

Pengendali Model Prediktif Terdistribusi untuk Meningkatkan Ketahanan dan Efisiensi Rantai Pasok Gula Semut

Distributed Model Predictive Control to Enhance Resilience and Efficiency of the Palm Sugar Supply Chain

Rachmawati Wangsaputra^{1*}, Nur Faizatus Sa'idah², Monika Windiana Pangestuti³

¹ Program Studi Logistik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia

² Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Cirebon 45162, Indonesia

³ Dinas Kesehatan Pangan, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, 77311, Indonesia

*E-mail: rwangsap@itb.ac.id

Diterima: 4 Juni 2025; Disetujui: 26 Desember 2025

ABSTRAK

Dalam keberjalanannya, sistem rantai pasok Gula Semut menghadapi perubahan level permintaan, tidak sama dengan level permintaan saat perencanaan. Kemampuan sistem rantai pasok dalam memenuhi keinginan pelanggan dan tetap efisien dalam situasi permintaan yang berubah-ubah merupakan titik penting menjaga ketahanan rantai pasok. Metoda Pengendali Model Prediktif Terdistribusi (PMPT) dan *Collaborative Planning Forecasting dan Replenishment* (CPFR) berpotensi menangani perubahan level permintaan terutama yang bersifat fluktuatif. Objek penelitian adalah rantai pasok Gula Semut PT Binar Dini Mandiri Indonesia (PT BDMI), berlokasi di kabupaten Banyumas; penghasil kelapa terbesar di provinsi Jawa Tengah. PT BDMI sering mengalami kerugian karena tidak mampu memenuhi permintaan saat terjadi perubahan. Rumusan masalah penelitian adalah bagaimana mengimplementasikan CPFR dan PMPT sehingga kinerja ketahanan dan efisiensi kerja rantai pasok meningkat. Metodologi meliputi: rumusan masalah, pengelolaan berdasarkan CPFR dan PMPT, pengujian menggunakan 4 skenario, analisis, kesimpulan. Pengolahan data dilakukan menggunakan MATLAB 2025 dan Excel Solver. Ukuran kinerja ketahanan adalah tingkat pemenuhan permintaan sedangkan untuk efisiensi adalah ongkos pengadaan dan ongkos simpan. Hasil menunjukkan skenario-0 memiliki ukuran kinerja tertinggi dari sisi ketahanan karena rantai pasok dirancang berdasarkan kemampuan awal, sedang pada skenario 1-2-3, semakin fluktuatif perubahan permintaan, kinerja ketahanan dan efisiensi akan menurun. Kuantifikasinya perbandingan antar penggunaan PMPT dan tidak menunjukkan bahwa PMPT memberikan tingkat ketahanan lebih tinggi yang tidak menggunakan PMPT. PMPT dapat meningkatkan ketahanan sekitar 9,9 % dan efisiensi kerja sebesar 1,2 % untuk rantai pasok tetapi saat perubahan permintaan sangat fluktuatif, tingkat pemenuhan permintaan mulai turun. PMPT menunjukkan kemampuan menghadapi perubahan dan juga tetap menjaga efisiensi. Kesimpulan metoda PMPT terbukti memang lebih dapat fleksibel menangani fluktuasi demand.

Kata kunci: Gula semut; kolaborasi; rantai pasok; CPFR; teori kontrol; pengendali model prediktif terdistribusi

ABSTRACT

In its operation, the Gula Semut (Palm Sugar) supply chain system faces changes in demand levels that differ from the levels projected during planning. The ability of a supply chain system to meet customer needs while remaining efficient amidst fluctuating demand is a critical factor in maintaining supply chain resilience. The Distributed Model Predictive Control (DMPC) and Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment (CPFR) methods have the potential to handle changes in demand levels, particularly those that are volatile. The object of this research is the Gula Semut supply chain of PT Binar Dini Mandiri Indonesia (PT BDMI), located in Banyumas Regency, the largest coconut producer in Central Java Province. PT BDMI frequently incurs losses due to its inability to meet demand when changes occur. The research problem is formulated as how to implement CPFR and DMPC to improve the resilience performance and operational efficiency of the supply chain. The methodology includes problem formulation, management based on CPFR and DMPC, testing using four scenarios, analysis, and conclusion. Data processing was conducted using MATLAB 2025 and Excel Solver. The performance metric for resilience is the demand fulfilment rate, while efficiency is measured by procurement and holding costs. The results show that Scenario-0 has the highest resilience performance because the supply chain is designed based on initial capabilities. Meanwhile, in Scenarios 1, 2, and 3, as demand fluctuations increase, both resilience and efficiency performance decline. Quantitatively, a comparison between the use of DMPC and its absence shows that DMPC provides a higher level of resilience. DMPC can increase resilience by approximately 9.9% and operational efficiency by 1.2% for the supply chain; however, when demand changes become highly volatile, the fulfilment rate begins to drop. Overall, DMPC demonstrates the ability to face changes while maintaining efficiency. The conclusion is that the DMPC method is proven to be more flexible in handling demand fluctuations.

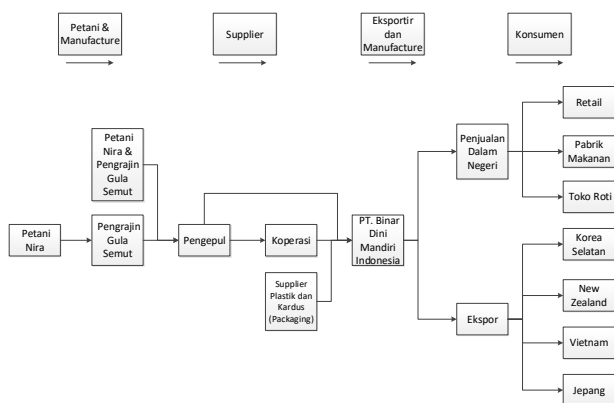
Keywords: Collaborative planning forecasting and replenishment; palm sugar; distributed model predictive control; supply chain; control theory

PENDAHULUAN

PT Binar Dini Mandiri Indonesia (PT BDMI), perusahaan penghasil Gula Semut yang berlokasi di Banyumas - Jawa Timur, telah memproduksi selama hampir 40 tahun dan telah mengekspor produknya ke negara Korea Selatan, New Zealand, Vietnam dan Jepang. Bahan dasar Gula Semut adalah nira yang disadap dari pohon kelapa oleh petani nira, kemudian diolah menjadi Gula Semut kering oleh petani nira atau oleh pengrajin Gula Semut. Gula Semut kering, hasil para petani nira/pengrajin dikumpulkan oleh pengepul yang kemudian dijual ke koperasi baru kemudian dijual ke PT BDMI (Pangestuti dkk., 2020). PT BDMI kemudian meningkatkan kualitas Gula Semut kering melalui pengayakan, pengeringan kembali dan penambahan rasa sebelum dikemas dalam kemasan plastik. Beberapa varian produk, diantaranya adalah Natural Coconut Sugar, Ginger Coconut Sugar (Gula Kelapa Jahe), Coconut Aminos Java Blossom, Coconut Nectar Java Blossom. Untuk pasar lokal, Gula Semut dipasarkan melalui Pengecer Lokal yang meliputi toko ritel, toko roti dan pabrik produksi makanan. Produk Gula Semut yang diekspor dikemas dengan kemasan berisi 5 (lima) kg kemudian dikemas lagi dengan menggunakan kardus berisi 4 (empat) plastik @ 5 kg; sehingga dalam 1 (satu) kardus beratnya 20 kg. Produk ekspor yang menjadi ikon adalah Gula Semut *original*, selain itu ada varian Gula Semut Jahe yang diekspor ke New Zealand. Rantai pasok Gula Semut hasil produksi PT BDMI dapat dilihat pada Gambar 1.

Tiga masalah utama yang dihadapi PT BDMI adalah: (i) pemasok Gula Semut Kering (koperasi / pengepul) sering terlambat mengirim Gula Semut Kering, (ii) permintaan produk Gula Semut yang berubah kadang naik / turun (berfluktuasi) dari sisi Pelanggan / Pengecer dan (iii) ketidakmampuan pengelolaan PT BDMI dalam menghadapi fluktuasi permintaan baik bersumber dari internal ataupun eksternal.

Saat perubahan permintaan terjadi, utamanya jika tiba-tiba permintaan menaik, seringkali PT BDMI tidak dapat memenuhi permintaan, fulfillment tidak 100%), dan sistem rantai pasok tidak mencapai tujuannya. Untuk mampu 100% memenuhi permintaan pelanggan Gula Semut walaupun permintaan berfluktuasi dan dapat tetap menjaga profitabilitas dan efisiensi, sistem rantai pasok wajib berkolaborasi dengan seluruh entitas dalam rantai pasok, dimulai dari perolehan bahan baku - pembuatan produk hingga penyampaian produk pada pelanggan agar mencapai efektivitas dan efisiensi rantai pasok dengan tetap menjaga keuntungan bagi seluruh entitas dalam rantai pasok (Chopra & Meindl, 2019; Marty & Ruel, 2024).



Gambar 1. Rantai pasok gula semut PT BDMI (Pangestuti dkk., 2020)

Penelitian rantai pasok Gula Semut di Indonesia sangat penting dilakukan, karena Indonesia memiliki perkebunan kelapa yang sangat luas hingga sekitar 216.000 ha. Jawa Tengah memiliki kebun kelapa sekitar 90.000 ha. Bayumas sebagai bagian dari provinsi Jawa Tengah, memiliki hampir 17.600 ha perkebunan kelapa, dan menghasilkan banyak sekali produk turunan kelapa. Penjualan Gula Semut oleh PT BDMI berkisar 169 -185 ton per tahun (Pangestuti dkk., 2020).

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan dinamika sistem dalam pengelolaan rantai pasok. Pada penelitian sebelumnya, Pangestuti dkk. (2020), telah mengusulkan perbaikan sistem rantai pasok Gula Semut PT BDMI dengan melakukan *forecasting* – perencanaan bersama dan sistem *replenishment*, dibawah konsep *Collaborative Planning Forecasting Replenishment* (CPFR) (Hill dkk., 2020). Dimulai dengan peramalan permintaan secara kolaboratif, kemudian perencanaan antar pamanufaktur-pemasok dan distributor dan penentuan *replenishment*. Perencanaan kolaboratif adalah langkah awal, tantangan berikutnya adalah bagaimana rantai pasok dapat berketahanan dengan tetap menjaga efisiennya.

Lima kinerja sistem rantai pasok adalah: (i) efektivitas, (ii) efisiensi, (iii) keandalan, (iv) responsivitas, dan (v) profitabilitas rantai pasok (Dolgui, dkk., 2013; Gunasekaran, dkk., 2015). Efektivitas rantai pasok berkaitan dengan manajemen dapat memenuhi keinginan pelanggan sesuai kualitas yang diinginkan yaitu tepat waktu, jumlah, lokasi, harga. Efisiensi terkait tingkat penggunaan input dalam mencapai output. Keandalan berkaitan persentase sistem bekerja mencapai tujuannya dalam berbagai kondisi, termasuk didalamnya adalah responsivitas sistem rantai pasok yaitu kemampuan merespon segala perubahan dalam lingkungannya dan tetap mencapai tujuannya. Profitabilitas terkait berapa profit masing-masing entitas.

Ketahanan rantai pasok adalah kemampuan sebuah rantai pasok untuk bertahan, beradaptasi, dan pulih dengan cepat dari gangguan (Zhao dkk., 2023; Wieland & Durach, 2021; Tukamuhabwa dkk. 2015). Gangguan mencakup bencana alam, fluktuasi permintaan pasar, hingga krisis ekonomi. Tujuan utamanya adalah memastikan bisnis tetap berjalan, memenuhi permintaan pelanggan, dan meminimalkan kerugian meskipun terjadi hal-hal yang tidak terduga (Dubey, 2023). Ketahanan rantai pasok tidak hanya tentang reaksi, tapi juga tentang persiapan dan proaktivitas (Mandal dkk., 2016; Shishodia dkk., 2023). Empat komponen utama ketahanan rantai pasok (Scholten & Schilder, 2015; Jain dkk., 2017; Scholten dkk., 2019) adalah: (i) antisipasi: kemampuan untuk memprediksi potensi risiko dan ancaman. Misalnya, dengan menganalisis data historis atau tren global, (ii) respons: kecepatan dan efektivitas dalam menanggapi gangguan saat itu terjadi, dapat berupa mengaktifkan rencana darurat atau beralih ke pemasok alternatif, (iii) pemulihan: proses untuk kembali ke kondisi normal atau bahkan lebih baik dari sebelumnya setelah gangguan berakhir. (iv) adaptasi: kemampuan untuk mengubah struktur dan strategi rantai pasok agar lebih kuat di masa depan (Muñoz & Dunbar, 2015; Singh, dkk., 2019; Singh dkk., 2019). Pada penelitian ini ketahanan rantai pasok difokuskan pada aspek fluktuasi permintaan pasar; komponen utama difokuskan pada aspek antisipasi – prediksi dan respon.

Fluktuasi permintaan Gula Semut dapat bersumber dari sisi internal dan eksternal rantai pasok. Beberapa sumber internal adalah: (i) pengaruh iklan yang kemudian memengaruhi preferensi konsumen, (ii) ketidakandalan pengiriman Gula Semut dari para petani / pemasok, sehingga produksi Gula Semut dari PT BDMI terlambat. Sumber eksternal dapat karena: (i) sistem logistik yang

kurang dapat diandalkan sehingga sering mengalami keterlambatan pengiriman, (ii) perubahan preferensi konsumen (misal selera), (iii) faktor ekonomi, resesi, inflasi, atau perubahan pendapatan konsumen dapat secara signifikan memengaruhi pola pengeluaran yang kemudian memengaruhi permintaan.

Dalam rantai pasok terdapat perilaku *Bullwhip Effect*, fenomena di mana fluktuasi permintaan kecil di tingkat konsumen akhir dapat menyebabkan variabilitas pesanan yang semakin besar saat bergerak naik melalui rantai pasok (dari pengecer ke distributor, grosir, produsen, hingga pemasok bahan baku). Efek ini seperti cambuk yang dijentikkan, gerakan kecil di gagang menghasilkan gerakan besar di ujung cambuk.

Studi literatur yang dilakukan oleh Ivanov dkk. pada tahun 2018 menghasilkan sebuah taksonomi penyelesaian problem rantai pasok berdasarkan pendekatan Optimisasi atau Simulasi (lihat Gambar 2). Untuk pendekatan Optimisasi terbagi dalam 3 (tiga) pendekatan berbasis (i) Model, (ii) Algoritma dan (iii) Teori berbasis Dinamika Sistem. Teori Dinamika Sistem, terbagi menjadi 4(empat): (i) teori kontrol, (ii) pemrograman dinamis, dan (iii) dinamika sistem dan (iv) teori kekacauan.

Teori Kendali (*Control Theory*), yang menjadi fokus pada penelitian ini, berkontribusi besar dalam penyelesaian permasalahan Rantai Pasok, khususnya dalam pengelolaan sistem operasional (Huang dkk., 2022; Wang dkk., 2023; dan van der Kruk dkk., 2024). Teori Kendali dikembangkan awalnya untuk sistem fisik diawali dengan teori Kendali Klasik yang mengutamakan fungsi transfer kemudian berkembang teori Kendali Modern, yang ditandai dengan pengembangan sistem *state space* (ruang status). Salah satu pendekatan teori kendali modern yang menjanjikan adalah Pengendali Model Prediktif (*Model Predictive Control*) (Dolgui dkk., 2013; Cataldo, 2017; Turan, dkk., 2024).

Penyelesaian problem rantai pasok menggunakan Teori Kendali secara umum dan Pengendali Model Prediktif (PMP) secara khusus sudah dimulai sejak tahun 1999-an, diantaranya dilakukan oleh (Ivanov dkk., 2018; Dolgui dkk. 2013; Müller & Allgöwer, 2017; Rawlings dkk., 2024, Pinho dkk., 2015).

Tujuan penelitian adalah: (i) mengintegrasikan CPFR dan PMPT pada rantai pasok Gula Semut dan (ii) menganalisis pengaruh pola perubahan level permintaan terhadap ketahanan dan efisiensi rantai pasok saat menghadapi fluktuasi permintaan.

Pengendali Model Prediktif (PMP)

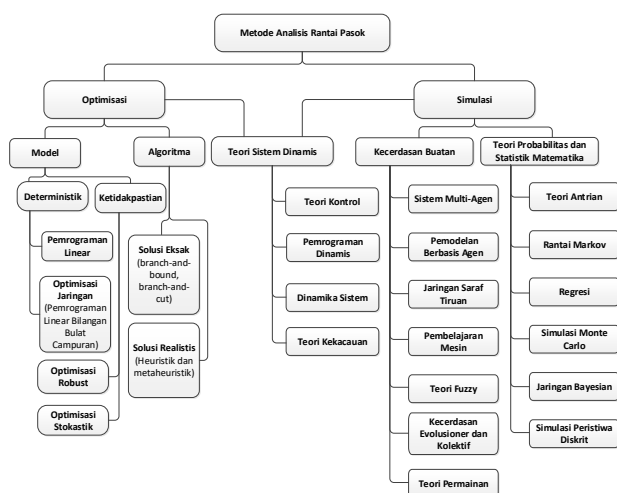
Pengendali Model Prediktif (*Model Predictive Control*) adalah sebuah metode kendali canggih yang bekerja dengan cara memprediksi perilaku sistem di masa depan berdasarkan model matematis (Zhang dkk., 2024; Rawlings dkk., 2024; Turan dkk., 2024). Cara kerja PMP adalah sebagai berikut:

1. **Prediksi Output:** PMP menggunakan model matematis dari sistem untuk memprediksi keluaran (output) sistem dalam rentang waktu tertentu di masa depan, disebut horizon prediksi.
2. **Optimasi:** algoritma PMP kemudian menghitung urutan tindakan kontrol yang optimal untuk meminimalkan suatu fungsi biaya (*cost function*), yang biasanya bertujuan untuk menjaga keluaran sistem sedekat mungkin dengan target yang diinginkan, sambil tetap memenuhi kendala yang ada.
3. **Implementasi:** dari semua tindakan kontrol yang dihitung, hanya tindakan pertama yang diterapkan pada sistem.
4. **Iterasi:** Proses ini kemudian diulang-ulang secara terus-menerus. Pada setiap iterasi, PMP menggunakan data pengukuran terbaru dari sistem untuk memperbarui prediksinya dan menghitung tindakan kendali yang baru.

Keunggulan utama PMP adalah kemampuannya untuk menangani sistem yang kompleks dengan banyak variabel masukan dan keluaran umumnya Multi-Input Multi-Output (MIMO), serta kemampuannya untuk secara eksplisit mempertimbangkan batasan-batasan pada variabel proses (Schildbach & Morari, 2016). PMP banyak digunakan dalam industri proses seperti pabrik kimia, kilang minyak dan juga sistem rantai pasok. PMP diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria, yaitu:

- (i) PMP langsung dan tidak langsung, dibedakan berdasarkan kriteria sinyal kontrol dihitung dan diterapkan secara langsung / tidak ke sistem,
- (ii) PMP Linier dan Tidak Linier, dibedakan berdasarkan kriteria pendekatan sistem,
- (iii) PMP Implisit dan Eksplisit, dibedakan berdasarkan metoda komputasi,
- (iv) PMP Terpusat, Desentralisasi dan Terdistribusi, dibedakan berdasarkan struktur kontrol: yaitu bagaimana kontrol didistribusikan dalam sistem yang lebih besar.

Pada PMP Terpusat (PMPTerp), satu kendali tunggal mengelola seluruh sistem. Pendekatan ini membutuhkan sumber daya komputasi yang signifikan karena harus memproses semua informasi dan membuat semua keputusan secara terpusat (Wang & Wang, (2022). Tantangan komunikasi pun muncul jika sistem tersebar luas. Pada PMP Terdesentralisasi (PMPTerdes), beberapa kendali independen beroperasi pada subsistem yang berbeda. Setiap kendali memiliki model dan masalah optimasinya sendiri, membuat keputusan secara mandiri tanpa banyak koordinasi langsung dengan kendali lain. Hal ini mengurangi kompleksitas komputasi dan masalah komunikasi, tetapi mungkin tidak mengoptimalkan kinerja sistem secara keseluruhan. Pada PMP Terdistribusi (PMPTerdis atau untuk singkatnya PMPT), sebuah jaringan kendali bekerja sama secara kooperatif untuk mencapai tujuan kontrol global. Kendali ini berbagi informasi dan mengkoordinasikan tindakan masing-masing. Pendekatan PMPT ini menyeimbangkan antar efisiensi komputasi dan kemampuan untuk mengoptimalkan sistem yang besar dan kompleks dengan cara yang terkoordinasi. Rincian PMPT dijelaskan pada subbagian selanjutnya.



Gambar 2. Taksonomi penyelesaian problem pada rantai pasok (Ivanov dkk., 2009)

Pengendali Model Prediktif Terdistribusi (PMPT)

Pengendali Model Prediktif Terdistribusi dari Köhler dkk. (2020) digunakan sebagai acuan. PMPT adalah strategi kendali lanjutan, umumnya digunakan untuk sistem skala besar yang saling terhubung (Müller & Allgöwer, 2017). PMPT memecah sistem besar menjadi subsistem yang lebih kecil; masing-masing dengan kendali lokalnya. Kendali lokal ini bekerja sama dan berbagi informasi untuk mencapai tujuan kendali global. PMPT mengelola sistem yang kompleks dengan mendistribusikan beban komputasi dan pengambilan keputusan ke beberapa kendali lokal yang saling terhubung.

Tujuh komponen PMPT dan mekanisme kerjanya (Ribeiro dkk., 2016) adalah sebagai berikut:

- Dekomposisi Sistem: sistem besar dan kompleks dibagi menjadi beberapa subsistem yang lebih kecil, yang saling terhubung.
- Prediksi Output: menggunakan model matematis dari sistem untuk memprediksi keluaran (output) sistem dalam rentang waktu tertentu di masa depan, disebut horison prediksi.
- Pengendali Lokal: setiap subsistem diberikan kendali PMP lokal sendiri. Pengendali lokal ini bertanggung jawab untuk mengelola sebagian dari input dan output (atau status) sistem.
- Optimasi Lokal: setiap pengendali lokal menyelesaikan masalah optimasi yang lebih kecil dalam horison prediksi, seperti PMP tradisional. Namun, optimasi lokal ini mempertimbangkan interaksi dengan subsistem tetangga.
- Pertukaran informasi: kunci efektivitas PMPT adalah kerja sama dan berbagi informasi di antara pengendali lokal. Saling bertukar prediksi, rencana kendali, atau data relevan lainnya dengan subsistem tetangganya, hal ini memungkinkan setiap Pengendali Lokal untuk mengantisipasi tindakan subsistem dan menyesuaikan strateginya sendiri.
- Koordinasi dan tujuan global: melalui pertukaran informasi terkoordinasi ini, Pengendali Lokal secara kolektif bekerja menuju tujuan kontrol global untuk seluruh sistem, meskipun tidak ada satu pengendali pun yang memiliki pandangan lengkap atau kendali langsung atas keseluruhan.
- Receding Horison*: seperti halnya PMP Terpusat, PMPT beroperasi pada *receding horison*. Pada setiap langkah waktu, pengukuran baru diperoleh, masalah optimasi lokal dipecahkan kembali, dan hanya bagian pertama dari tindakan kontrol yang dihitung yang diterapkan; proses kemudian diulang.

PMPT pada Sistem Rantai Pasok

Berdasarkan karakteristik entitas, sistem rantai pasok memang kurang tepat jika dikendalikan secara terpusat (Muller & Allgöwer, 2021); PMPTerdistribusi (PMPT) akan lebih tepat. Penerapan PMPT pada sistem rantai pasok, dimulai dengan menetapkan Tahap (subsistem) pada sistem rantai pasok. Umumnya entitas dalam rantai pasok adalah pemasok (tier-1, tier-2 dst.) – pamanufaktur – pengecer dan pelanggan sehingga penetapan Tahap umumnya mengikuti entitas rantai pasok saja. PMPT mensyaratkan koordinasi dan kolaborasi antar entitas rantai pasok sehingga terlebih dahulu harus ada mekanisme yang menjamin terjadinya kolaborasi dan koordinasi. Penerapan CPFR untuk rantai pasok menjamin terjadinya koordinasi dan kolaborasi.

Diawali dengan perencanaan inisial yang fisibel untuk kemudian rencana tersebut dilaksanakan. Dalam keberjalanannya, jika terjadi perubahan permintaan atau terjadi fluktuasi permintaan, maka untuk beberapa langkah ke depan (horison prediksi) dilakukan prediksi permintaan.

Berdasarkan info permintaan terbaru, kemudian perubahan tersebut dipropagasi dampaknya ke Tahap sebelumnya dan dampak dari perubahan permintaan ini dilihat konsekuensinya pada subsistem lainnya dan dicari variabel keputusan optimal yang terbaru (Ivanov dkk., 2018; Wang, 2004; Hai dkk., 2011).

Berikut adalah notasi yang digunakan.

P	:	jumlah tahapan dalam sistem rantai pasok; $P=3$
i	:	indeks tahapan $i = 1, \dots, P$ dimana tahap-1 adalah petani Nira, tahap-2 adalah PT BDMI dan tahap-3 adalah retailer.
$\tau_1 - \tau_2 - \tau_3$	:	Lead time pada Tahap-1, Tahap-2 dan Tahap-3;
cs_i	:	ongkos inventori / stok per unit di Tahap- i
ca_i	:	ongkos pengadaan / akuisisi per unit di Tahap- i
N_i k	:	Horison prediksi pada Tahap- i indeks prediksi ke $-k$ pada Tahap- i ; $k = 0, 1, \dots, N_i$
$s_i(t)$	:	inventori / stok produk di Tahap- i pada saat- t
$s_i(\cdot t)$	:	trajektori stok di Tahap- i pada saat- t
$a_i(t)$	:	akuisisi produk di Tahap- i , pada saat- t
$a_i(k t)$	:	$a_{i+1}(t) = l_i(t - \tau_{i+1})$ akuisisi produk di Tahap- i , pada saat- t , pada horison prediksi ke- k ; $k = 0, 1, \dots, N_i$
$a_i(\cdot t)$	:	trajektori akuisisi produk di Tahap i , pada saat- t
$d_i(t)$	:	demand di Tahap- i pada saat- t
$d_i(1 t)$	:	$d_i(t) = o_{i+1}(t)$ prediksi demand di Tahap- i , pada saat- t , untuk waktu $t + 1$
$d_i(k t)$	:	prediksi demand di Tahap- i , pada saat- t , untuk waktu $t + k$
$d_i(k t + 1)$	:	Prediksi demand di Tahap- i , pada saat $t + 1$, untuk waktu $t + 1 + k$
$d_i(\cdot t)$	:	kumpulan prediksi demand di horison prediksi, pada Tahap- i , pada waktu- t untuk seluruh waktu dari $k = 0, \dots, N_i$
$= \{d_i(0 t), \dots, d_i(N_i$	:	demand pada Tahap- P (Tahap akhir) pada saat- t
$d_P(t)$	:	$d_{cust}(t)$ demand customer pada saat- t
$d_{cust}(t)$	:	Order yang dilakukan oleh tahap- $i+1$ pada saat- t
$o_{i+1}(t)$	:	jumlah komoditas/produk yang dikirimkan dari Tahap- i ke Tahap- $i + 1$ pada saat- t (outflow)
$l_i(t)$	:	jumlah komoditas/produk yang dikirimkan ke customer dari Tahap- P pada saat- t
$l_P(t)$	:	adalah spesifikasi ketidakpastian, tube prediksi demand di Tahap- i pada elemen ke- k
$W_i(k)$	:	tube demand di Tahap- $i + 1$ untuk seluruh N_i elemen
$W_{i+1}(\cdot)$	:	

$W_{i+1}(k)$	:	variasi dari elemen ke $-k$ dari prediksi <i>demand</i> di Tahap- $i + 1$
$W_{i+1}(N_i - 1)$	:	variasi dari elemen ke $-(N_i - 1)$ dari prediksi <i>demand</i> di Tahap- $i + 1$
$W_{cust}(k),$ $k = 0, \dots, N_{cust} - 1$	:	$W_i(k) \subseteq R, k = 0, \dots, (N_i - 1)$ membatasi kemungkinan variasi elemen ke $-k$ dari lintasan permintaan yang diprediksi dari satu langkah waktu ke langkah waktu berikutnya, dan $W_i(N_i - 1)$ membatasi lintasan yang diperbarui agar mendekati titik akhir lintasan sebelumnya.
$\bar{W}_i(k)$	:	<i>Tube</i> variasi <i>demand</i> di Tahap customer untuk elemen ke $-k$.
$\bar{W}_i(\cdot)$	:	ukuran pipa di sekitar prediksi stok sebelumnya
$\bar{W}_i(k + 1)$	:	$s_i(\cdot t)$ di Tahap- i pada elemen ke $-k$
X_i	:	ukuran pipa di sekitar prediksi sebelumnya di Tahap- i
$\bar{X}_i(k)$	:	ukuran pipa di sekitar prediksi stok sebelumnya di Tahap- i pada elemen ke $-k + 1$
	:	set kendala Tahap- i
	:	set kendala status yang terbatas untuk nilai nominal prediksi trajektori stok di Tahap- i yang bergantung pada margin ukuran ketidakpastian <i>close loop</i> pada elemen ke $-k$

Penjelasan metoda PMPT Köhler sudah menggunakan sistem rantai pasok Gula Semut PT BDMI yang terdiri dari 3 (tiga) tahap, yaitu pemasok yang meliputi petani-pengrajin-pengepul (untuk berikutnya disebut Tahap-1), PT BDMI (Tahap-2) dan Pengecer Luar Negeri (Tahap-3) yang kemudian Pelanggan (berikutnya disebut Tahap-4). Misal untuk $i = 2$, akan didapatkan hubungan seperti terlihat pada Gambar 3.

Pengecer Luar Negeri (Tahap- $(i + 1)$); memesan sebesar *demand* $d_{i+1}(t)$ yang kemudian akan menjadi order o_{i+1} yang otomatis akan menjadi *demand* untuk Tahap- i , kemudian menjadi order o_i yang kemudian dilanjutkan menjadi *demand* $d_{i-1}(t)$ dan kemudian menjadi order o_{i-1} .

Ketika produk datang di Tahap- $(i - 1)$, disebut akuisisi a_{i-1} , akan dikirimkan produk ke Tahap- i sebesar l_{i-1} yang kemudian menjadi a_i di Tahap- i ; kemudian menjadi l_i menyatakan berapa unit Gula Semut yang akan dikirimkan dari Tahap- i ke Tahap- $(i + 1)$. *Delay* pengiriman adalah τ_i dan seterusnya hingga sampai ke Pelanggan. Mekanisme ini disebut mekanisme *loop* tertutup.

Untuk Tahap- i , l_i adalah jumlah komoditas yang dikirimkan dari Tahap- i ke Tahap berikutnya, Tahap- $(i + 1)$; d_i adalah permintaan (*demand*) yang diterima oleh Tahap- i dari Tahap- $(i + 1)$. Permintaan d_i , diproses dan menjadi order o_i yang akan diteruskan menjadi d_{i-1} ; sementara l_i yang dikirimkan akan menjadi a_i , yaitu jumlah barang yang diakuisisi oleh Tahap- $(i + 1)$.

Jika kapasitas setiap entitas dalam sistem rantai pasok selalu mampu untuk memenuhi berapa pun order yang datang, baik melalui kapasitas produksi ataupun karena memiliki *safety stock*, sistem rantai pasok tidak akan

menghadapi masalah. Dalam kenyataan, selalu akan ada keterbatasan sehingga pada setiap tahap perlu ditentukan berapa order yang dilakukan atau sama halnya ditentukan berapa tingkat akuisisi yang akan dilakukan pada setiap tahap agar sistem rantai pasok dapat efektif memenuhi permintaan pelanggan dengan tetap menjaga efisiensi operasional walau terjadi perubahan permintaan.

PMPT adalah metode kendali canggih dengan prinsip utama memprediksi perilaku sistem di masa depan berdasarkan model matematis, dilakukan prediksi untuk N ke depan di setiap tahap, kemudian pengendali akan menentukan variabel keputusan untuk N periode ke depan.

Sistem yang dikendalikan direpresentasikan dalam persamaan (1) – (4).

$$s_i(t + 1) = s_i(t) + a_i(t) - l_i(t) \quad (1)$$

$$l_i(t) = d_i(t) \quad (2)$$

$$s_i(t + 1) = s_i(t) + a_i(t) - d_i(t) \quad (3)$$

$$d_i(\cdot | t) = \{d_i(0|t), \dots, d_i(N_i - 1|t)\} \quad (4)$$

$$d_i(k|t + 1) \in \{d_i(k + 1|t)\} \oplus W_{i+1}(k),$$

$$k = 0, \dots, N_i - 2$$

Algoritma Köhler dkk. (2020)

Berikut adalah langkah-langkah pada algoritma Köhler (Köhler, dkk., 2020), yang disebut Pengendali Model Prediktif Terdistribusi (PMPT) sekuensial (*Sequential Distributed Economic Model Predictive Control*) dengan prediksi semi-akurat.

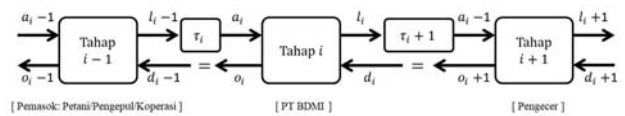
Langkah-1: untuk waktu $t = t_0 - 1$, cari solusi inisial yang fisibel untuk semua problem PMPT, abaikan kendala 13e.

Langkah-2: pada waktu $t \in \mathbb{Z}_{t_0}$, secara sekuensial untuk $i = P, \dots, 1$, temukan $d_i(\cdot | t) = o_{i+1}(\cdot | t)$, dari $i + 1$ dengan $o_{P+1}(\cdot | t) := d_{icust}(\cdot | t)$ dan selesaikan problem optimasi PMPT (lihat persamaan 12-13),

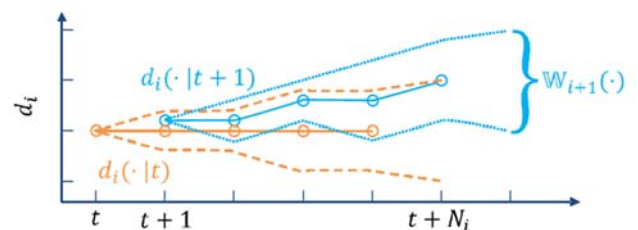
Langkah-3: tetapkan $l_i(t) = d_i(t) = o_{(i+1)}(0|t)$ dan $a_i(t) = o_i(t - \tau_i)$ untuk semua $i \in \mathbb{I}_{[1,P]}$.

Langkah-4: tetapkan $t := t + 1$ kembali ke langkah 2.

Pada saat- t , akan dilakukan prediksi permintaan di masing-masing tahap dimulai dari Tahap-3 (Pengecer). Kumpulan prediksi permintaan untuk N_i ke depan, $d_i(\cdot | t)$ dimana $d_i(\cdot | t)$ adalah trajektori/kumpulan prediksi pada saat- t untuk N satuan waktu ke depan. Saat sistem memasuki $t + 1$, PMPT akan memprediksi lagi $d_i(\cdot | t + 1)$, variasi $d_i(\cdot | t + 1)$ akan dibatasi oleh $W_{i+1}(\cdot)$ (lihat Gambar 4).



Gambar 3. Sistem rantai pasok gula semut dengan $P = 3$ (Köhler dkk, 2020)



Gambar 4. Variasi permintaan dan variasi prediksi (Köhler dkk., 2020)

Pada Langkah-2, PMPT memprediksi permintaan/demand $d_i(\cdot|t)$ untuk horison prediksi ke depan, dimulai dari Pelanggan (Tahap-4) hingga Tahap-1. Untuk setiap tahap dilakukan optimasi dalam menentukan variabel keputusan a_i . Pada Langkah-3 variasi perubahan permintaan akan disesuaikan ke tahap sebelumnya. Untuk setiap tahap dilakukan optimasi problem PMPT. Selanjutnya, waktu dimajukan ke $t+1$ dst. hingga sampai ke N_i .

Pada setiap waktu- t , di setiap tahap dibuat urutan permintaan ke depan yang diprediksi sesuai persamaan (4) dimana N_i adalah horison prediksi untuk Tahap- i .

Persamaan (5) menunjukkan bahwa prediksi permintaan antar $t+1$ dan t dijaga dalam range area $\mathbb{W}_{i+1}$. Demikian pula untuk $N_i - 1$, $d_i(N_i - 1|t+1) \in \{d_i(N_i - 1|t)\} \oplus \mathbb{W}_{i+1}(N_i - 1)$. $\mathbb{W}_i(k)$ membatasi variasi yang mungkin dari elemen ke- k untuk trajektori prediksi permintaan.

$$a_i(k|t) \in \{a_i(k+1|t-1)\} \oplus \emptyset, \quad (5)$$

$$k = 0, \dots, \tau_i - 1$$

$$a_i(k|t) \in \{a_i(k+1|t-1)\} \oplus \mathbb{W}_i(k - \tau_i),$$

$$k = \tau_i, \dots, N_i - 2$$

$$a_i(N_i - 1|t) \in \{a_i(N_i - 1|t-1)\} \oplus \mathbb{W}_i(N_i - 1 - \tau_i)$$

Persamaan (5) ini deskripsi dari variasi akuisisi untuk Tahap $(i-1)$ seperti halnya pada persamaan (4).

Persamaan (7) menunjukkan evolusi inventori/stok di setiap Tahap- i .

$$a(\cdot|t) = \{o_i(t - \tau_i), \dots, o_i(t - 1), \underbrace{\{o_i(0|t), \dots, o_i(N_i - \tau_i - 1|t)\}}_{o_i(\cdot|t)}\} \quad (6)$$

$$s_i(k|t+1) \in \{s_i(k+1|t)\} \oplus \mathbb{W}_i(k), \quad (7)$$

$$k = 0, \dots, N_i - 1,$$

$$s_i(N_i|t+1) \in \{s_i(N_i|t) - d_i(N_i - 1|t) + a_i(N_i - 1|t)\} \oplus \mathbb{W}_i(N_i)$$

$$\mathbb{W}_i(k+1) = \mathbb{W}_i(k) \oplus -\mathbb{W}_{i+1}(k) \ominus \mathbb{W}_i(k - \tau_i) \quad (8)$$

$$s_i(t+k) \in \{s_i(k|t)\} \oplus \mathbb{W}(k-1) \oplus \dots \oplus \mathbb{W}(0) \quad (9)$$

$$= \{s_i(k|t)\} \oplus \bigoplus_{j=0}^{k-1} \mathbb{W}_i(j), \quad k = 0, \dots, N_i,$$

$$s_i(t+N_i+1) \in \{s_i(N_i|t) - d_i(N_i - 1|t) + a_i(N_i - 1|t)\}$$

$$\bigoplus \bigoplus_{j=0}^{N_i} \mathbb{W}_i(j)$$

$$\mathbb{W}_i(N_i) = \emptyset \quad (10)$$

$$\mathbb{W}_i(N_i - 1) = \emptyset \quad (11)$$

Untuk memastikan terpenuhinya kendala dari level inventori/stok aktual, lintasan inventori/stok, nominal yang diprediksi harus tetap berada di luar batas kendala hanya dengan margin ketidakpastian *loop* tertutup di atas. Oleh karena itu, himpunan kendala keadaan (*state*) yang diperketat $\mathbb{X}_i(k)$ untuk lintasan stok nominal yang diprediksi berdasarkan ukuran margin ketidakpastian *loop* tertutup diperkenalkan, yaitu $\mathbb{X}_i(k) := \mathbb{X}_i \ominus \bigoplus_{j=0}^{k-1} \mathbb{W}_i(j)$, $k = 0, \dots, N_i$.

Fungsi tujuan yang digunakan adalah fungsi ongkos di setiap Tahap yang bersifat kuadratik (lihat persamaan-12)

$$\min_{a_i(\cdot|t)} \sum_{k=0}^{N_i-1} \ell_i(s_i(k|t), a_i(k|t)) = \min_{a_i(\cdot|t)} \sum_{k=0}^{N_i-1} (s_i(k|t) * cs_i + a_i(k|t) * ca_i).$$

Pada penelitian ini cs_i , ongkos menyimpan komoditas di Tahap- i , dan ca_i , ongkos akuisisi di Tahap- i , bernilai konstan di setiap setiap k . Optimisasi problem PMPT mengikuti langkah-langkah berikut:

$$\min_{a_i(\cdot|t)} \sum_{k=0}^{N_i-1} \ell_i(s_i(k|t), a_i(k|t)) \quad (12)$$

dengan memperhatikan

$$s_i(0|t) = s_i(t) \quad (13a)$$

$$s_i(k+1|t) = s_i(k|t) + a_i(k|t) - d_i(k|t) \quad (13b)$$

$$k = 0, \dots, N_i - 1$$

$$s_i(k|t) \in \mathbb{X}_i(k), \quad k = 0, \dots, N_i \quad (13c)$$

$$s_i(N_i|t) \geq s_i(N_i - 1|t) \quad (13d)$$

$$a_i(k|t) \text{ dengan memperhatikan} \quad (13e)$$

keterbatasan akurasi semi (kendala 5)

$$a_i(k|t) \geq 0, \quad k = 0, \dots, N_i - 1, \quad (13f)$$

Persamaan (12) adalah fungsi tujuan, persamaan (13a) menyatakan bahwa prediksi stok pada horison prediksi ke-0 adalah sama dengan nilai s tahap- i saat- t , persamaan 13b menyatakan hukum konservasi terkait inventori, persamaan 13c menyatakan bahwa prediksi stok di tahap- i pada saat- t adalah elemen dari $\mathbb{X}_i(k)$.

Persamaan (13d) menyatakan bahwa tingkat inventori pada saat- t , persamaan (13e) lebih menjaga bahwa keterbatasan akurasi, $a_i(k|t)$ elemen bagian dari $\mathbb{X}_i(k)$, persamaan (13f) untuk menjamin nonnegativitas.

METODOLOGI

Objek Penelitian

Objek penelitian adalah rantai pasok produk Gula Semut khusus untuk pasar Luar Negeri dari PT BDMI yang berlokasi di Banyumas - Jawa Tengah, sebuah perusahaan penghasil Gula Semut dengan beberapa varian dan sudah mengekspor produknya ke berbagai negara di luar negeri.

Alat dan Bahan

Aplikasi yang digunakan adalah Excel Solver dan MATLAB 2025. Nilai variabel sistem rantai pasok ditabulasikan di Excel terlebih dahulu; kemudian optimasi dilakukan menggunakan Excel Solver dan MATLAB 2025. Terdapat 2 (dua) program yang dikembangkan: (i) program Algoritma Köhler yang disebut Sequential Distributed Economic PMP dengan prediksi semi akurat (persamaan 11-12) dan (ii) program optimisasi PMPT.



Gambar 5. Alur penelitian

$$i = 1 \quad w_1(\cdot) = \{3, 4, 5, 2\}$$

Alur Penelitian

Gambar 4. menunjukkan alur penelitian yang meliputi: (i) pemahaman masalah, (ii) perumusan masalah da tujuan, (iii) perencanaan rantai pasok menggunakan konsep CPFR, (iv) pemodelan PMPT, (v) pengujian sistem PMPT dengan skenario perubahan permintaan yang berfluktuasi, (vi) analisis dan (vii) kesimpulan.

Berdasarkan observasi pada rantai pasok PT BDMI, dirangkum situasi masalah yang dihadapi dan sebagai ukuran kinerja ketahanan rantai pasok adalah tingkat pemenuhan permintaan/*demand* (Adobor & McMullen, 2018) dan untuk ukuran kinerja efisiensi rantai pasok adalah ongkos total sistem rantai pasok yang terdiri dari ongkos akuisisi/pengadaan dan ongkos penyimpanan/ inventori.

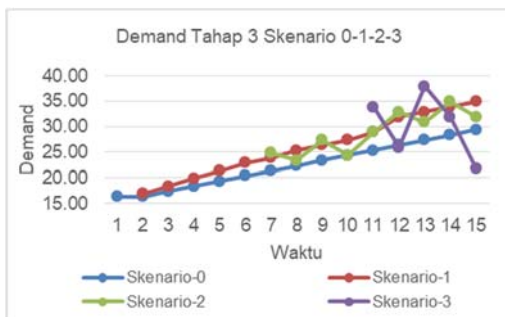
Rumusan masalah penelitian adalah bagaimana metoda PMPT dapat memaksimalkan kinerja ketahanan dan efisiensi rantai pasok Gula Semut dalam kondisi permintaan berfluktuasi.

Tujuan penelitian adalah menganalisa metoda PMPT yang dikembangkan Köhler dkk. untuk rantai pasok produk Gula Semut dengan prasyarat bahwa sebelum menerapkan PMPT, sistem rantai pasok sudah melakukan perencanaan kolaboratif mengacu pada konsep CPFR.

Metoda PMPT memang dikembangkan untuk dapat memberi respon tindakan kendali secara cepat / secara real time (Muller dkk., 2017) dan (Hipólito,2020), sehingga dalam penerapannya, sistem rantai pasok sudah harus mampu memonitor status sistem yang berpengaruh pada variabel pengendali secara kontinu (Arauz dkk. 2022; Barati, 2025, Nabayiga dkk. 2025). Pada penelitian ini, pelaksanaan sistem rantai pasok Gula Semut PT BDMI berdasarkan metoda PMPT tidak dilakukan pada sistem nyata tetapi disimulasikan di komputer.

Skenario Prediksi Perubahan Tingkat Permintaan

Terdapat 4 (empat) skenario prediksi perubahan demand /permintaan yaitu: (i) skenario-0 adalah kondisi dimana tidak ada perubahan permintaan, semua sesuai dengan data awal permintaan, (ii) skenario-1 adalah prediksi perubahan demand relatif menaik dengan nilai lebih besar dari yang direncanakan (trend menaik) dan (iii) skenario-2 adalah prediksi perubahan permintaan dengan trend menaik - ada fluktuasi dan (iv) skenario-4 adalah prediksi perubahan permintaan terjadi pada kondisi murni fluktuasi (prediksi permintaan baru, dapat lebih besar atau lebih kecil dari yang direncanakan (lihat Gambar 6.)



Gambar 6. Perubahan demand skenario 0-1-2-3

Tabel 1. Spesifikasi variasi perubahan permintaan

Tahap	$\mathbb{W}_i(k) = [-w_i(k), w_i(k)]$
$i = 4 = \text{cust}$	$w_4(\cdot) = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2\}$
$i = 3$	$w_3(\cdot) = \{1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2\}$
$i = 2$	$w_2(\cdot) = \{1, 2, 3, 3, 3, 2\}$

Tabel 2. Urutan pemasok untuk PT BDMI

Label	Nama Pemasok	Lokasi
A1	UD DUA PUTRA (Poktan Sari Manggar Barokah)	Banyumas
A2	KSU Nira Satria	Banyumas
A3	Kopwan Srikandi Purworejo	Purworejo
A4	Kelompok Tani Gusem Pageraji	Banyumas
A5	Kelompok Tani Sokawera	Banyumas

Skenario fluktuasi demand diset terjadi pada $t = 10$ (skenario-1), $t = 15$ (skenario-2) dan $t = 20$ (skenario-3). Variasi perubahan permintaan memiliki spesifikasi seperti terlihat pada Tabel.1.

Saat terjadi prediksi permintaan yang baru, dengan mengikuti algoritma Köhler dkk., dicari nilai variabel keputusan baru, yang dapat meminimasi fungsi tujuan. Pada penelitian ini, variabel keputusan adalah variabel akuisisi, $a_i(t)$. Analisis dilakukan dengan memperhatikan efek fluktuasi permintaan yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perencanaan berdasarkan CPFR

Produk Gula Semut yang dibeli dari pemasok berada dalam keadaan kering petani yang artinya masih berkadar air tinggi sekitar 80%, sehingga PT BDMI perlu melakukan kegiatan pengeringan/oven, Quality Control (QC), dan *packaging*. Batas maksimal kadar air produk jadi adalah 2%. Penyusutan pada proses oven berlisir sekitar 2-5% dengan rata-rata 3,5%. Penyusutan pada proses ayak adalah 10%. Penyusutan total adalah 13,15 % sehingga untuk 1.000 kg Gula Semut dari pemasok, maka PT BDMI akan menghasilkan 868,5 kg Gula Semut siap jual.

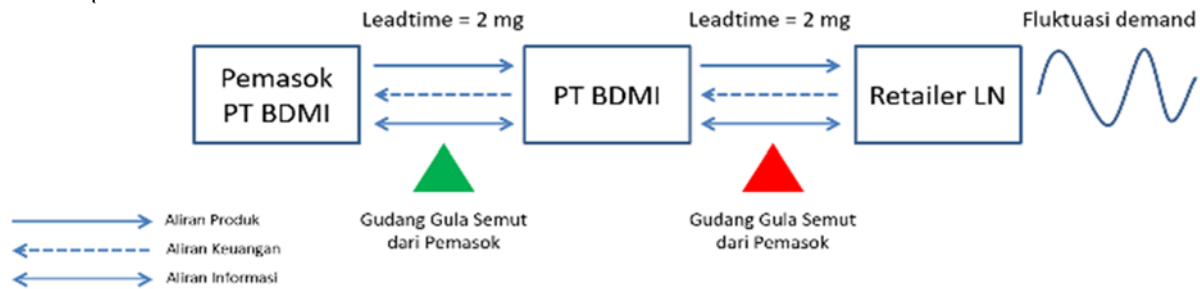
Berdasarkan permintaan dari Pengecer LN, PT BDMI merencanakan produksinya dengan rata-rata permintaan adalah 16.410,33 kg per bulan. *leadtime* di Pengecer dan di pemasok adalah masing-masing 2 (dua) minggu. Setiap kali pesan ada sekitar 8.000 kg dan *safety stock* adalah 1.900 kg atau 1,9 ton.

CPFR dimulai dari perencanaan meliputi pemilihan pemasok untuk kemudian proses kontrak dengan para pemasok; kontrak ini menjadi jaminan keberadaan Gula Semut Kering sehingga PT BDMI dapat andal dalam mengisi pemenuhan pelanggan. Hasil CPFR menjadi syarat diberlakukannya metoda PMPT. Rincian hasil tahap *planning* pemilihan pemasok, meramalkan penjualan tahun depan yang kemudian dilanjutkan rencana produksi dapat dilihat pada Pangestuti dkk. (2022).

Terdapat 5 (lima) pemasok Gula Semut ke PT BDMI yaitu pemasok-A1, A2, A3, A4, A5 (lihat Tabel 2). Empat kriteria dalam pemilihan pemasok: (i) harga, (ii) kualitas, (iii) jumlah produksi dan (iv) lokasi. Setelah menerapkan metoda pemilihan pemasok diperoleh urutan pemasok adalah A1 - A4 - A2 - A3 dan A5.

Berdasarkan data penjualan tahun sebelumnya, PT BDMI meramalkan permintaan yang akan terjadi di tahun mendatang. Berdasarkan hasil peramalan tersebut dibuatlah rencana produksi. Hasil peramalan dijadikan rencana produksi; secara sederhana jumlah total 196.924 kg per tahun dibagi untuk 12 bulan menjadi 16.410,33 kg per bulan ($\approx 16,5$ kg per bulan) kemudian dibagi untuk para

pemasok yang telah ditentukan. Berikutnya, dibuat perencanaan produksi dan dilaksanakan.



Gambar 7. Model konseptual rantai pasok gula semut PT BDMI

Tabel 3. Hasil perencanaan CPFR untuk PT BDMI

No.	Deskripsi	Hasil (kg)
1	Perkiraan permintaan per bulan	16.410,30
2	Safety Stock	1.994,70
3	Reorder Point	10.199,80
4	Kebutuhan Gula Semut kering petani/bulan	18.971,50
5	Order Quantity	9.485,70

Tabel 4. Data penjualan dan peramalan gula semut PT BDMI

Bulan	Data penjualan 3 tahun terakhir (kg)			Peramalan (kg)
	Tahun-1	Tahun-2	Tahun-3	Tahun-4
Jan	13.096	14.130	16.223	16.089
Feb	13.123	15.040	15.234	16.147
Mar	15.087	16.043	15.126	16.206
April	13.130	14.107	16.217	16.264
Mei	13.072	15.118	15.395	16.323
Juni	15.111	16.113	15.059	16.381
Juli	13.090	14.133	16.224	16.440
Agus	15.098	16.154	15.105	16.498
Sept	16.132	16.106	15.234	16.556
Okt	14.069	16.241	15.399	16.615
Nov	15.092	16.204	15.293	16.673
Des	13.093	16.097	15.107	16.732
Total	169.190	185.486	185.616	196.924

Tabel 5. Data dan solusi fisibel inisial

$a_1 = 10.000$; $a_2 = 15.000$; dan $a_3 = 10.000$						
$s_1(t_0) = 14.000$; $s_2(t_0) = 11.000$; $s_3(t_0) = 7.000$						
untuk $l_i(t) = a_i(t) = d_P(t) = 10.000$ untuk semua $t = t_0 - \tau, \dots, t_0$						
P	=	3	s_1^d	=	2.000	<i>Desired stock</i> di Tahap-1
i	=	1,2,3	s_2^d	=	2.000	<i>Desired stock</i> di Tahap-2
N_1	=	6	s_3^d	=	2.000	<i>Desired stock</i> di Tahap-3
N_2	=	8	τ_1	=	2	
			τ_2	=	2	
N_3	=	10	τ_3	=	2	
	=	2				

Dalam menjalani tahun ke-4 terjadi fluktuasi permintaan / demand sesuai skenario yang telah ditentukan di bagian Metodologi, skenario fluktuasi demand. Data fluktuasi dibangkitkan untuk menguji kemampuan PMPT dalam

memprediksi dan mengendalikan fluktuasi dengan tetap memperhatikan efisiensi. Terlihat pada Tabel 3. perkiraan permintaan Gula Semut di PT BDMI adalah sebanyak 16.410,3 kg/bulan. PT BDMI harus melakukan pengadaan

ketika stok Gula Semut siap jual di gudang berjumlah 10.199,816 kg atau sekitar 10,2 ton.

Tabel 6. Langkah 1 -4 algoritma PMPT Köhler

Langkah-1:	
$t_0 = 10$; maka $t = t_0 - 1 = 10 - 1 = 9$ (hari ke-9) di saat- $t = t_0 - 1$; dimana $t_0 = t - \tau_1 = t - 2$; dimana nilai $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 2$ (satuan minggu), Horison Prediksi adalah $N_1 = 6$ (mg); $N_2 = 8$ (mg); $N_3 = 10$ (mg) Kemudian dicari solusi fisibel awal dengan mengabaikan kendala persamaan 13e .	
Langkah-2	
Pada waktu $t \in \mathbb{I}_{\geq t_0}$, secara sekuensial untuk $i = P, \dots, 1$, temukan $d_i(\cdot t) = o_{i+1}(\cdot t)$, dari $i + 1$ dengan $o_{P+1}(\cdot t) := d_{cust}(\cdot t)$ dan selesaikan problem optimasi PMPT. ditetapkan pada saat awal adalah minggu ke-9 $t = t_0 - 1$; $t_0 = 10 - 1 = 9$ $i = 3 (= P)$; $N_3 = 6$ mencari $d_i(\cdot t) = o_{i+1}(\cdot t)$ mulai dari $i + 1$ dengan $o_{P+1}(\cdot t) := d_{cust}(\cdot t)$ $o_{P+1}(\cdot t) :$ $= d_{cust}(\cdot t)$	
$N_3 = 6$ $o_4(\cdot t) :=$ $\{o_4(0 t), o_4(1 t), o_4(2 t), o_4(3 t),$ $o_4(4 t)\}$ $= \{d_4(0 t), d_4(1 t), d_4(2 t), d_4(3 t),$ $d_4(4 t), d_4(5 t)\}$ $= \{17, 18, 16, 19, 20, 17\}$	
Cari $d_i(\cdot t) =$ $o_{i+1}(\cdot t)$ $d_3(\cdot t) = o_4(\cdot t)$ $d_3(\cdot t) = \{17, 18, 16, 19, 20, 17\}$ var, keputusan $o_3(\cdot t) :=$ $\{o_3(0 t), o_3(1 t), o_3(2 t), o_3(3 t),$ $o_3(5 t)\}$	
$i = 2$; $N_2 = 6$ $d_i(\cdot t)$ $= o_{i+1}(\cdot t)$ $d_2(\cdot t) = o_3(\cdot t)$ $o_3(\cdot t) :$ $= \{o_3(0 t), o_3(1 t), o_3(2 t), o_3(3 t),$ $o_3(4 t), o_3(5 t)\}$	
Var, keputusan $o_2(\cdot t) :=$ $\{o_2(0 t), o_2(1 t), o_2(2 t), o_2(3 t), o_2(4 t), o_2(5 t)\}$ $i = 1$; $N_1 = 4$ $d_i(\cdot t)$ $= o_{i+1}(\cdot t)$ $d_1(\cdot t) = o_2(\cdot t)$ $d_1(\cdot t) = o_2(\cdot t) = \{o_2(0 t), o_2(1 t), o_2(2 t), o_2(3 t)\}$ Var, keputusan $o_1(\cdot t) :=$ $\{o_1(0 t), o_1(1 t), o_1(2 t), o_1(3 t)\}$ Kemudian problem Optimasi PMPT diselesaikan, dimana variabel keputusannya adalah a_3, a_2, a_1	
Langkah-3	
$l_i(t) = d_i = o_{i+1}(0 t)$ $a_i(t) = o_i(t - \tau_1)$ Untuk semua $i \in \mathbb{I}_{[1,P]}$.	
Langkah-4	
$t := t + 1$	

Pada penelitian ini, data permintaan yang digunakan adalah data 3 (tiga) tahun, yaitu tahun ke-1, 2 dan 3 (lihat Tabel 4) kemudian dilakukan peramalan untuk tahun ke-4; Hasil peramalan permintaan dapat dilihat pada kolom tahun ke-4 (lihat Tabel 4). PT BDML harus memiliki *safety stock* sebanyak 1.994,7 kg Gula Semut siap jual. Jumlah pemesanan barang (*Purchase Order*) berpatokan sesuai dengan hasil perhitungan yaitu kurang lebih 9.485,7 kg Gula Semut kering petani untuk menghasilkan 8.205,166 kg Gula

Semut siap jual setelah mengalami penyusutan sebanyak 13,5%. *Supply* produk Gula Semut dilakukan oleh 3 (tiga) *supplier* terpilih.

Pada dasarnya, kebijakan inventori di gudang produk jadi mengikuti metoda-Q probabilistik. Dengan *demand* 16.410,33 kg per bulan, dan *leadtime* adalah 2 (dua) minggu, *Reorder Point* (ROP) adalah sebuah titik dimana perusahaan sudah harus memesan kembali ke pemasok.

Rata-rata *leadtime* setelah perusahaan berkontrak adalah 2 (dua) minggu /14 hari; kebutuhan per 2 (dua) minggu adalah $0,5 \times 16.410,33 \text{ kg} = 8.205,16 \text{ kg}$. Untuk memenuhi permintaan rata-rata dalam 1 (satu) bulan sebanyak 16.410,33 kg Gula Semut siap jual.

Safety stock untuk PT BDML adalah (Penjualan Bulanan Tertinggi x *Lead Time* Terlama) - (Rata-Rata Penjualan Bulanan x Rata-Rata *Lead Time*) sehingga diperoleh *Safety Stok* $= (16.732 \times 0,6) - (16.089,1 \times 0,5) = 1.994,65 \text{ kg/1,9 ton}$; sedangkan untuk *Reorder Point* diperoleh 10.199,816 kg.

Sebelum Gula Semut diperjualbelikan, Gula Semut tersebut melewati 2 (dua) proses di pabrik yaitu proses oven dan proses ayak. Dari kedua proses tersebut terjadi adanya penyusutan produk sebesar 13,5% sehingga perusahaan harus melakukan perencanaan berapa banyak Gula Semut kering petani yang harus dipesan dari *supplier* untuk memenuhi kebutuhan perbulan kurang lebih 16.410,33,1 kg. PT BDML harus menyediakan 18.971,47 kg Gula Semut kering petani untuk memenuhi kebutuhan permintaan dalam 1 (satu) bulan sebanyak 16.410,33 kg atau dikarenakan pengiriman Gula Semut dilakukan 2 (dua) minggu sekali maka jumlah dalam sekali order kurang lebih 9.485,73 kg Gula Semut kering petani.

Hasil Pengendalian Berdasarkan PMPT Köhler

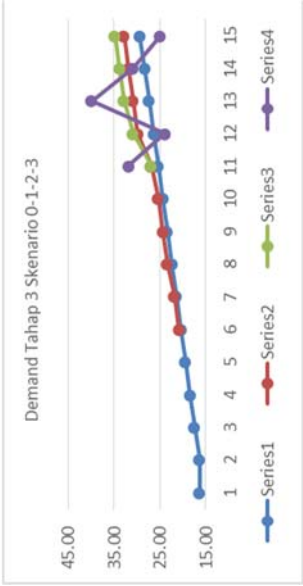
Sistem rantai pasok PT BDML dimodelkan dalam sistem rantai pasok 3 (tiga) tahap seperti halnya model Köhler. Gambar 7 menunjukkan model konseptual dari rantai pasok produk Gula Semut PT BDML. Dengan $P = 3$ (tiga) tahap, Tahap-1 adalah kumpulan petani nira/pengrajin Gula Semut, Tahap-2 adalah PT BDML sebagai penghasil Gula Semut siap pakai dan Tahap ke-3 adalah kumpulan Pengecer untuk melayani pelanggan luar negeri.

Dinamika sistem rantai pasok yang umumnya dihadapi perusahaan bersumber pada perubahan permintaan baik itu fluktuatif atau tidak, dan kendala teknis, misal keterlambatan pengiriman dan lain-lain. Penelitian ini, berfokus pada perubahan permintaan saja; dimulai dari permintaan pelanggan, d_4 , yang menjadi order, o_4 , kemudian mengalir hingga ke Tahap $i = 1$ yang akan menjadi permintaan Tahap- i , d_i menjadi o_i untuk Tahap- $i = 1$ dan seterusnya.

Tabel 5 adalah solusi awal yang fisibel yang terdiri dari data saat inisial dan hasil optimasi inisial dari metoda PMPT Köhler. Untuk menguji algoritma PMPT Köhler, dibentuk 4 (empat) skenario perubahan demand, seperti terlihat pada Gambar 6 terdahulu, yang telah dijelaskan pada sub bagian metodologi.

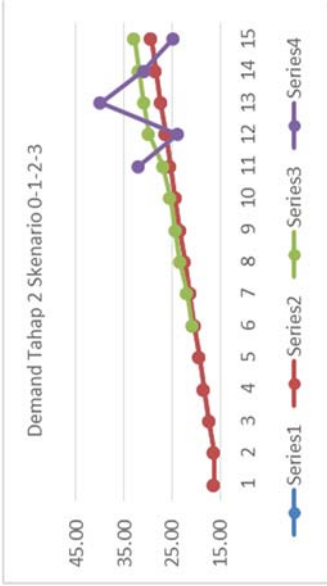
Pada intinya, perencanaan awal dijalankan, kemudian pada minggu ke-10, terjadi perubahan demand dan sistem rantai pasok harus menemukan nilai keputusan yang baru yaitu nilai a_1, a_2 , dan a_3 . Pada $t=15$ permintaan dari pelanggan berubah lagi dan sistem harus mencari keoptimalannya yang baru, demikian pula pada minggu ke-20. Gambar 8 menunjukkan perubahan status sistem saat penerapan metoda PMPT Köhler yang menunjukkan perjalanan inventori/stok (s_i), permintaan/demand (d_i) dan akuisisi komoditas (a_i) pada Tahap-1, Tahap-2 dan Tahap-3 menggunakan permintaan pelanggan yang berubah-ubah, dan ditabulasikan pada Tabel 7.

DEMAND

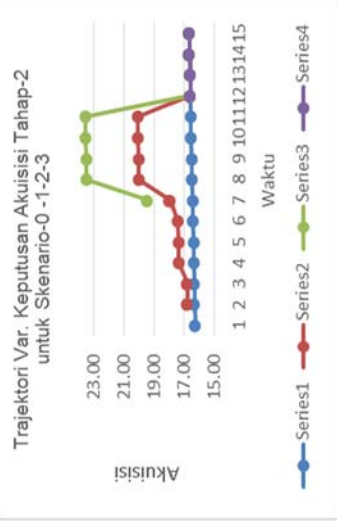


Tahap-3

AKUISISI

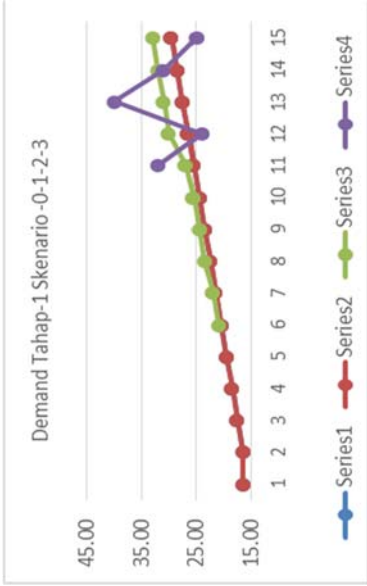
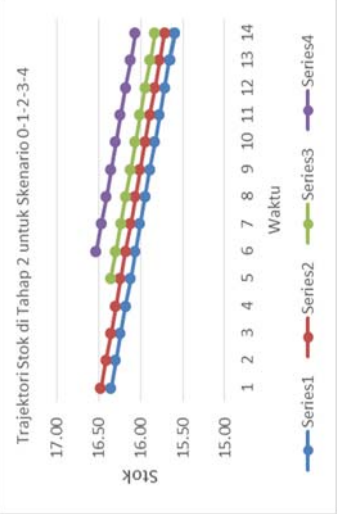
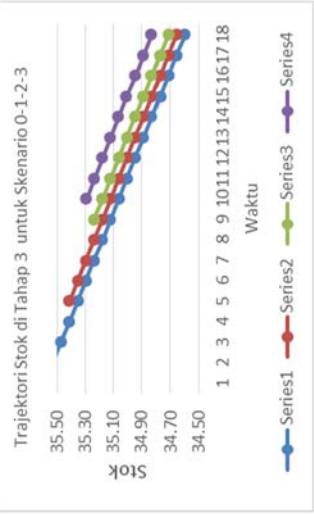


Tahap-2

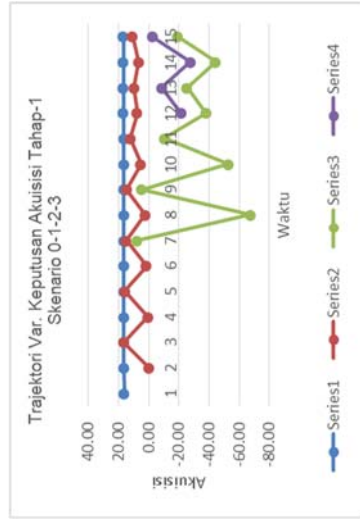


Gambar 8. Trajektori variabel demand – akuisisi dan stok di tahap 3 dan 2 untuk skenario 0-1-2-3-4

STOK



Tahap-1



Gambar 9. Trajektori variabel demand – akuisisi dan stok di tahap 1 untuk skenario 0-1-2-3-4

Tabel 7. Tabulasi hasil PMPT untuk rantai pasok gula semut PT BDMI

Tahap-1; Tau = 2 mg												Tahap-2; Tau =2				
t	l0	d1-o	o1	a1	l1	s1 (awal)	s1 (akhir)	kurang / terpenuhi	d2-o	o2	a2	l2	s2 (awal)	s2 (akhir)	kurang / terpenuhi	
20					15	20,00						15,00	20,00			
1	20	16,09	16,09	20,00	16,09	5,00	8,91	0,00	16,09	16,09	15,00	16,09	5,00	3,91	0,00	
2	20	16,09	16,09	20,00	16,09	8,91	12,82	0,00	16,09	16,09	15,00	16,09	3,91	2,82	0,00	
3	20	16,15	16,15	20,00	16,15	12,82	16,68	0,00	16,15	16,15	15,00	16,15	2,82	1,68	0,00	
4	20	16,15	16,15	20,00	16,15	16,68	20,53	0,00	16,15	16,15	16,09	16,15	1,68	1,62	0,00	
5	20	16,21	16,21	20,00	16,21	20,53	24,32	0,00	16,21	16,21	16,09	16,21	1,62	1,50	0,00	
6	20	16,21	16,21	20,00	16,21	24,32	28,12	0,00	16,21	16,21	16,15	16,21	1,50	1,44	0,00	
7	20	16,26	16,26	20,00	16,26	28,12	31,85	0,00	16,26	16,26	16,15	16,26	1,44	1,32	0,00	
8	20	16,26	16,26	20,00	16,26	31,85	35,59	0,00	16,26	16,26	16,21	16,26	1,32	1,27	0,00	
9	20	16,32	16,32	20,00	16,32	35,59	39,27	0,00	16,32	16,32	16,21	16,32	1,27	1,15	0,00	
10	20	16,32	16,32	20,00	16,32	39,27	42,94	0,00	16,32	16,32	16,26	16,32	1,15	1,09	0,00	
11	20	16,32	16,32	20,00	16,32	42,94	46,62	0,00	16,32	16,32	16,26	16,32	1,09	1,03	0,00	
12	20	16,38	16,38	20,00	16,38	46,62	50,24	0,00	16,38	16,38	16,32	16,38	1,03	0,97	0,00	
13	20	16,38	16,38	20,00	16,38	50,24	53,86	0,00	16,38	16,38	16,32	16,38	0,97	0,91	0,00	
5	20	16,44	16,44	20,00	16,44	53,86	57,42	0,00	16,44	16,44	16,32	16,44	0,91	0,80	0,00	
15	20	16,44	16,44	20,00	16,44	57,42	60,98	0,00	16,44	16,44	16,38	16,44	0,80	0,74	0,00	
16	20	16,50	16,50	20,00	16,50	60,98	64,48	0,00	16,50	16,50	16,38	16,50	0,74	0,62	0,00	
17	20	16,50	16,50	20,00	16,50	64,48	67,98	0,00	16,50	16,50	16,44	16,50	0,62	0,56	0,00	
18	20	16,56	16,56	20,00	16,56	67,98	71,43	0,00	16,56	16,56	16,44	16,56	0,56	0,45	0,00	
19	20	16,56	16,56	20,00	16,56	71,43	74,87	0,00	16,56	16,56	16,50	16,56	0,45	0,39	0,00	
20	20	16,62	16,62	20,00	16,62	74,87	78,25	0,00	16,62	16,62	16,50	16,62	0,39	0,27	0,00	
21	20	16,62	16,62	20,00	16,62	78,25	81,64	0,00	16,62	16,62	16,56	16,62	0,27	0,21	0,00	
22	20	16,67	16,67	20,00	16,67	81,64	84,97	0,00	16,67	16,67	16,56	16,67	0,21	0,10	0,00	
23	20	16,67	16,67	20,00	16,67	84,97	88,29	0,00	16,67	16,67	16,62	16,67	0,10	0,04	0,00	
24	20	16,73	16,73	20,00	16,73	88,29	91,56	0,00	16,73	16,73	16,62	16,65	0,04	0,00	-0,08	
25	20	16,73	16,73	20,00	16,73	91,56	94,83	0,00	16,73	16,73	16,67	16,67	0,00	0,00	-0,06	
rata a1												rata a2		Rata s2		0,00548
2,500												2,025,17		248980		

Tabel 7. (lanjutan)

Tahap=3; Tau =2											
t	I0	d3-o	d3-1	d3-2	d3-3	o3	a3 (var kep)	I3 (ingin mengisi memenuhi demand)	s3 (awal)	s3 (akhir)	kurang / terpenuhi
1	20	16,09				16,09	15,00	16,09	30,00	28,91	0,00
2	20	16,09				16,09	15,00	16,09	30,00	27,82	0,00
3	20	16,15				16,15	15,00	16,15	27,82	26,68	0,00
4	20	16,15				16,15	16,09	16,15	26,68	26,62	0,00
5	20	16,21				16,21	16,09	16,21	26,62	26,50	0,00
6	20	16,21				16,21	16,15	16,21	26,50	26,44	0,00
7	20	16,26				16,26	16,15	16,26	26,44	26,32	0,00
8	20	16,26				16,26	16,21	16,26	26,32	26,27	0,00
9	20	16,32				16,32	16,21	16,32	26,27	26,15	0,00
10	20	16,32	21			16,32	16,26	16,32	26,15	26,09	0,00
11	20	16,32	21			16,32	16,26	16,32	26,09	26,03	0,00
12	20	16,38	21			16,38	16,32	16,38	26,03	25,97	0,00
13	20	16,38	21			16,38	16,32	16,38	25,97	25,92	0,00
5	20	16,44	21			16,44	16,32	16,44	25,92	25,80	0,00
15	20	16,44	21	25		16,44	16,38	16,44	25,80	25,74	0,00
16	20	16,50	21	24		16,50	16,38	16,50	25,74	25,62	0,00
17	20	16,50	21	23		16,50	16,44	16,50	25,62	25,56	0,00
18	20	16,56	21	27		16,56	16,44	16,56	25,56	25,45	0,00
19	20	16,56	21	26		16,56	16,50	16,56	25,45	25,39	0,00
20	20	16,62	21	25	25	16,62	16,50	16,62	25,39	25,27	0,00
21	20	16,62	21	30	15	16,62	16,56	16,62	25,27	25,21	0,00
22	20	16,67	21	29	27	16,67	16,56	16,67	25,21	25,10	0,00
23	20	16,67	21	28	12	16,67	16,62	16,67	25,10	25,04	0,00
24	20	16,73	21	34	28	16,73	16,62	16,73	25,04	24,92	0,00
25	20	16,73	21	33	11	16,73	16,67	16,73	24,92	24,86	0,00
rata a3									rata s3	6,496,83	0,00

Tabel 8. Perbandingan hasil 4 skenario

Kondisi	Ukuran kinerja	Skenario			
		0	1	2	3
Tanpa PMPT	Kinerja Pemenuhan (%)	100	80,45	75,32	60,66
	Biaya (x1,000 Rp)		44.083,23	44,083,23	48.082,23
PMPT	Kinerja Pemenuhan (%)	99	92,23	89,34	80,12
	Biaya (x1,000 Rp)		43.009,34	41.013,34	40.432,45

Tabel 9. Perbandingan kinerja

Skenario	Tanpa algoritma Köhler		Menguangkan algoritma Köhler			
	Pemenuhan demand [%]	Biaya [jt Rp]	Pemenuhan demand [%]	Biaya [jtRp]	delta pemenuhan demand	delta biaya
0	100,00%	44,56	100,00%	42,46	0,0%	-2,1
1	89,20%	48,56	99,10%	47,54	9,9%	-1,02
2	82,50%	49,43	97,40%	48,45	14,9%	-0,98
3	60,60%	50,12	75,45%	49,23	14,8%	-0,89
Rata-rata					9,91%	-1,2475

Pembahasan

Detil keseluruhan langkah mengikuti algoritma Köhler dan optimisasi model PMPT ditabulasikan pada Tabel 7 yang menunjukkan evolusi status sistem untuk variabel demand- d_i , stok- s_i dan akuisisi- a_i untuk seluruh tahap. Tabel 7, menunjukkan perjalanan status sistem rantai pasok PT BDML, dimana untuk masing-masing tahap- i terdapat variabel akuisisi- a_i , variabel order- o_i , variabel loss- l_i variabel stok- s_i . Permintaan dari pelanggan terdapat di kolom d pada area pelanggan.

Tingkat inventori/stok di Tahap-1 dan Tahap-2 cenderung konstan karena adanya *safety stock*; sedang pada Tahap-3 stok berfluktuasi mengikuti fluktuasi permintaan. Pada pemodelan PMPT ini, sebagai variabel keputusan adalah variabel akuisisi pada tahap- i , a_i , yang terdiri dari a_1 , a_2 , dan a_3 . Sebagai alternatif variabel keputusan, variabel order, o_i , dapat pula dijadikan variabel keputusan.

Analisis dilakukan pada $t_0=10$, sehingga t dimulai pada $t=9$. Solusi awal dapat dilihat pada Tabel 5, fluktuasi permintaan dimulai pada $t=15$; dimana yang awalnya permintaan diprediksi sebesar 16,38 unit tetapi kemudian melonjak menjadi 20 unit dan diketahui pada saat $t=10$.

Pada Tabel 6 terlihat perubahan pada variabel keputusan variabel akuisisi- a_i , yang merupakan keputusan pada setiap Tahap; sebagai respon setelah diketahuinya prediksi permintaan baru pada saat $t=10$, misal berubah dari 16,50 unit menjadi 20 unit; atau pada $t=15$ dan $t=20$.

Fungsi ongkos meliputi ongkos pengadaan ca_i dalam mengakuisisi- a_i unit dan ongkos inventori cs_i untuk setiap t dan diperoleh bahwa ongkos total adalah Rp 44.083,23,

Terdapat 4 (empat) skenario yang dilakukan untuk memahami karakteristik metoda PMPT, yaitu: (i) Skenario-0 dimana digunakan data awal, tidak ada perubahan permintaan, (ii) Skenario-1 dimana digunakan data awal, kemudian terjadi perubahan permintaan pada $t=10$ dengan tren menaik, (iii) Skenario-2, seperti Skenario-1 dan pada $t=15$ tren menaik dan fluktuatif dan (iv) Skenario-3: dimana seperti skenario-2 dan pada $t=20$ murni fluktuatif permintaan. Pengertian tren menaik adalah nilai prediksi selalu lebih

besar dari nilai sebelum $t=11$; sedangkan tren menaik fluktuatif adalah nilai prediksi dapat menaik dan menurun tetapi tetapi nilainya selalu lebih besar dari nilai sebelum $t=11$; nilai murni fluktuatif adalah nilai prediksi permintaan dapat menaik dan menurun lebih besar atau lebih kecil dari nilai pada $t=11$. Tabel 8 menunjukkan kinerja masing-masing skenario. Tabel 9 menunjukkan bahwa menggunakan metoda Köhler kinerja pemenuhan rata-rata naik 9,91 % sedangkan dari sisi biaya turun sekitar 1,24 %.

Analisis

Pada setiap tahap, terdapat *demand* yang datang pada Tahap-2 yang kemudian Tahap- i akan memesan ke Tahap sebelumnya yaitu o_i dilanjutkan Tahap- i akan menerima produk a_i dan mengirimkan produk sebesar l_i pada Tahap selanjutnya, Gambar 9 menunjukkan perubahan demand, stok dan akuisi di setiap tahap.

Dapat dilihat bahwa metoda PMPT menunjukkan kemampuan mempertahankan ketahanan dan efisiensi walau *demand* berfluktuasi. Metoda Köhler pada dasarnya menggunakan konsep *safety stock*, yaitu dengan adanya variabel s_i^d , yaitu nilai stok yang diinginkan pada setiap tahapan. Jadi berdasarkan rancangan memang *safety stock* berfungsi untuk mengantisipasi jika ada fluktuasi, tetapi dengan adanya metoda memasukkan *demand* prediksi selama N_i mendatang pada setiap tahap, proses memprediksi jadi lebih akurat.

Pada skenario-0, pemenuhan demand mencapai 100% karena memang dari awal telah direncanakan bahwa pengaturan variabel-variabel keputusan untuk memenuhi demand dengan konsekuensi biaya yang didapatkan. Pada skenario-1 dimana permintaan menaik tanpa berfluktuasi, kinerja pemenuhan demand menggunakan algoritma Köhler lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa algoritma Köhler karena memang sudah memprediksi adanya perubahan menggunakan horizon prediksi N_1 N_2 N_3 untuk masing-masing tahapnya. Sedangkan tanpa algoritma Köhler yang pada dasarnya adalah metoda close loop sederhana, sistem hanya menjalankan mekanisme menarik mendorong sesuai dengan permintaan dari pelanggan. Pada skenario-2 dimana memang menaik tapi

ada fluktuasi, kinerja algoritma Köhler menurun sedikit dibanding pada skenario 1. Demikian pula pada skenario-3 karena fluktuasi semakin besar, kinerja pemenuhan demand menurun walau menggunakan algoritma Köhler.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah diterapkan Pengendali Model Prediktif Terdistribusi pada rantai pasok Gula Semut; dimana perencanaan awal menggunakan konsep *Collaborative Planning Forecasting and Replenishment* (CPFR). Hal ini sangat penting karena menjamin ketersediaan pasokan dengan harga yang relatif stabil karena hubungan pemasok dengan PT BDMI dijaga dalam kontrak. Pada perencanaan awal, ditentukan *forecasting* bersama, target produksi dan kebijakan inventori untuk gudang produk jadi (siap jual) yang meliputi titik pemesanan kembali, *safety stock* dan berapa setiap kali pesan. Pada saat sistem berjalan, dinamika sistem rantai pasok, dijaga dengan memprediksi untuk beberapa waktu ke depan dan selalu menyesuaikan rencana produksi saat terjadi perubahan. Hasil menunjukkan bahwa dengan algoritma PMPT, kinerja ketahanan meningkat dengan rata-rata 9,9% sedangkan efisiensi biaya rantai pasok turun sekitar 1,2%. Untuk perubahan permintaan yang fluktuatif yaitu dapat menaik atau menurun, sistem tidak akan mampu mengatasi lonjakan atau turunan untuk fluktuasi yang terlalu besar. Fluktuasi memperlihatkan bahwa CPFR-PMPT dapat menangani fluktuasi *demand* dan menunjukkan bahwa rantai pasok tetap dapat menjalankan fungsinya yaitu memenuhi keinginan pelanggan dengan mempertahankan efisiensi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Arauz, T., Chanfreut, P., Maestre, J. M. (2022). Cyber-security in networked and distributed model predictive control. *Annual Reviews in Control*, 53 (338–355). DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.10.005.
- Adobor, H., McMullen, R. S. (2018). Supply chain resilience: A dynamic and multidimensional approach. *International Journal of Logistics Management*, 29(4), 1451–1471. DOI:10.1108/IJLM-04-2017-0093.
- Barati, S. H. (2025). A system dynamics approach for leveraging blockchain technology to enhance demand forecasting in supply chain management. *Supply Chain Analytics*, 10 (100115). DOI:10.1016/j.sca.2025.100115.
- Bu, Y., Swartz, C. L. E., Wu, C. (2024). A two-level PMP method for the operation of a gas pipeline system under demand variation. *Computers and Chemical Engineering*, 183 (108597). DOI:10.1016/j.coPMPhemeng.2024.108597.
- Cataldo, A. (2017). Model predictive control in manufacturing plants (Tesis T (Ph.D.), Politecnico di Milano).
- Chopra, S., & Meindl, P. (2019). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson Education.
- Dubey, R., Bryde, D. J., Dwivedi, Y. K., Graham, G., Foropon, C., Papadopoulos, T. (2023). Dynamic digital capabilities and supply chain resilience: The role of government effectiveness. *International Journal of Production Economics*, 258, Article 108790. DOI:10.1016/j.ijpe.2023.108790.
- Dering, D., Swartz, C. L. E. (2023). An integrated scheduling and control framework for plants controlled by distributed PMP systems. *IFAC PapersOnLine*, 56(2), 1417–1422. DOI:10.1016/j.ifacol.2023.10.1817.
- Eslami, T., Jungbauer, A. (2024). Control strategy for biopharmaceutical production by model predictive control. *Biotechnology Progress*, 40(2). DOI:10.1002/btpr.3426.
- Gunasekaran, A., Subramanian, N., Rahman, S. (2015). Supply chain resilience: Role of complexities and strategies. *International Journal of Production Research*, 53(22), 6809–6819. DOI:10.1080/00207543.2015.1093667.
- Hill, C. A., Zhang, G. P., & Miller, K. E. (2018). Collaborative planning, forecasting, and replenishment & firm performance: An empirical evaluation. *International Journal of Production Economics*, 196, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.11.012>.
- Hipólito, T., Nabais, J.L., Botto, M.A., Negenborn, R.R. (2020). Effective Continuous-flow Supply Chains using Centralized Model Predictive Control, *IFAC-Papers OnLine*. Vol 53 Issue 2, pp. 10855-10860. DOI:10.1016/j.ifacol.2020.12.2808.
- Hu, Z., Gao, B., Sun, R. (2022). An active primary frequency regulation strategy for grid integrated wind farms based on model predictive control. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32 (100955). DOI:10.1016/j.segan.2022.100955.
- Huang, M., Zheng, Y., Li, S. (2022). Distributed economic model predictive control with pseudo-steady state modifier adaptation for an industrial fluid catalytic cracking unit. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol 180, pp. 379-390. DOI:10.1016/j.cherd.2022.02.034.
- Ivanov, D., Sethi, S., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2018). A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and Industry 4.0. *Annual Reviews in Control*, 46, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.014>
- Jain, V., Kumar, S., Soni, U., Chandra, C. (2017). Supply chain resilience: Model development and empirical analysis. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6779–6800. DOI:10.1080/00207543.2017.1349947.
- Köhler, P., Müller, M., Pannek, J., & Allgöwer, F. (2020). Distributed economic model predictive control for cooperative supply chain management using customer forecast information. *IFAC Journal of Systems and Control*, 15, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2020.100125>
- Kumar, R., Wenzel, M. J., ElBsat, M. N., Risbeck, M. J., Drees, K. H., & Zavala, V. M. (2021). Dual dynamic programming for multi-scale mixed-integer PMP. *Computers and Chemical Engineering*, 148 (107265). DOI:10.1016/j.coPMPhemeng.2021.107265.
- Marty, J., Ruel, S. (2024). Why is “supply chain collaboration” still a hot topic? A review of decades of research and a comprehensive framework proposal. *International Journal of Production Economics*. Vol 273, 109259. DOI:10.1016/j.ijpe.2024.109259
- Mrugalska, B., Stetter, R. (2019). Health-aware model-predictive control of a cooperative AGV-based production system. *Sensors*, 19(3), 532. DOI:10.3390/s19030532.

- Müller, M. A., Allgöwer, F. (2017). Economic and distributed model predictive control: Recent developments in optimization-based control. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 10(2), 39–52.
- Muller, M. A., Allgwer, F. (2021). Economic and distributed model predictive control: Recent developments in optimization-based control. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 10:2, 39-52. DOI: 10.9746/jcmsi.10.39.
- Mandal, S., Sarathy, R., Korasiga, V. R., Bhattacharya, S., Dastidar, S. G. (2016). Achieving supply chain resilience: The contribution of logistics and supply chain capabilities. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 7(5), 544–562. DOI:10.1108/IJDRBE-04-2016-0010.
- Muñoz, A., Dunbar, M. (2015). On the quantification of operational supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 53(22), 6736–6751. DOI:10.1080/00207543.2015.1057296.
- Scholten, K., Schilder, S. (2015). The role of collaboration in supply chain resilience. *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(4), 471–484. DOI:10.1108/SCM-11-2014-0386.
- Scholten, K., Stevenson, M., van Donk, D. P. (2019). Dealing with the unpredictable: Supply chain resilience. *International Journal of Operations & Production Management*, 40(1), 1–10. DOI:10.1108/IJOPM-01-2020-789.
- Shishodia, A., Sharma, R., Rajesh, R., Munim, Z. H. (2023). Supply chain resilience: A review, conceptual framework and future research. *The International Journal of Logistics Management*, 34(4), 879–908. DOI:10.1108/IJLM-03-2021-0169.
- Singh, C. S., Soni, G., Badhotiya, G. K. (2019). Performance indicators for supply chain resilience: Review and conceptual framework. *Journal of Industrial Engineering International*, 15(Suppl 1), 105–117. DOI:10.1007/s40092-019-00322-2.
- Nabayiga, H., van Der Meer, R., Ali Agha, M. S. (2025). A systematic review of simulation models in medicine supply chain management: Current state and emerging trends. *Decision Analytics Journal*, 14 (100555), DOI: 10.1016/j.dajour.2025.100555.
- Pangestuti, M. W., Wangsaputra, R., & Adriant, I. (2020). *Perancangan Collaborative Planning Forecasting Replenishment Gula Semut pada PT Binar Dini Mandiri Indonesia (TA 16.16.20.49)*. Final Research, STIMLOG Indonesia.
- Pinho, T. M., Moreira, A. P., Veiga, G., Boaventura-Cunha, J. (2015). Overview of MPC applications in supply chains: Potential use and benefits in the management of forest-based supply chains. *Forest Systems*, 24(3), Article e039, 15 pages. DOI:10.5424/fs/2015243-08148.
- Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., & Diehl, M. M. (2024). *Model predictive control: Theory, computation, and design* (2nd ed.). Nob Hill Publishing, LLC.
- Ribeiro, C. H. P., Miyoshi, S. C., Secchi, A. R., Bhaya, A. (2016). Model predictive control with quality requirements on petroleum production platforms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 137, 10–21. DOI:10.1016/j.petrol.2015.11.004.
- Schildbach, G., Morari, M. (2016). Scenario-based model predictive control for multi-echelon supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 252(2), 540–549. DOI:10.1016/j.ejor.2016.01.051.
- Swief, A., El Zawawi, A., El Habrouk, M. (2019). The Development of Model Predictive Control in automotive industry: A survey. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics* (pp. 295–302). IEEE. DOI:10.1109/ICAID.2019.8934974.
- Tukamuhabwa, B. R., Stevenson, M., Busby, J., Zorzini, M. (2015). Supply chain resilience: Definition, review and theoretical foundations for further study. *International Journal of Production Research*, 53(18), 5592–5623. DOI:10.1080/00207543.2015.1037934.
- Turan, E. M., Skogestad, S., Jäschke, J. (2024). Model predictive control for bottleneck isolation with unmeasured faults. *IFAC PapersOnLine* 58-14, pp 767–774. DOI:10.1016/j.ifacol.2024.08.430.
- van der Kruk, R., van de Molengraft, R., Bruyninckx, H., van Henten, E.J. (2024). Control of Production-Inventory systems of perennial crop seeds. *Journal of Process Control*. Vol. 144, 103330. DOI:10.1016/j.jprocont.2024.103330.
- Wang, Z., Wang, S. (2022). Real-time dynamic route optimization based on predictive control principle. *IEEE Access*. Vol. 10, 55062. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3176950.
- Wieland, A., Durach, C. F. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. *Journal of Business Logistics*, 42(3), 315–322. DOI:10.1111/jbl.12271.
- Zhang, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Wu, C., Wang, D. (2024). Advanced model predictive control strategies for nondestructive monitoring quality of fruit and vegetables during supply chain processes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225 (109262). DOI:10.1016/j.compag.2024.109262.
- Zhao, N., Hong, J., Lau, K. H. (2023). Impact of supply chain digitalization on supply chain resilience and performance: A multi-mediation model. *International Journal of Production Economics*, 259, Article 108817. DOI:10.1016/j.ijpe.2023.108817.

Halaman ini sengaja dikosongkan