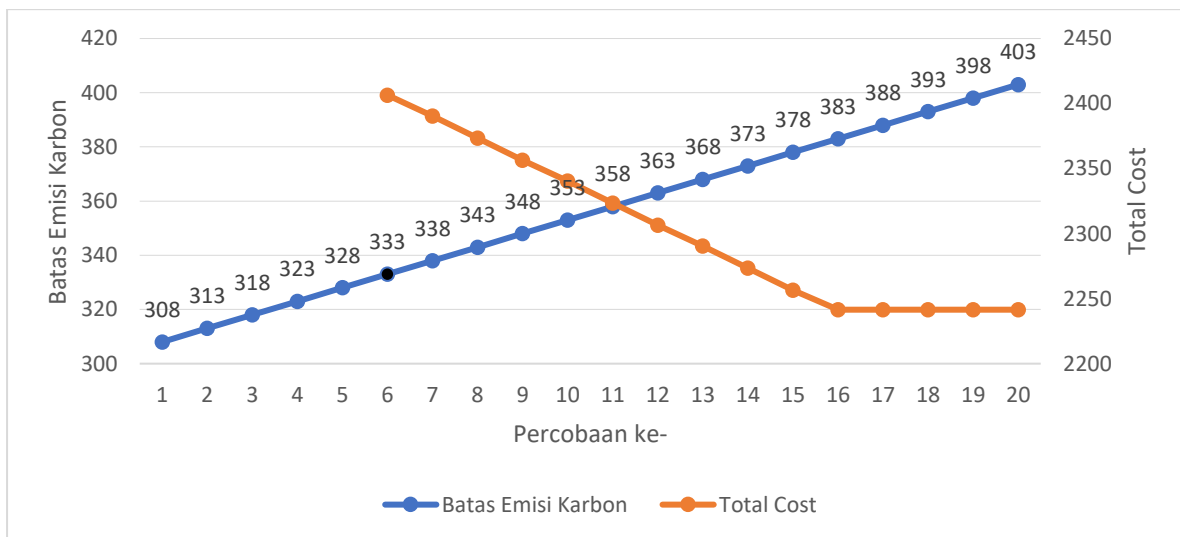
Seminar Nasional Dies Natalis ke-57  
Universitas Atma Jaya Yogyakarta

3000, dan 3000 unit. Biaya inventori untuk setiap pabrik, stasiun pertama, dan stasiun kedua secara berturut-turut adalah 0,5, 0,3, dan 0,2. Biaya pengiriman dari pabrik pertama dan pabrik kedua menuju ke stasiun pertama sebesar 2. Biaya pengiriman dari stasiun pertama menuju stasiun kedua adalah 4 dan stasiun

kedua menuju pelanggan *a* dan *b* sebesar 1,5 dan 3. Ketika pengiriman berlangsung, terdapat *nonconforming product* sebesar 10% dari total produk yang dikirimkan.



Gambar 1. Ilustrasi model jaringan supply chain



Gambar 2. Hubungan batas emisi karbon dengan total cost

Emisi total dari inventori pabrik, stasiun pertama, dan stasiun kedua adalah 0,3, 0,2, dan 0,2. Emisi yang dihasilkan dari pengiriman pabrik menuju stasiun pertama, dari stasiun pertama menuju stasiun kedua, dan dari stasiun kedua menuju ke pelanggan *a* dan *b* adalah 0,4, 0,5, dan 0,25 secara berurutan. Batas tertinggi dari emisi karbon yang diperbolehkan adalah 333. Nilai dari variabel yang dicari harus dalam bentuk bilangan bulat dan lebih besar daripada nol.

Dengan menggunakan bantuan *software Lingo*, model ILP dengan parameter yang diketahui dapat diselesaikan. Hasil analisis menunjukkan total biaya 2406,5. Pada saat nilai

*nonconforming products* 0% maka seperti diharapkan total biaya menjadi lebih rendah yaitu 2045.

Selanjutnya percobaan dilakukan dengan mengubah nilai-nilai dari batas emisi karbon yang diperbolehkan. Percobaan dilakukan sebanyak 20 kali dengan mengganti batas maksimum emisi karbon yang didapatkan dari sistem dan dimulai dengan 308 (paling kiri pada sumbu horizontal), 313, 318, 323, hingga 403 (paling kanan). Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 2.

Dapat dilihat bahwa ketika nilai dari batas emisi karbon terlalu rendah maka sistem *supply chain* tidak akan dapat berjalan karena terdapat

nilai minimal dari batas emisi karbon yang harus dimiliki agar *supply chain* dapat berjalan dengan baik. Diketahui bahwa nilai tersebut terletak pada nilai 333 (percobaan ke-6) yang memerlukan biaya sebesar 2406,5. Ketika batas emisi karbon lebih rendah dari nilai tersebut, maka sistem *supply chain* tidak dapat berjalan sama sekali. Ketika nilai batas emisi karbon dinaikkan secara perlahan dari batas minimal, biaya dari sistem *supply chain* akan menurun seperti pada grafik garis berwarna merah. Pada titik tertentu total biaya dari sistem *supply chain* tidak akan berubah. Nilai biaya terendah yang dihasilkan adalah 2241,5 ketika menyentuh batas maksimum emisi karbon sebesar 383. Setelah nilai tersebut, total biaya yang diperlukan tidak berubah lagi. Hasil dari grafik ini juga telah mempertimbangkan terjadinya *nonconforming product* ketika distribusi produk sehingga pelanggan tetap mendapatkan barang sesuai dengan permintaan yang telah diajukan.

#### 4. KESIMPULAN

Pada penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa terdapat nilai batas emisi karbon minimum agar sistem *supply chain* dapat berjalan dengan baik yaitu dengan nilai 333. Namun, dengan batas ini biaya yang diperlukan akan menghasilkan biaya tertinggi dari percobaan yaitu 2406,5. Dapat diketahui apabila batas maksimum emisi karbon di bawah 333 maka sistem *supply chain* tidak akan berjalan dikarenakan batasan-batasan yang terdapat pada sistem *supply chain* ini. Diketahui juga pada sistem *supply chain* yang telah dirancang ini, terdapat biaya minimum yang mungkin didapatkan yaitu sebesar 2241,5 namun dengan batas emisi karbon maksimum sebesar 383. Batas karbon maksimum yang lebih besar daripada 383 akan menghasilkan biaya yang sama yaitu 2241,5. Sistem yang telah dirancang telah mempertimbangkan terjadi *nonconforming product* dalam proses distribusi sehingga pelanggan juga mendapatkan jumlah produk yang sesuai seperti permintaan yang diajukan.

Pengembangan lanjutan yang dapat dilakukan pada studi ini yaitu mempertimbangkan aturan biaya karbon lainnya seperti *carbon tax* dan *cap-and-trade* untuk mengetahui pengaruh yang mungkin berbeda-beda. Selain itu juga dapat dipertimbangkan beberapa kondisi riil seperti jumlah persediaan awal di gudang dan kapasitas truk maupun kereta yang terbatas.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Ardliana, T., Pujawan, I. N., & Siswanto, N. (2020a). *The effects of carbon cap limitations on inventory and multimodal transportation*. AIP Conference Proceeding, Vol. 2217, No. 1, 030019. <https://doi.org/10.1063/5.0000697>.
- Ardliana, T., Pujawan, I. N., & Siswanto, N. (2020b). *The effects of carbon tax on inventory and land multimodal integration*. IOP Conference Series: Material Science & Engineering, Vol. 830, No. 4, 042008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/830/4/042008>.
- Daryanto, Y. & Wee, H. M. (2021). *Three-echelon Green Supply Chain Inventory Decision for Imperfect Quality Deteriorating Items*. Operations and Supply Chain Management, Vol. 14, No. 1, pp. 26-38. <https://doi.org/10.31387/oscm0440283>.
- Daryanto, Y., Wee, H. M., & Widyadana, G. A. (2019). *Low Carbon Supply Chain Coordination for Imperfect Quality Deteriorating Items*. Mathematics, Vol. 7, 234. <https://doi.org/10.3390/math7030234>.
- Hasan, M. R., Roy, T. C., Daryanto, Y., & Wee, H. M. (2021). *Optimizing Inventory Level and Technology Investment Under a Carbon Tax, Cap-and-trade and Strict Carbon Limit Regulations*. Sustainable Production and Consumption, Vol. 25, pp. 604-621. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.005>.
- Huang, Y. S., Fang, C. C., & Lin, C. A. (2020). *Inventory Management in Supply Chains with Consideration of Logistics, Green Investment and Different Carbon Emissions Policies*. Computer & Industrial Engineering, Vol. 139, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106207>.
- Lan, X., Zuo, X., & Tang, X. (2020). *The Impact of Different Carbon Emission Policies on Liner Shipping*. Journal of Marine Sciences, 8956045. <https://doi.org/10.1155/2020/8956045>.
- Mashud, A. H. M., Miah, S., Daryanto, Y., Chakraborty, R. K., Hasan, S. M. M., & Tseng, M. L. (2022). *Inventory Decisions on the Transportation System and Carbon Emissions under COVID-19 Effects: A Sensitivity Analysis*. Computer & Industrial Engineering, Vol. 171, 108393. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108393>.
- Niggli, T. (2019). *How to Manage Defective Products from Sourcing to Shipping*. [Online] Available at: <https://www.intouch-quality.com/blog/3->

## PROSIDING

Seminar Nasional Dies Natalis ke-57  
Universitas Atma Jaya Yogyakarta

---

- [ways-to-handle-defective-products](#). [Accessed: 01 September 2022]
- Sarwar, M. (2020). *4 Product Defect Management Strategies for Importers to Deal with Substandard Goods*. [Online] Available at: <https://www.atihongkong.com/2020/11/4-product-defect-management-strategies-for-importers>. [Accessed: 01 September 2022].
- Turbaningsih, O, Buana, I. S., Nur, H. I. & Pertiwi, A. (2022). *The multimodal transport analysis for project logistics: Export of Indonesia's train manufacturer*. *Cogent Social Sciences*, Vol. 8, No. 1, 2095081. <https://doi.org/10.1080/23311886.2022.2095081>.
- Vallejo-Pinto, J. A., Garcia-Alonso, R., Fernández, R. A., & Mateo-Mantecón, I. (2019). *Iso-emission map: A proposal to compare the environmental friendliness of short sea shipping vs road transport*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 67, pp. 596–609. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.01.015>.
- World Economics (2020). *Carbon Emissions | By Country | 2022 | Data | World Economics*. [Online] Available at: <https://worldeconomics.com/Indicator-Data/ESG/Environment/Carbon-Emissions/> [Accessed: 01 September 2022].
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). *CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect*. In *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>.
- Zahraee, S. M., Golroudbary, S. R., Shiwakoti, N., Stasinopoulos, P. & Kraslawski, A. (2020). *Transportation system analysis of empty fruit bunches biomass supply chain based on delivery cost and greenhouse gas emissions*. *Procedia Manufacturing*, Vol. 51, pp. 1717-1722. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.10.23>