

Optimizing Sustainable Supply Chains in Apparel Production through System Dynamics Modeling using Vensim

Optimalisasi Rantai Pasok Berkelanjutan dalam Produksi Pakaian melalui Pemodelan Dinamika Sistem menggunakan Vensim

Tomi^{1*)},

¹⁾Politeknik STTT Bandung, Jl.Jakarta no 31 Kota Bandung, 40272

Email: polikarpus.tomi@gmail.com

*) *Corresponding author*

Abstract: Supply chain management plays a crucial role in manufacturing processes, where the flow of goods begins with raw materials and continues to the end consumer, involving various complexities and uncertainties at each stage. Computer-based modeling and simulation are highly useful methods for addressing operational issues within the supply chain, as they are capable of solving complex problems that would otherwise be time-consuming and challenging to analyze manually. On the other hand, manufacturing companies are often concerned about losing valuable time and resources during production; inaccurate estimations of raw materials, labor, and equipment not only result in financial losses but also cause adverse environmental impacts. The purpose of this study is to demonstrate that system dynamics modeling in sustainable supply chain management can be applied to apparel production in order to optimize the use of materials, labor, and equipment. This research employs Vensim as a modeling and simulation tool due to its ability to represent causal relationships, manage complex feedback loops, and visualize system dynamics over time. By utilizing Vensim, manufacturing companies can simulate various supply chain scenarios in a controlled environment, thereby minimizing resource waste and enhancing sustainability through the reduction of energy consumption, material use, and labor. Shirt manufacturing was selected as the case study because its production process is relatively straightforward, while this garment type is also widely used across the globe. The findings of this study indicate that simulation using system dynamics modeling with Vensim is an efficient method for optimizing the utilization of materials, labor, and equipment in shirt production. This leads to a more sustainable manufacturing process, as the developed model allows for the evaluation of supply chain policies and their impacts before implementation in real systems.

Keywords: System Dynamic, Sustainability, Supply Chain, Modelling, Garment Production

Abstrak: Manajemen rantai pasok memiliki peran yang sangat penting dalam suatu proses manufaktur, di mana aliran barang dimulai dari bahan mentah hingga sampai kepada konsumen dengan berbagai kompleksitas dan ketidakpastian pada setiap tahapnya. Pemodelan dan simulasi komputer merupakan metode yang sangat berguna untuk mengatasi masalah operasional dalam rantai pasok, karena mampu menyelesaikan permasalahan yang kompleks dan memakan waktu jika dianalisis secara manual. Di sisi lain, perusahaan manufaktur khawatir akan kehilangan waktu dan sumber daya yang berharga selama proses produksi; perkiraan bahan baku, tenaga kerja, dan peralatan yang tidak akurat tidak hanya menyebabkan kerugian finansial bagi perusahaan, tetapi juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menunjukkan bahwa pemodelan dinamika sistem dalam manajemen rantai pasok berkelanjutan dapat diterapkan pada pembuatan pakaian guna mengoptimalkan penggunaan bahan, tenaga kerja, dan peralatan. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak Vensim sebagai alat pemodelan dan simulasi, karena kemampuannya dalam merepresentasikan hubungan sebab-akibat, mengelola umpan balik yang kompleks, serta memvisualisasikan dinamika sistem dalam jangka waktu tertentu. Dengan memanfaatkan Vensim, perusahaan manufaktur dapat mensimulasikan berbagai skenario rantai pasok dalam lingkungan yang terkendali, sehingga meminimalkan pemborosan sumber daya dan meningkatkan keberlanjutan melalui pengurangan konsumsi energi, bahan, serta tenaga kerja. Pembuatan kemeja dipilih sebagai studi kasus dalam penelitian ini karena proses produksinya yang relatif sederhana dan juga garmen

jenis ini banyak digunakan di seluruh dunia. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi menggunakan pemodelan dinamika sistem dengan Vensim merupakan metode yang efisien untuk mengoptimalkan penggunaan bahan, tenaga kerja, dan peralatan dalam pembuatan kemeja. Hasil ini mengarah pada proses manufaktur yang lebih berkelanjutan, karena model yang dibangun mampu mengevaluasi dampak dari berbagai kebijakan rantai pasok sebelum diterapkan pada sistem nyata.

Kata Kunci: Dinamika Sistem, Keberlanjutan, Rantai Pasok, Pemodelan, Produksi Garmen

DOI: <https://doi.org/10.37577/sainteks.v7i02.913>

Received: 07, 2025. Accepted: 08, 2025.

Published: 09, 2025

PENDAHULUAN

Pemodelan dinamika sistem (*System Dynamics Modeling*) adalah bentuk pemodelan melalui teknik simulasi dengan bantuan *software* komputer untuk memahami dan menganalisis masalah-masalah yang kompleks. Pada awal kemunculannya pemodelan ini sebagai dinamika industri (Forrester, 1961), kemudian pemodelan dinamika sistem dikembangkan pada pertengahan tahun 1950-an oleh Profesor Jay W. Forrester di Massachusetts Institute of Technology (Forrester, 1961). Pemodelan dinamika sistem berawal dari rekayasa manajemen dan control; pendekatan ini melibatkan analisis sistem fisik, biologis, dan sosial yang kompleks melalui perspektif umpan balik dan keterlambatan (*delay*) (Pérez-Pérez et al., 2021). Pemodelan dinamika sistem dimulai dengan menentukan lingkup dan batasan dari suatu masalah masalah, kemudian memetakan masalah tersebut dalam lingkungan visual sebagai model sistem yang saling berinteraksi. Melalui pemrograman visual, model ini dapat digunakan untuk melakukan simulasi kuantitatif dari berbagai skenario yang ada (Richardson, 2020).

Manajemen rantai pasok (Supply Chain Management) melibatkan pengelolaan aliran barang dan/atau jasa dari tahap bahan mentah hingga pengguna akhir (Dyllick & Hockerts, 2002). Sistem manajemen rantai pasok yang dirancang dengan baik akan menghasilkan barang dan/atau jasa berkualitas tinggi secara efisien. Namun, menciptakan rantai pasok yang efisien sering kali sulit karena adanya ketidakpastian dan variabilitas dalam aliran bahan, ketersediaan tenaga kerja, dan peralatan (Nugroho et al., 2020). Untuk mengatasi hal ini, para manajer perlu memahami penyebab dan dampak ketidakpastian serta variabilitas tersebut, kemudian berupaya mengurangi atau bahkan menghilangkannya. Dalam perkembangannya, konsep rantai pasok berkelanjutan (*sustainable supply chain*) muncul sebagai upaya untuk tidak hanya menekankan efisiensi dan profitabilitas, tetapi juga memasukkan dimensi lingkungan dan sosial ke dalam pengelolaan rantai pasok. Rantai pasok berkelanjutan berbeda dari rantai pasok konvensional karena mempertimbangkan dampak jangka panjang, seperti pengurangan limbah, efisiensi energi, dan pemanfaatan sumber daya yang bertanggung jawab. Dengan demikian, urgensi rantai pasok berkelanjutan terletak pada kemampuannya untuk menyeimbangkan kinerja ekonomi perusahaan dengan keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan sosial.

Alat yang saat ini tersedia untuk menganalisis ketidakpastian dalam rantai pasok antara lain pendekatan matematika tradisional, seperti analisis sensitivitas tunggal atau lokal (Marino et al., 2008), yang sayangnya tidak memperhitungkan variabilitas secara komprehensif. Oleh karena itu, simulasi menjadi sangat penting untuk menganalisis rantai pasok, terutama dalam konteks keberlanjutan, karena dapat merepresentasikan variabilitas yang ada sekaligus mengevaluasi dampak lingkungan dan sosial dari berbagai kebijakan operasional. Dalam praktiknya, perusahaan dapat menggunakan simulasi komputer untuk mempelajari masalah operasional yang sulit dimodelkan atau diselesaikan secara analitik. Melalui simulasi, perusahaan juga dapat menganalisis bagaimana sistem inventaris inovatif, seperti just-in-time (JIT), akan berfungsi dan berapa biaya yang dibutuhkan tanpa harus mengimplementasikannya terlebih dahulu (Schunk & Plott, n.d.)

Banyak negara mengandalkan industri manufaktur pakaian untuk berkontribusi terhadap perekonomian nasional mereka, termasuk Indonesia (Dicken, 2003). Meskipun sifatnya global, industri ini menghadapi berbagai masalah keberlanjutan (Muthu, 2015). Konsumsi air dan energi yang berlebihan, penggunaan bahan kimia, pembentukan limbah, kondisi tenaga kerja yang buruk, serta kurangnya transparansi rantai pasok berkontribusi pada dampak lingkungan dan sosial dari industri ini. Masalah-masalah ini menghadirkan tantangan besar bagi industri pakaian jadi, dan untuk menciptakan proses manufaktur pakaian yang etis dan berkelanjutan, masalah-masalah ini harus ditangani (Shen et al., 2017).

Untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi dalam pembuatan pakaian, penting untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan rasio input-output yang rendah dan konsumsi energi yang tinggi dalam industri manufaktur. Faktor-faktor tersebut meliputi teknik produksi yang tidak efisien, manajemen rantai pasok yang buruk, sistem manajemen energi yang tidak memadai, pemborosan dan ketidakefisienan bahan, kurangnya pelatihan dan kesadaran karyawan, serta tidak adanya praktik berkelanjutan. Dengan mengatasi faktor-faktor ini dan menerapkan langkah-langkah yang tepat, produsen dapat meningkatkan rasio input-output mereka dan mengurangi konsumsi energi, yang dapat menghasilkan proses manufaktur yang lebih efisien dan berkelanjutan (Rathore, 2023).

Globalisasi industri pakaian yang semakin meningkat telah menambah banyak tantangan dalam manajemen rantai pasok yang berkelanjutan. Keberlanjutan rantai pasok dalam pembuatan pakaian sangat dipengaruhi oleh ketidakpastian dan variabilitas. Untuk memastikan bahwa seluruh proses berjalan dengan lancar, pemahaman terhadap pengaruh ketidakpastian dan variabilitas terhadap rantai pasok berkelanjutan sangat penting. Ketidakpastian mengacu pada kurangnya kemampuan untuk memprediksi atau mengetahui kejadian-kejadian di masa depan, sementara variabilitas menunjukkan derajat perubahan atau ketidakkonsistenan dalam proses. Dalam konteks rantai pasok, ketidakpastian dan variabilitas dapat muncul dari berbagai faktor, seperti fluktuasi permintaan, gangguan pasokan, volatilitas harga, dan perubahan preferensi konsumen. Ketidakpastian dan variabilitas ini dapat berdampak signifikan terhadap upaya keberlanjutan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Mengelola ketidakpastian dengan tepat melalui perkiraan permintaan yang akurat, perencanaan transportasi yang efisien, dan hubungan yang kuat dengan pemasok sangat penting dalam penerapan keberlanjutan. Mengurangi variabilitas melalui kontrol kualitas yang ketat, proses manufaktur yang efisien, dan strategi pengurangan limbah juga memiliki peran penting. Dengan mengatasi tantangan ini, industri manufaktur pakaian dapat meningkatkan keberlanjutan rantai pasoknya dan berkontribusi pada masa depan yang lebih berkelanjutan (Oelze, 2017).

Proses manufaktur pakaian dalam pemodelan dinamika sistem mencerminkan berbagai karakteristik yang mengutamakan keberlanjutan, efisiensi, dan tanggung jawab. Melalui rantai pasok yang terintegrasi, bahan-bahan yang berkelanjutan, efisiensi energi, pengurangan limbah, praktik tenaga kerja yang etis, dan adopsi teknologi, produsen dapat menciptakan proses manufaktur yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab (Merschmann & Thonemann, 2011). Meskipun banyak masalah yang memengaruhi rantai pasok pembuatan pakaian, fokus dari penelitian ini adalah untuk menunjukkan bagaimana pemodelan dinamika sistem dapat digunakan sebagai alat pengambilan keputusan untuk membuat keputusan berkelanjutan dalam proses manufaktur pakaian. Karena proses manufaktur pakaian relatif sederhana, kami memilih pembuatan kemeja sebagai objek penelitian ini, dengan fokus pada pengoptimalan aliran bahan, tenaga kerja, dan pemanfaatan peralatan sepanjang proses tersebut. Pemodelan dinamika sistem dibuat dengan menggunakan software Vensim untuk memodelkan rantai pasok pembuatan kemeja. Untuk mengoptimalkan aliran bahan, tenaga kerja, dan pemanfaatan peralatan, kami menjalankan simulasi yang membandingkan skenario awal dan optimal untuk menunjukkan manfaat keberlanjutan.

Untuk menunjukkan bagaimana model ini dapat memengaruhi keberlanjutan rantai pasok, kami menggunakan 2 skenario yang terdiri dari skenario awal dan skenario optimal yang

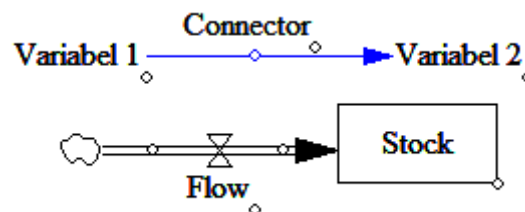
diopotimalisasi. Dengan membandingkan hasil dari skenario awal, skenario awal yang telah dioptimalisasi mencapai pengurangan 12,6% dalam pemanfaatan kain, serta pengurangan 33% dalam penggunaan peralatan. Skenario inipun menghasilkan rantai pasok yang lebih berkelanjutan yang ditunjukkan melalui peningkatan sebanyak 24% untuk produk jadi yang dikirim dengan pengurangan bahan baku dan peralatan yang digunakan.

METODOLOGI

Software Dinamika Sistem

Terdapat berbagai paket perangkat lunak untuk pemodelan dinamika sistem (SDM) yang tersedia. Beberapa perangkat lunak yang paling sering digunakan adalah: DYNANO, STELLA, Powersim Studio, dan Vensim. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini ialah Vensim. Vensim dipilih karena menawarkan keseimbangan yang baik antara harga, kemudahan penggunaan, dan kekuatan fitur jika dibandingkan dengan perangkat lunak lain di pasaran.

Vensim adalah perangkat lunak dinamika sistem yang menggunakan empat komponen dasar: *stock*, *flow*, variabel, dan konektor seperti terlihat pada gambar 1. *Stock* adalah kuantitas terukur dari sesuatu (misalnya, bahan, produk, mata uang, orang, dll.) yang dapat bertambah atau berkurang seiring waktu. *Flow* adalah mekanisme yang mengendalikan bagaimana *stock* bertambah atau berkurang seiring waktu, dengan mengalirkan "sesuatu yang terukur" masuk atau keluar dari *stock*. Variabel mengambil data input dan memanipulasi atau mengonversinya menjadi sinyal *output* yang mengatur *stock* dan *flow* dalam model. Konektor (panah biru pada Gambar 1) memungkinkan informasi mengalir antara variabel, *stock*, dan *flow*, untuk memodifikasi parameter dalam model. Awan pada Gambar 1 menunjukkan batas sistem dan mengidentifikasi lingkup model. Simulasi hanya mempertimbangkan perubahan dalam batas sistem model.



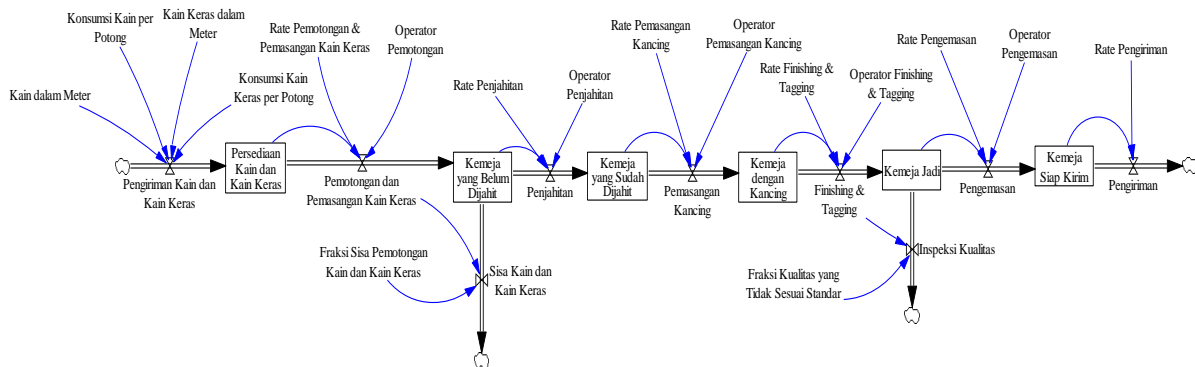
Gambar 1. Empat Komponen Dasar Vensim

Model Rantai Pasok dalam Proses Manufaktur Pakaian

Pemodelan dinamika Sistem dalam penelitian ini mensimulasikan rantai pasok dan proses manufaktur untuk 1000 potong kemeja yang diproduksi dan dikirim dalam satu hari. Konsumsi kain per kemeja dipilih sebagai nilai tipikal untuk pembuatan kemeja pria berbahan kain tenun. Jumlah 1000 potong per hari dipilih sebagai contoh untuk memudahkan perhitungan. Gambar 2 menunjukkan model dinamika sistem menggunakan Vensim untuk mensimulasikan proses pembuatan kemeja. Dalam model ini, kain dan kain keras (*fusing*) diangkut ke pabrik untuk diproses menjadi kemeja. (*Fusing* adalah potongan kecil kain yang digunakan untuk menstabilkan dan membuat bentuk pada potongan kain dalam perakitan pakaian). Kain dan kain keras kemudian dipotong menjadi potongan-potongan untuk perakitan selanjutnya.

Dalam proses pemotongan, sering terjadi pemborosan berupa sisa kain dan kain keras yang tidak dapat digunakan kembali dalam proses produksi selanjutnya. Setelah proses pemotongan, kain keras kemudian dipasang pada panel kemeja. Operator penjahitan membuat jas menggunakan mesin jahit dari potongan kain kemeja yang belum dijahit. Setelah itu, kancing mulai dipasang pada kemeja yang sudah dijahit. Operator *finishing* dan *tagging* kemudian menempelkan label pada jas. Mereka juga memotong benang-benang yang tersisa, menghilangkan noda, dan merapikan kemeja. Setelah kemeja diberi label dan di-*finishing*, kemeja akan diperiksa untuk memastikan apakah kemeja yang diproduksi lolos standar kualitas atau tidak. Kemeja yang cacat

akan ditolak selama inspeksi kualitas, dan kemeja yang lolos inspeksi kualitas kemudian dikemas dan dikirim.



Gambar 2 . Model Rantai Pasok Manufaktur Kemeja

Pemodelan dinamika sistem pada Gambar 2 dikembangkan menggunakan 6 stoks, 17 variabel, dan 9 flows. Daftar lengkap pengembangannya dapat dilihat pada Tabel 1–3 di bawah ini.

Tabel 1. Stock

| No | Stocks | Deskripsi |
|----|--------------------------------|--|
| 1 | Persediaan Kain dan Kain keras | Jumlah persediaan kain dan kain keras untuk memproduksi maksimal 1000 kemeja |
| 2 | Kemeja yang Belum Dijahit | Jumlah kemeja yang belum dijahit dan sudah terpasang kain keras |
| 3 | Kemeja yang Sudah Dijahit | Jumlah kemeja yang sudah dijahit |
| 4 | Kemeja dengan Kancing | Jumlah kemeja yang sudah terpasang kancing |
| 5 | Kemeja Jadi | Jumlah kemeja yang sudah difinishing , tagging, dan lolos inspeksi kualitas |
| 6 | Kemeja Siap Kirim | Jumlah Kemeja yang siap untuk dikirim |

Tabel 2. Variabel

| No | Variabel | Deskripsi |
|----|---|---|
| 1 | Kain (Meter) | Jumlah kain yang diperlukan untuk memproduksi maksimal 1000 kemeja per hari |
| 2 | Konsumsi Kain per potong (Meter) | Jumlah kain yang diperlukan untuk memproduksi 1 kemeja |
| 3 | Kain Keras (Meter) | Jumlah kain keras yang diperlukan untuk memproduksi maksimal 1000 kemeja per hari |
| 4 | Konsumsi Kain Keras per potong (Meter) | Jumlah kain keras yang diperlukan untuk memproduksi 1 kemeja |
| 5 | Rate Pemotongan dan Pemasangan Kain Keras | Jumlah potongan kemeja yang sudah dilapisi kain keras per hari |

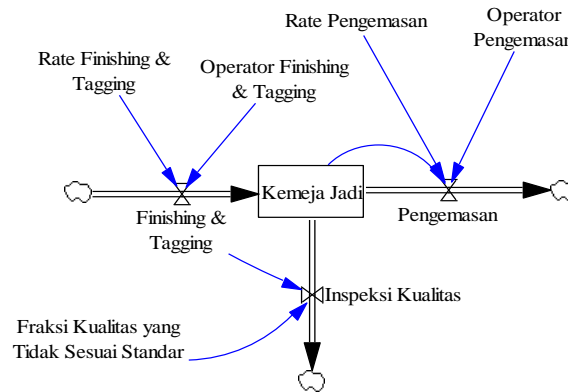
| No | Variabel | Deskripsi |
|----|--|---|
| 6 | Operator Pemotongan | Jumlah operator pemotongan yang dibutuhkan untuk memproduksi 1 potongan kemeja yang sudah dilapisi kain keras |
| 7 | Fraksi Sisa Pemotongan Kain dan kain keras | Fraksi sisa kain dan kain keras dari proses pemotongan |
| 8 | Rate Penjahitan | Jumlah kemeja yang dijahit dalam 1 hari |
| 9 | Operator Penjahitan | Jumlah oprator penjahitan yang diperlukan untuk menjahit maksimal 1000 kemeja |
| 10 | Rate Pemasangan Kancing | Jumlah kemeja yang sudah dipasang kancing per hari untuk tiap operator |
| 11 | Operator Pemasangan Kancing | Jumlah operator pemasangan kancing yang diperlukan untuk memasang kancing per hari |
| 12 | Rate Finishing & Tagging | Jumlah kemeja yang sudah difinishing dan dipasang tag |
| 13 | Operator Finishing & Tagging | Jumlah operator finishing dan tagging yang diperlukan untuk melakukan finishing dan pemasangan tag |
| 14 | Fraksi Kualitas yang tidak sesuai standar | Fraksi kemeja yang tidak lolos standar kualitas |
| 15 | Rate pengemasan | Jumlah kemeja yang dikemas dan siap untuk dikirim |
| 16 | Operator Pengemasan | Jumlah operator pengemasan yang diperlukan untuk melakukan pengemasan 1000 kemeja |
| 17 | Rate Pengiriman | Jumlah kemeja yang dikirim per hari |

Tabel 3. Flows

| No | Flows | Deskripsi |
|----|--------------------------------------|--|
| 1 | Pengiriman kain dan kain keras | Rate kain dan kain keras yang dikirim ke gudang |
| 2 | Pemotongan dan pemasangan kain keras | Rate potongan kemeja yang sudah dipotong dan dipasang kain keras |
| 3 | Sisa kain dan kain keras | Rate sisa kain dan kain keras yang dihasilkan dari proses pemotongan |
| 4 | Penjahitan | Rate kemeja yang sudah dijahit |
| 5 | Pemasangan Kancing | Rate kemeja yang sudah dipasang kancing |
| 6 | Finishing & Tagging | Rate kemeja yang sudah melalui proses finishing dan tagging |
| 7 | Inspeksi Kualitas | Rate kemeja yang lolos inspeksi kualitas |
| 8 | Pengemasan | Rate kemeja yang sudah dikemas dan siap untuk dikirim |
| 9 | Pengiriman kain dan kain keras | Rate kemeja yang dikirim |

Pengembangan Pemodelan Dinamika Sistem, Variabel, Perhitungan *Flow*, dan *Stock*

Langkah selanjutnya adalah pembuatan persamaan untuk semua *flow* dan stock, beserta semua nilai awal dari tiap variabel. Proses ini harus dilakukan untuk setiap 32 *flow*, variabel, dan stok dalam model ini. Untuk mendemonstrasikan hal ini, dipilihlah satu stok spesifik yang dapat dilihat pada Gambar 3, beserta *flow* dan variabel yang terkait dengan *stock* tersebut, yaitu **Kemeja Jadi** dalam model.



Gambar 3. *Flow* yang masuk dan keluar *Stock* Dalam Proses Perakitan Kemeja Jadi

Variabel dalam Pemodelan Dinamika Sistem pada Gambar 3

Seperti yang ditunjukkan dalam *Flow Finishing & Tagging* pada Gambar 3, untuk proses *finishing & tagging* dibutuhkan operator *finishing & tagging* untuk memotong benang-benang yang tersisa, menghilangkan noda, merapikan kemeja, dan memasang label. Jumlah tenaga kerja bergantung pada kecepatan mereka dalam melakukan *finishing & tagging* untuk kemeja jadi yang diperlukan dalam satu hari. Angka-angka ini kemudian dimasukkan ke dalam variabel sebagai nilai *input*. Demikian pula, untuk *flow Pengemasan*, dibutuhkan operator pengemasan dalam prosesnya. Jumlah operator pengemasan dan kecepatan mereka dalam mengemas kemeja per hari dimasukkan ke dalam nilai variabel masing-masing.

Perhitungan *Flow* dalam Pemodelan Dinamika Sistem pada Gambar 3

Setiap persamaan *flow* dibangun sebagai pernyataan "if then else". sehingga untuk *flow finishing & tagging*, jika variabel *Rate Pengemasan* dan *Operator Pengemasan* masing-masing adalah 80 kemeja per hari per operator dan 11 operator pengemasan, maka aliran jahitan maksimum akan mencapai 880 jas per hari. Jika stok *Kemeja Jadi* adalah 800 jas/hari, maka aliran jahitan maksimum akan terbatas pada 800 jas/hari. Di sisi lain, jika stok *Kemeja Jadi* adalah 1200 jas/hari, maka aliran jahitan akan terbatas pada laju maksimumnya, yaitu 880 jas/hari.

Tabel 4 *Flow* dalam Gambar 3

| No | Nama <i>Flow</i> | Persamaan | Unit |
|----|--------------------------------|--|-------------|
| 1 | <i>Finishing & Tagging</i> | IF THEN ELSE((Kemeja dengan Kancing)<("Operator Finishing & Tagging"*"Rate Finishing & Tagging"),(Kemeja dengan Kancing), ("Operator Finishing & Tagging"*"Rate Finishing & Tagging")) | Potong/hari |
| 2 | Pengemasan | IF THEN ELSE((Kemeja Jadi)<(Operator Pengemasan*Rate Pengemasan), Kemeja Jadi, (Operator Pengemasan*Rate Pengemasan)) | Potong/hari |
| 3 | Inspeksi Kualitas | Finishing & Tagging*Fraksi Kualitas yang Tidak Sesuai Standar | Potong/hari |

Perhitungan Stok dalam Pemodelan Dinamika Sistem pada Gambar 3

Persamaan Stok adalah keseimbangan antara aliran masuk dan keluar dari stok, persamaan stok dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\text{Stock}_{(t)} = \text{Stock}_{(t-dt)} + \sum \text{Inflows} - \sum \text{Outflows}$$

dt = adalah langkah waktu dalam jalannya model (1 hari).

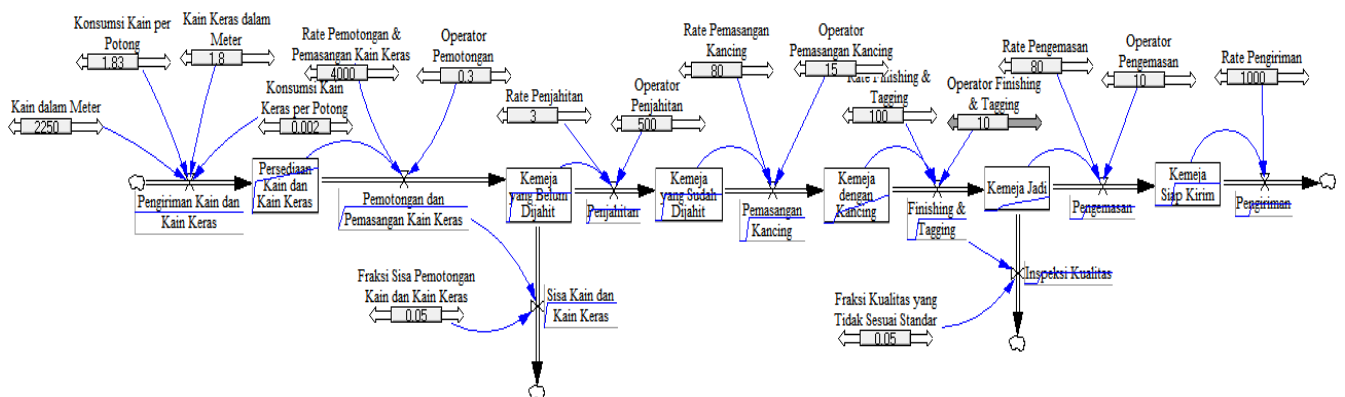
t = adalah titik waktu tertentu dalam jalannya model (antara 1 hingga 20 hari).

Secara spesifik di dalam Tabel 4, aliran masuk ialah *Finishing & Tagging*, dan dua aliran keluar ialah Pengemasan serta Inspeksi Kualitas.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Pada Keadaan Awal

Gambar 4 menggambarkan simulasi keadaan awal ketika menggunakan model ini. Nilai-nilai variabel untuk simulasi ini ditampilkan dalam **Tabel 5**.



Gambar 4 Model Simulasi pada Keadaan Awal

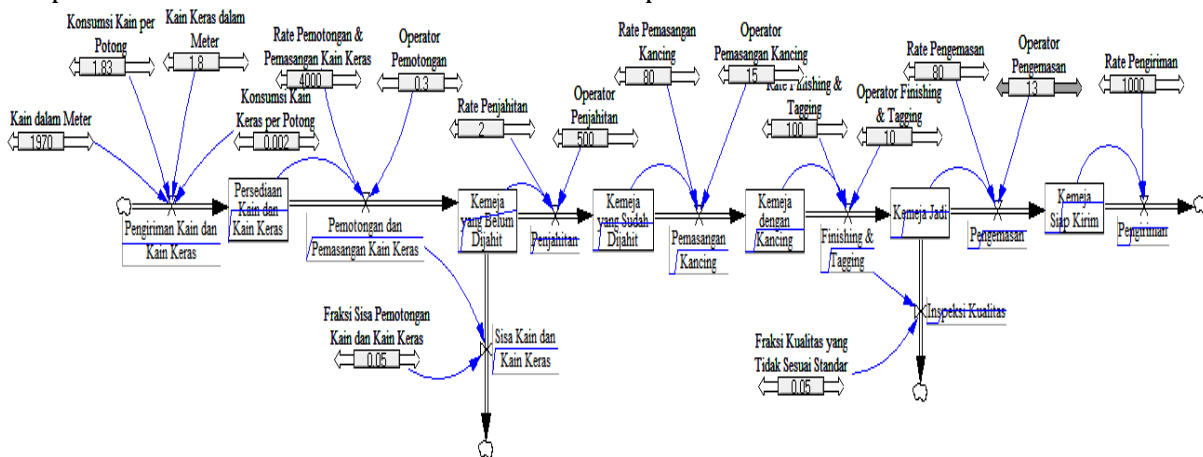
Tabel 5 Nilai input Variabel untuk Simulasi Keadaan Awal

| No | Variabel | Nilai Input pada Keadaan Awal |
|----|--|-------------------------------|
| 1 | Kain (Meter) | 2250 |
| 2 | Konsumsi Kain per potong (Meter) | 1.83 |
| 3 | Kain Keras (Meter) | 1.8 |
| 4 | Konsumsi Kain Keras per potong (Meter) | 0.0019 |
| 5 | Rate Pemotongan dan Pemasangan Kain Keras | 4000 |
| 6 | Operator Pemotongan | 0.3 |
| 7 | Fraksi Sisa Pemotongan Kain dan kain keras | 0.05 |
| 8 | Rate Penjahitan | 3 |
| 9 | Operator Penjahitan | 500 |
| 10 | Rate Pemasangan Kancing | 80 |
| 11 | Operator Pemasangan Kancing | 15 |
| 12 | Rate Finishing & Tagging | 100 |
| 13 | Operator Finishing & Tagging | 10 |
| 14 | Fraksi Kualitas yang tidak sesuai standar | 0.05 |
| 15 | Rate pengemasan | 80 |
| 16 | Operator Pengemasan | 10 |
| 17 | Rate Pengiriman | 1000 |

Setelah dilakukan simulasi yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 5, ternyata diketahui bahwa kondisi ini tidak optimal karena beberapa *stock* dan *flow* meningkat seiring berjalannya waktu, yang menunjukkan terjadinya penumpukan material dalam rantai pasok. Hal ini disebabkan oleh "bottleneck" dalam rantai pasok, di mana keterbatasan sumber daya menghambat pemrosesan material pada laju yang cukup, yang akhirnya menyebabkan penumpukan material. Meskipun nilai-nilai variabel ini tidak menghasilkan rantai pasok yang optimal, ini menunjukkan bahwa model ini dapat digunakan untuk mensimulasikan rantai pasok pembuatan kemeja.

Simulasi pada Keadaan Optimal

Gambar 5 menggambarkan simulasi pada keadaan yang optimal dalam model yang digunakan. Adapun nilai-nilai variabel untuk simulasi ini ditampilkan dalam Tabel 6.



Gambar 5 Model Simulasi Pada Keadaan Optimal

Tabel 6 Nilai Input Variabel Pada Keadaan Optimal

| No | Variabel | Nilai Input pada Keadaan Optimal |
|----|--|----------------------------------|
| 1 | Kain (Meter) | 1966 |
| 2 | Konsumsi Kain per potong (Meter) | 1.83 |
| 3 | Kain Keras (Meter) | 1.8 |
| 4 | Konsumsi Kain Keras per potong (Meter) | 0.0019 |
| 5 | Rate Pemotongan dan Pemasangan Kain Keras | 4000 |
| 6 | Operator Pemotongan | 0.3 |
| 7 | Fraksi Sisa Pemotongan Kain dan kain keras | 0.05 |
| 8 | Rate Penjahitan | 2 |
| 9 | Operator Penjahitan | 500 |
| 10 | Rate Pemasangan Kancing | 80 |
| 11 | Operator Pemasangan Kancing | 15 |
| 12 | Rate Finishing & Tagging | 100 |
| 13 | Operator Finishing & Tagging | 10 |
| 14 | Fraksi Kualitas yang tidak sesuai standar | 0.05 |
| 15 | Rate pengemasan | 80 |
| 16 | Operator Pengemasan | 13 |
| 17 | Rate Pengiriman | 1000 |

Setelah dilakukan penyesuaian pada input nilai variabel untuk memperoleh kondisi optimal, ditemukan bahwa kondisi ini sudah optimal karena semua stok dan aliran sekarang tetap konstan seiring waktu, yang menunjukkan bahwa tidak ada penumpukan material dalam rantai pasok, sehingga tidak ada keterbatasan sumber daya yang menghalangi pemrosesan material pada laju yang optimal. Hasil simulasi juga menunjukkan nilai akhir Pengiriman yang mencapai 1000 kemeja/hari dibandingkan dengan sebelum dilakukan optimasi yang mana hanya 880 kemeja/hari.

Algoritma berikut digunakan untuk memperoleh nilai variabel yang teroptimasi dalam **Tabel 6**:

1. Mulai dengan stok terakhir dalam rantai pasok, lalu ditentukan apakah stok tersebut meningkat atau menurun seiring waktu.
2. Menyesuaikan variabel yang mempengaruhi aliran input ke stok tersebut dan jalankan kembali simulasi.
3. Ulangi langkah 2 hingga nilai stok tetap tidak berubah seiring waktu.
4. Berpindah ke stok hulu berikutnya dalam rantai pasok dan ulangi langkah 1 hingga 3 untuk stok tersebut.
5. Ulangi proses ini hingga aliran awal pada awal model rantai pasok tercapai.

Analisis Optimasi Rantai Pasok Berkelanjutan

Dengan mengikuti algoritma yang dijelaskan di atas, diperoleh 3 variabel spesifik yang paling berpengaruh dalam aliran rantai pasok dan dapat disesuaikan untuk memperoleh output paling optimal seperti yang ditunjukkan dalam tabel 6 dibawah ini

Tabel 7. Perbandingan Input Variabel Pada Keadaan Awal dan Keadaan Optimum

| No | Variabel | Nilai Input Pada Keadaan Awal | Nilai Input Pada Keadaan Optimum | Persentase Perubahan |
|----|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1 | Kain (Meter) | 2250 | 1966 | Berkurang 12% |
| 2 | Rate Penjahitan Operator | 3 | 2 | Berkurang 33% |
| 3 | Pengemasan | 10 | 13 | Meningkat 30% |

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7, penggunaan kain (material) berhasil dikurangi lebih dari 12%; tingkat penjahitan (penggunaan peralatan) dapat ditekan lebih dari 33%; dan jumlah operator pengemasan yang dibutuhkan meningkat sebesar 30%. Melalui penelitian ini, jumlah kemeja yang dikirim meningkat lebih dari 25% (dari 800 potong menjadi 1000 potong), sehingga target pengiriman harian sebanyak 1000 pcs dapat dicapai dengan cara yang lebih berkelanjutan. Peningkatan ini tidak hanya menunjukkan efisiensi operasional, tetapi juga relevan dengan prinsip *Sustainable Development Goals (SDGs)*, khususnya tujuan ke-12 tentang konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, serta tujuan ke-8 tentang pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi. Dalam simulasi, semua variabel saling dihubungkan dan dioptimalkan sebagai satu kesatuan, sehingga seluruh stok dalam model mencapai nilai keseimbangan dan tidak mengalami peningkatan atau penurunan seiring waktu. Algoritma yang dipresentasikan menyesuaikan nilai variabel untuk mengoptimalkan penggunaan material, tenaga kerja, dan peralatan, yang pada akhirnya menghasilkan rantai pasok yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, output produk dapat ditingkatkan dengan tetap mengurangi konsumsi material serta mengelola sumber daya manusia dan peralatan secara lebih efisien, sehingga mendukung tercapainya tujuan keberlanjutan dalam konteks industri garmen.

SIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, pemodelan dinamika sistem menggunakan software Vensim terbukti efektif dalam memodelkan rantai pasok pembuatan kemeja, mulai dari pengiriman bahan baku hingga pengiriman produk jadi. Proses ini berjalan dengan baik tanpa ada

error saat simulasi dijalankan, menunjukkan bahwa alur prosesnya saling terhubung dengan baik. Model ini juga memungkinkan simulasi pada kondisi awal dan kondisi optimum. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variabel, flow, dan stok yang muncul sesuai dengan keadaan industri sebenarnya dan dapat disesuaikan untuk mencapai output yang optimal. Dengan kata lain, model ini tidak hanya menggambarkan proses secara akurat, tetapi juga dapat digunakan untuk mengevaluasi dan meningkatkan efisiensi sistem.

Simulasi ini juga bermanfaat untuk mengoptimalkan penggunaan material, tenaga kerja, dan peralatan, yang dapat diterapkan untuk menciptakan strategi rantai pasok yang lebih berkelanjutan. Hasil simulasi menunjukkan penghematan bahan baku sebesar 12%, pengurangan penggunaan alat sebesar 33%, dan peningkatan jumlah operator pengemasan sebesar 30%. Selain itu, output produksi dapat meningkat sebesar 20% dengan menjalankan simulasi pada keadaan optimal. Secara keseluruhan, pemodelan dinamika sistem ini berhasil mengurangi input dan meningkatkan output, yang mendukung penerapan keberlanjutan dalam proses manufaktur pakaian.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dikembangkan untuk meningkatkan penerapan model simulasi dinamik sistem (SDM) dalam rantai pasok manufaktur, khususnya dalam industri pakaian, serta untuk memperdalam studi akademik lebih lanjut dalam bidang ini:

1. **Pengembangan Model di Berbagai Industri**

Penelitian ini dapat diperluas dengan menguji model SDM pada industri manufaktur lain, seperti industri sepatu atau tekstil lainnya, untuk melihat apakah hasil optimasi yang serupa dapat dicapai.

2. **Studi Dampak Lingkungan**

Penelitian lebih lanjut perlu mengintegrasikan model SDM dengan Life Cycle Assessment (LCA) untuk memahami dampak lingkungan secara lebih mendalam, termasuk emisi karbon, konsumsi energi, dan pengelolaan limbah.

3. **Skala Produksi yang Lebih Besar**

Penelitian selanjutnya sebaiknya menguji model ini pada skala produksi yang lebih besar untuk melihat bagaimana model beradaptasi dengan peningkatan volume produksi di industri pakaian massal atau fast fashion.

Dengan mengembangkan dan memperluas penelitian ini ke berbagai industri, serta mempertimbangkan dampak lingkungan dan skala produksi yang lebih besar, diharapkan model ini dapat memberikan kontribusi yang lebih luas dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan rantai pasok manufaktur secara global.

DAFTAR PUSTAKA

- Dicken, P. (2003). *Global Shift: Reshaping The Global Economic Map In The 21st Century 4th Ed.*
- Dyllick, T., & Hockerts, K. (2002). Beyond the business case for corporate sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 11(2), 130–141. <https://doi.org/10.1002/bse.323>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. M.I.T. Press.
- Marino, S., Hogue, I. B., Ray, C. J., & Kirschner, D. E. (2008). A methodology for performing global uncertainty and sensitivity analysis in systems biology. *Journal of Theoretical Biology*, 254(1), 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.04.011>
- Merschmann, U., & Thonemann, U. W. (2011). Supply chain flexibility, uncertainty and firm performance: An empirical analysis of German manufacturing firms. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.013>

- Muthu, S. S. (Ed.). (2015). *Handbook of Sustainable Apparel Production*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18428>
- Nugroho, I. S., Bhagya, T. G., & Rosinawati, D. (2020). Industri dan Supply Chain Halal Dilihat dari Aspek Keilmuan Teknik Industri. *Jurnal Sains Dan Teknik*, 2(2). <http://ejournal.uicm-unbar.ac.id/index.php/sainteks/>
- Oelze, N. (2017). Sustainable Supply Chain Management Implementation–Enablers and Barriers in the Textile Industry. *Sustainability*, 9(8), 1435. <https://doi.org/10.3390/su9081435>
- Pérez-Pérez, J. F., Parra, J. F., & Serrano-García, J. (2021). A system dynamics model: Transition to sustainable processes. *Technology in Society*, 65, 101579. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101579>
- Rathore, Dr. B. (2023). Future of Textile: Sustainable Manufacturing & Prediction via ChatGPT. *Eduzone : International Peer Reviewed/Refereed Academic Multidisciplinary Journal*, 12(01), 52–62. <https://doi.org/10.56614/eiprmj.v12i1y23.253>
- Richardson, G. P. (2020). Core of System Dynamics. In *System Dynamics* (pp. 11–20). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8790-0_536
- Schunk, D., & Plott, B. (n.d.). Using simulation to analyze supply chains. *2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No.00CH37165)*, 2, 1095–1100. <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899070>
- Shen, B., Li, Q., Dong, C., & Perry, P. (2017). Sustainability Issues in Textile and Apparel Supply Chains. *Sustainability*, 9(9), 1592. <https://doi.org/10.3390/su9091592>