LAPORAN PENELITIAN

Pengembangan Metode Optimasi Tangguh untuk Rantai Pasok yang Berbentuk Umum

oleh
Carles Sitompul
Johanna Hariandja

Jurusan Teknik Industri
Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung 40141 Indonesia

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Katolik Parahyangan
Februari 2012

Rangkuman

Permasalahan yang dialami sebuah rantai pasok semakin kompleks karena meningkatnya persaingan antar perusahaan. Lingkungan bisnis menjadi lebih kompetitif terutama dengan munculnya berbagai ketidakpastian dalam berbagai hal. Konsumen yang memiliki daya tawar yang semakin tinggi menyebabkan perubahan-perubahan permintaan konsumen perlu ditanggapi dengan baik agar perusahaan tetap dapat memenuhi permintaan tersebut. Waktu produksi dan waktu transportasi atau lead time pemenuhan permintaan juga dapat berubah-ubah karena berbagai hal mulai dari rusaknya mesin, rusaknya kendaraan transportasi hingga terjadinya bencana alam. Metode optimasi tangguh berusaha untuk menanggapi perubahan-perubahan tersebut dalam perencanaannya sehingga rencana yang dihasilkan tetap stabil terhadap berbagai perubahan atau gangguan.

Keputusan strategis yang berimplikasi besar dalam perencanaan rantai pasok di antaranya adalah menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman. Penelitian terdahulu telah mengevaluasi penggunaan metode optimasi tangguh (Sitompul dan Hariandja, 2011) dan algoritma jalur terpendek (Sitompul dan Suryadi, 2011) untuk menyelesaikan masalah rantai pasok yang berbentuk linear atau serial. Penelitian ini akan mengembangkan metode optimasi tangguh untuk rantai pasok yang berbentuk umum dalam menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman dengan memperhatikan perubahan-perubahan pada besar permintaan dan lead time.

Model yang dikembangkan untuk rantai pasok berbentuk linear ternyata merupakan masalah atau program non linear yang tidak dapat diselesaikan dengan algoritma jalur terpendek. Oleh karena itu, masalah ini diselesaikan dengan menggunakan metode optimasi tangguh yang diusulkan oleh Mulvey et al. (1995).

Daftar Isi

Bab 1

Pendahuluan

Bagian pendahuluan ini memuat latar belakang penelitian, tujuan khusus penelitian serta keutamaan penelitian.

1.1 Latar belakang

Lingkungan bisnis menjadi semakin kompetitif karena diliputi berbagai perubahan-perubahan. Perubahan-perubahan dalam lingkungan bisnis sebagian besar disebabkan oleh meningkatnya daya tawar konsumen dalam praktik bisnis di Indonesia. Konsumen memiliki kebebasan yang lebih besar dalam menentukan permintaannya, baik dari segi jumlah, jenis ataupun waktu pemenuhannya.

Perubahan-perubahan tersebut perlu ditanggapi dengan seksama agar perusahaan tetap dapat memenuhi permintaan konsumen. Dengan demikian, perusahaan dapat mempertahankan tingkat pelayanan terhadap konsumennya. Selain ongkos, ukuran performansi sebuah perusahaan seringkala dinyatakan dalam bentuk tingkat pelayanan. Metode optimasi tangguh berupaya untuk menanggapi berbagai perubahan yang mungkin terjadi sehingga rencana yang dihasilkan tetap tangguh, yaitu stabil dari segi ongkos dan tingkat pelayanan meskipun terjadi perubahan-perubahan. Dengan kata lain, metode optimasi tangguh meminimasi pengaruh perubahan terhadap performansi rencana yang dihasilkannya.

Graves and Willems (2000), Lesnaia et al. (2004), Sitompul, et al. (2008), Sitompul dan Suryadi (2011), serta Sitompul dan Hariandja (2011) menunjukkan pentingnya penentuan lokasi dan jumlah persediaan pengaman di level strategis. Masalah penentuan lokasi dan jumlah persediaan pengaman biasa juga disebut sebagai masalah penempatan persediaan pengaman. Graves and Willems (2000) dan Lesnaia et al. (2004) mengembangkan model optimasi non linear untuk menyelesaikan masalah penempatan persediaan pengaman di sebuah rantai pasok yang berbentuk umum dengan kapasitas tidak terbatas. Model yang dikembangkan berusaha untuk menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman dengan memperhatikan jumlah permintaan konsumen yang berubah-ubah (*stochastic demand*). Model tersebut kemudian dikembangkan oleh Sitompul, et al. (2008) dimana kapasitas yang dimiliki oleh rantai pasok terbatas. Sitompul dan Suryadi (2011) serta Sitompul dan Hariandja (2011) mengembangkan model yang sudah ada dengan mempertimbangkan lead time yang juga berubah-ubah karena adanya ketidakpastiaan pada waktu produksi (*stochastic lead time*).

Penelitian ini akan mengembangkan model optimasi tangguh dalam menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman di sebuah rantai pasok yang berbentuk umum dengan mempertimbangkan perubahan yang berasal dari permintaan konsumen ataupun yang berasal dari waktu produksi.

1.2 Tujuan khusus

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model optimasi tangguh seperti yang diusulkan oleh Mulvey et al. (1995) untuk sebuah rantai pasok dengan memperhatikan ketidakpastian yang berasal dari konsumen dan yang berasal dari produksi internal. Penelitian terdahulu (Sitompul dan Suryadi, 2011; Sitompul dan Hariandja, 2011) telah mengevaluasi masalah penempatan persediaan pengaman untuk rantai pasok yang berbentuk linear atau serial. Penelitian ini akan mengembangkan metode optimasi tangguh untuk rantai pasok yang bentuknya bersifat lebih umum lagi, yaitu: sebuah perusahaan dapat memenuhi beberapa konsumen, atau sebuah perusahaan dapat memilki beberapa pemasok.

1.3 Keutamaan penelitian

Secara garis besar, urgensi atau keutamaan penelitian ini terletak pada dua nilai mendasar, yaitu: (1) pengembangan keilmuan (*scientific value*) dan (2) penyelesaian masalah praktis (*practicality value*). Permasalahan-permasalahan yang diwarnai ketidakpastian atau disebut dengan *stochastic problems* telah menjadi obyek penelitian yang banyak ditelaah oleh berbagai peneliti selama satu dekade terakhir ini.

Permasalahan yang ditangani pada penelitian ini juga memiliki nilai relevansi yang tinggi untuk kondisi rantai pasok di Indonesia. Selain permintaan yang berubah-ubah, kondisi jaringan transportasi di Indonesia seringkali terhambat karena faktor-faktor penuh ketidakpastian, seperti jalan rusak akibat bencana, yang pada akhirnya membuat lead time berubah-ubah pula.

1.4 Sistematika penulisan

Bab 1 membahas latar belakang, tujuan dan keutamaan penelitian. Bab 2 memuat studi pustaka, termasuk didalamnya: definisi rantai pasok, permasalahan strategis pada rantai pasok, ketidakpastian dan optimasi handal. Bab 3 membahas deskripsi masalah, serta formulasi model matematis deterministik dan stokastik. Bab 4 memuat metode penyelesaian masalah dengan menggunakan metode optimasi tangguh. Bab 5 berisi kesimpulan serta saran untuk penelitian lebih lanjut.

Bab 2

Studi Pustaka

Bagian ini membahas studi pustaka meliputi definisi rantai pasok, ketidakpastian dan ketangguhan, serta metode optimasi tangguh.

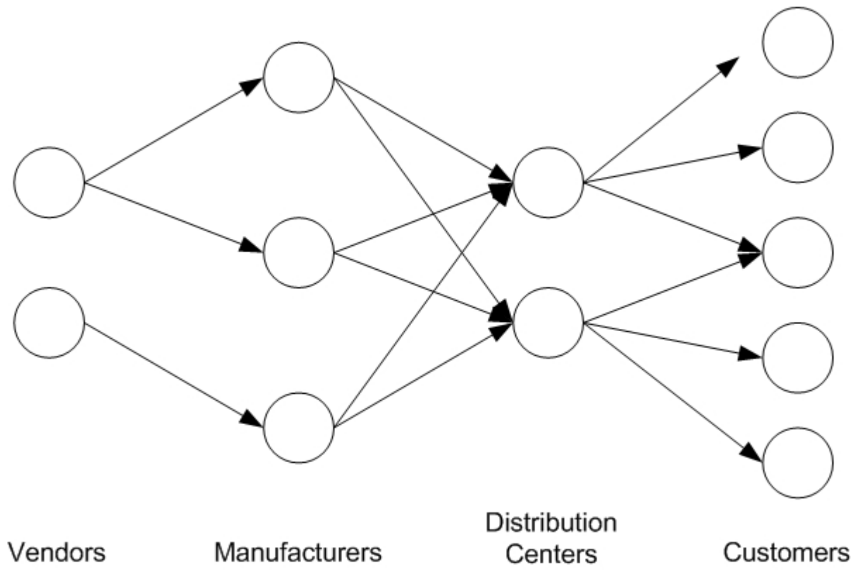
2.0.1 Definisi rantai pasok

Secara umum, sebuah rantai pasok terdiri dari berbagai fasilitas dimana bahan mentah diambil dan diubah menjadi bahan setengah jadi, dan bahan setengah jadi diambil dan diubah menjadi produk akhir. Proses transformasi ini juga seringkali disertai dengan proses penyimpanan dalam bentuk persediaan serta proses transportasi dari satu fasilitas ke fasilitas yang lain.

Sebuah rantai pasok dapat digambarkan dalam bentuk jaringan yang terdiri dari titik-titik atau (*nodes*) yang dihubungkan dengan jalur-jalur transportasi (*arcs*). Gambar 1 menunjukkan satu rantai pasok yang terdiri dari pemasok (*vendors*), pabrik (*manufacturers*), pusat distribusi (*distribution centers*) serta pelanggan (*customers*). Saat ini ada banyak buku yang secara khusus membahas rantai pasok serta permasalahannya. Pembaca dirujuk untuk membaca buku yang dikarang oleh Shapiro, 2001(*Modeling the supply chain*) agar memperoleh gambaran yang lebih mendalam lagi.

2.0.2 Ketidakpastian dan Ketangggguhan

Ketidakpastian pada satu rantai pasok dapat bersumber pada permintaan konsumen, pemasok, proses dan kontrol (Geary et al., 2002). Ketidakpastian permintaan adalah perbedaan informasi antara permintaan yang diantisipasi dan yang benar-benar diminta oleh pelanggan (permintaan aktual). Ketidakpastian pemasok berasal dari ketidakmampuan pemasok memenuhi spesifikasi permintaan baik dari sisi waktu maupun kualitas. Ketidakpastian proses bersumber dari sumber daya internal yang meliputi fasilitas atau mesin. Kerusakan mesin adalah salah satu contoh yang menyebabkan ketidakpastian proses ini. Ketidakpastian kontrol terjadi karena adanya aliran informasi serta transformasi informasi permintaan konsumen menjadi target produksi. Berdasarkan studi pustaka, ketidakpastian yang bersumber pada permintaan konsumen dan yang berkaitan dengan lead time, baik



Gambar 2.1: Jaringan Rantai Pasok (sumber: Sitompul, 2010)

dari pemasok maupun ke pelanggan adalah sumber-sumber ketidakpuasan hubungan antar elemen dalam rantai pasok. Oleh karena itu, dua sumber ketidakpastian tersebut perlu dikelola dengan baik agar hubungan elemen dalam rantai pasok tetap stabil dalam rangka menaikkan atau mempertahankan tingkat pelayanan kepada konsumen.

Ketangguhan didefinisikan sebagai kemampuan sebuah sistem untuk melindungi dirinya sendiri dari berbagai perubahan atau ketidakpastian. Sebuah konsep ketangguhan mempengaruhi bagaimana seseorang mengukurnya, seperti:

- Persentase jumlah dimana solusinya terletak pada satu interval solusi optimal yang ditentukan untuk semua kemungkinan/skenario (Rosenblatt dan Lee, 1987).
- Variabilitas dari ukuran performansi (Mulvey, et al., 1995; Van Landeghem dan Vanmaele, 2002).
- Eksistensi solusi layak untuk masalah yang berada pada level lebih detail (Lasserre dan Merce, 1990; Gfrerer dan Zapfel, 1995).

Pada penelitian ini, konsep ketangguhan yang dipakai adalah konsep yang diajukan oleh Mulvey, et al. (1995).

2.0.3 Optimasi tangguh

Istilah optimasi tangguh pertama kali digunakan oleh Mulvey, et al. (1995) untuk merujuk suatu metode optimasi pada permasalahan-permasalahan yang diliputi ketidakpastian. Suatu rencana disebut tangguh apabila rencana tersebut mampu mengantisipasi perubahan-perubahan pada parameter permasalahan. Suatu solusi pada model optimasi disebut 'solusi tangguh' apabila solusi tersebut tetap 'dekat' dengan solusi optimal untuk semua skenario yang mungkin terjadi. Suatu model disebut 'model tangguh' apabila model tersebut tetap 'layak' untuk semua skenario yang mungkin terjadi.

Misalkan $x \in R$ menujuk pada vektor variabel keputusan (variabel desain) yang tidak tergantung pada perubahan parameter dan $y \in R$ menunjuk pada variabel kontrol yang tergantung pada perubahan parameter. Nilai optimal variabel kontrol ini tergantung pada parameter yang berubah-ubah serta tergantung pada nilai optimal dari variabel desain. Permasalahan linear dapat diformulasikan sebagai berikut:

Minimasi

$$c^T x + d^T y,$$

dibatasi oleh

$$Ax = b,$$

$$Bx + Cy = e,$$

$$x, y \geq 0,$$

dimana c, d adalah parameter-parameter dalam fungsi tujuan, A, B, C, b, dan e adalah parameter-parameter dalam fungsi kendala. Misalkan $\Omega = 1, 2, .., S$ adalah himpunan semua skenario yang mungkin terjadi dan untuk setiap skenario $s \in \Omega$ ada realisasi koefisien pada pembatas kontrol, yaitu: d_s, B_s, C_s, dan e_s dengan probabilitas munculnya skenario s adalah p_s. Jika himpunan $y_1, y_2, ..., y_s$ untuk variabel kontrol untuk skenario s dimunculkan maka diperlukan juga himpunan variabel $z_1, z_2, ..., z_s$ sebagai variabel 'error'. Variabel ini digunakan untuk mengukur ketidaklayakan di pembatas kontrol menurut skenario s. Dengan demikian, model optimasi tangguh menurut Mulvey, et al. (1995) dapat diformulasikan sebagai berikut:

Minimasi

$$\sigma\left(x, y_1, ..., y_s\right) + \omega\rho\left(z_1, z_2, ..., z_s\right),$$

dibatasi oleh

$$Ax = b,$$

$$B_s x + C_s y_s + z_s = e_s, \forall s \in \Omega,$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0, \forall s \in \Omega.$$

Dengan banyaknya skenario, fungsi tujuan $\xi = c^T x + d^T y$ berubah menjadi variabel acak dengan nilai $\xi_s = c^T x + d_s^T y_s$ dengan probabilitas sebesar p_s. Menurut program linear stokastik, fungsi tujuan yang dipakai adalah nilai rata-rata $\sigma(.) = \sum_{s\in\Omega} p_s \xi_s$. Menurut analisis kejadian terburuk, suatu model harus meminimasi nilai maksimum yang didefinisikan sebagai berikut: $\sigma(.) = max_{s\in\Omega} p_s \xi_s$. Perencanaan yang tangguh harus juga mengendalikan resiko yang diukur oleh variansi dari fungsi tujuan. Dengan demikian, fungsi tujuannya berubah menjadi $\sigma(.) = \sum_{s\in\Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s\in\Omega} p_s \left(\xi_s - \sum_{s'\in\Omega} p_{s'} \xi_{s'}\right)^2$, yang berarti nilai rata-rata ditambah sebuah konstanta dikalikan dengan variansi. Bagian kedua pada fungsi tujuan diatas adalah fungsi penalti untuk pelanggaran beberapa kendala kontrol karena munculnya skenario s. Ada dua alternatif yang digunakan untuk fungsi penalti, yaitu:

1. $\rho(z_1, z_2, ..., zs) = \sum_{s\in\Omega} p_s z_s^T z_s$ yang mengukur baik nilai positif atau nilai negatif dari pelanggaran kendala kontrol dan

2. $\rho(z_1, z_2, ..., zs) = \sum_{s\in\Omega} max\,\{0, z_s\}$ yang hanya mengukur nilai positif dari pelanggaran kendala kontrol.

Dapat disimpulkan bahwa kerangka Mulvey menggunakan fungsi tujuan ba- nyak, yaitu: (1) nilai rata-rata, (2) variasi dari fungsi tujuan dan (3) penalti karena pelanggaran kendala kontrol.

Bab 3

Metode Penelitian

Bab 3 akan membahas metode penelitian yang meliputi langkah-langkah penelitian dan model-model matematis yang dihasilkan. Langkah-langkah penelitian meliputi identifikasi masalah dan tujuan serta penentuan variabel-variabel keputusan. Setelah pendeskripsian permasalahan, formulasi matematis dibuat untuk kemudian diselesaikan secara analitik.

3.1 Langkah-langkah penelitian

Metode penelitian yang diusulkan untuk menangani permasalahan perencanaan rantai pasok, terutama yang berkaitan dengan penempatan persediaan pengaman, adalah metode penelitian operasional. Metode penelitian operasional adalah sebuah metode penelitian yang menggunakan alat bantu analitik (biasanya ilmu matematika) untuk membantu proses pengambilan keputusan agar keputusan-keputusan yang diambil menjadi lebih baik dan optimal. Metode penelitian operasional ini dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu:

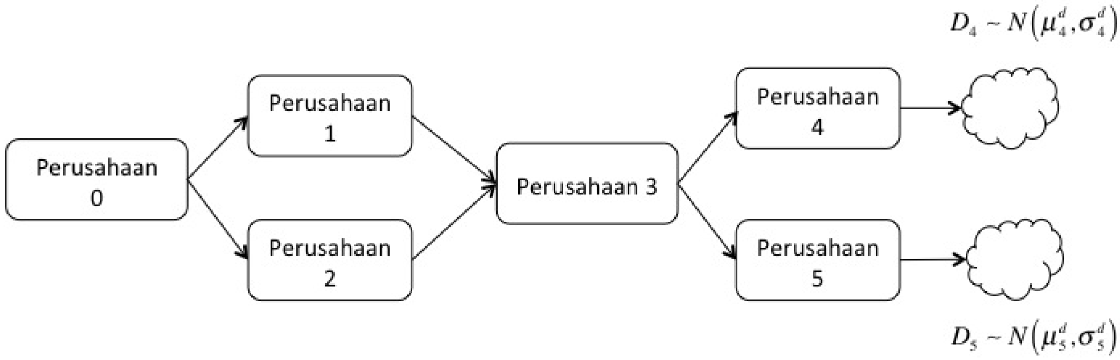
1. **Identifikasi masalah**. Permasalahan di dalam sebuah rantai pasok diidentifikasi dan didefinisikan dengan jelas pada tahap awal metode penelitian ini. Berdasarkan studi literatur, ketidakpastian yang bersumber dari permintaan dan dari lead time yang dipengaruhi oleh waktu produksi seringkali menjadi sumber masalah antar elemen di dalam sebuah rantai pasok. Oleh karena itu perlu dirumuskan suatu pemecahan masalah yang efektif dan efisien untuk menangani kedua jenis ketidakpastian ini. Metode optimasi tangguh diharapkan dapat memberi solusi yang tepat untuk mengembangkan sebuah rencana rantai pasok yang tangguh pula, yaitu tetap stabil meskipun muncul beberapa skenario yang berbeda atau bahkan jika terjadi gangguan-gangguan. Kestabilan sebuah rencana diukur dari variabilitas ukuran performansi (ongkos atau tingkat pelayanan) sebuah rantai pasok terhadap berbagai skenario yang mungkin terjadi. Dengan demikian akan diperoleh suatu formulasi masalah yang memiliki tingkat obyektifitas dan ketangguhan yang memadai untuk membantu perusahaan menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman yang tepat dan efisien.

2. **Penentuan variabel keputusan**. Tahap berikutnya dalam proses penelitian operasional adalah menentukan variabel-variabel keputusan, yaitu variabel desain yang akan tingkat performansi rantai pasok. Secara eksplisit, masalah penempatan persediaan pengaman berkaitan dengan dua hal, yaitu menentukan lokasi dan jumlah persediaan pengaman. Jadi pada penelitian ini, variabel-variabel keputusannya menjawab dua pertanyaan berikut:
   - Dimana persediaan pengaman perlu disimpan?
   - Berapa jumlah persediaan pengaman yang perlu disimpan?
3. **Formulasi masalah**. Dalam formulasi masalah perlu diteliti keterkait- an antar variabel dan parameter dan bagaimana hubungan antar variabel tersebuh dapat membangun suatu fungsi tujuan yang bisa dicari solusi optimalnya. Selain itu, hubungan antar variabel juga menentukan fungsi kendala yang membatasi proses pencarian solusi optimal. Formulasi masalah yang dihasilkan dapat berbentuk linear atau non linear.
4. **Metode penyelesaian analitik**. Untuk setiap bentuk formulasi terdapat satu metode yang cocok. Formulasi linear dapat diselesaikan dengan menggunakan metode simpleks yang dikembangkan oleh George B. Dantzig (1914-2005). Sementara itu, metode gradien, program kuadrat dan relaksasi Lagrangian banyak dipakai untuk menyelesaikan formulasi non linear.
5. **Tahap implementasi dan timbal-balik**. Dalam tahap implementasi, solusi dari metode analitik digunakan untuk membantu pengambil keputusan dalam memutuskan suatu permasalahan. Hasil implementasi dapat digunakan untuk informasi timbal balik yang kemudian digunakan kembali sebagai input pada siklus pengambilan keputusan berikutnya.

3.2 Deskripsi masalah

Deskripsi masalah rantai pasok dimulai pada permasalahan yang berbentuk umum. Masalah yang berbentuk umum ini banyak ditemui di berbagai rantai pasok, termasuk rantai pasok PT. X di Jawa Barat. Rantai pasok yang berbentuk umum terjadi karena pihak produsen (*manufacturer*) memiliki beberapa perusahaan pemasok dan banyak konsumen, seperti yang terlihat pada Gambar 3.1. Misalkan perusahaan 1 dan perusahaan 2 memasok material untuk perusahaan 3 (*manufacturer*). Perusahaan 3 memasok atau memenuhi permintaan yang berasal dari perusahaan 4 dan perusahaan 5. Permasalahan tersebut dapat digambarkan sebagai sebuah jaringan $G(N, A)$, dimana G menunjukkan sistem jaringan yang terdiri dari nodes 1,2,3,4,5, dan *arcs* (busur) yang menghubungkan (1,3), (2,3), (3,4) dan (3,5).

Perusahaan j memasok material atau barang pada perusahaan sesudahnya dengan lead time sebesar L_j. perusahaan j menyimpan produk/hasil prosesnya dalam bentuk persediaan sebesar I_j. Permintaan pelanggan terjadi di nodes j yang berada di akhir rantai pasok dan bersifat stokastik yang berdistribusi normal dengan rata-rata μ_j^d dan standar deviasi sebesar σ_j^d. Diasumsikan juga bahwa perusahaan yang berada di awal rantai pasok memiliki pasokan material yang tidak terbatas dari perusahaan 0, dengan demikian $L_0 = 0$. Jika rantai pasok ingin memasok kebutuhan konsumen secepat mungkin maka lead time dari perusahaan j, L_j=0, untuk j yang berada di akhir rantai pasok.



Gambar 3.1: Deskripsi masalah rantai pasok berbentuk umum

Untuk dapat memenuhi kebutuhan konsumen, maka perlu diketahui berapa besar stok pengaman di setiap perusahaan, yaitu SS_j yang pada akhirnya akan berpengaruh pada ongkos persediaan secara keseluruhan rantai pasok.

3.3 Model matematis

Menurut Graves dan Willems (2000), jaminan waktu pelayanan (*guaranteed service time*) oleh perusahaan j (ditulis L_j) didefinisikan sebagai waktu pelayanan yang dijamin 100% oleh perusahaan j kepada perusahaan sesudahnya di dalam rantai pasok. Salah satu asumsi yang penting menurut Graves dan Willems (2000) adalah adanya maksimum permintaan yang dapat dipeuhi. Jika permintaaan suatu produk bersifat independen dan berdistribusi normal untuk setiap periode dengan rata-rata μ dan deviasi standar σ maka manajer harus memenuhi batas maksimum permintaan sebesar:

$$D(\tau) = \tau\mu + z_\alpha \sigma \sqrt{\tau}, \tag{3.1}$$

dimana τ adalah waktu penggantian stok (*net replenishment time*) dan z_α ditentukan sehingga stok pengaman mampu menutupi variasi permintaan berdasarkan ukuran yang telah ditentukan.

Pada setiap perusahaan j diasosiasikan hal-hal berikut, yaitu LI_j yaitu lead time yang diperlukan untuk mendapatkan material dari pemasok langsungnya (*inbound lead time*). Pada periode t, perusahaan j mendapatkan permintaan $d_j(t)$ dan menempatkan order pada perusahaan sebelumnya (pemasoknya). Lead time perusahan j, yaitu L_j adalah lead time untuk memenuhi permintaan demand perusahaan sesudahnya. Dengan demikian permintaan pada periode t akan dipenuhi pada period $t + L_j$. Jika $I_j(t)$ adalah stok pada perusahaan j di akhir periode

t, maka menurut kebijakan stok dasar (*base stock*), level stok dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$I_j(t) = B_j - d_j(t - LI_j - T_j, t - L_j), \tag{3.2}$$

dimana B_j adalah stok dasar, $d_j(t-LI_j-T_j, t-L_j)$ adalah permintaan sepanjang periode $(t-LI_j-T_j, t-L_j]$ yang merupakan waktu penggantian stok dan T_j adalah lead time produksi perusahaan j.

Oleh karena $I_j \geq 0$ diharuskan setiap waktu untuk mendapatkan 100% jaminan pelayanan, maka stok dasar harus lebih besar dari permintaan sepanjang periode $(t-LI_j-T_j, t-L_j]$. Dengan demikian, stok dasar dapat ditetapkan sebagai berikut:

$$B_j = D_j(\tau), \tag{3.3}$$

dimana $\tau = \mathtt{max}[0, LI_j + T_j - L_j]$. Ini berarti stok dasar ditentukan sebagai maksimum permintaan sepanjang waktu penggantian stok. Jika $LI_j + T_j - L_j < 0$ maka stok dasar ditentukan sebesar nol dan tetap memenuhi permintaan.

Model stok pengaman dapat ditentukan dengan mencari rata-rata stok, $E[I_j]$, yaitu:

$$E[I_j] = B_j - E[d_j(t - LI_j - T_j, t - L_j)],$$

atau

$$E[I_j] = D_j(LI_j + T_j - L_j) - (LI_j + T_j - L_j)\mu, \tag{3.4}$$

untuk $LI_j + T_j - S_j \geq 0$. Dengan demikian, stok pengaman di perusahaan j tergantung pada waktu penggantian stok dan dibatasi oleh permintaan. Misalkan, jika permintaan dibatasi seperti pada Rumus 3.1 maka stok pengaman dirumuskan sebagai berikut:

$$E[I_j] = z_\alpha \sigma \sqrt{LI_j + T_j - L_j}. \tag{3.5}$$

3.3.1 Model matematis: masalah lead time deterministik

Perumusan untuk satu perusahaan diatas tentunya dapat digeneralisasi untuk rantai pasok yang terdiri dari banyak perusahaan. Perlu diketahui, pada tahapan ini, lead time produksi T_j masih bersifat deterministik. Misalkan ongkos simpan di perusahaan j sebesar h_j per periode per unit, maka permasalahan stok pengaman untuk rantai pasok yang berbentuk umum dapat ditulis sebagai berikut:

Minimasi

$$\sum_{j=1}^{n}(h_j SS_j), \tag{3.6}$$

dibatasi oleh

$$SS_j = z_\alpha \sigma_j^D \sqrt{LI_j + T_j - L_j} \tag{3.7}$$

$$LI_j + T_j - L_j \geq 0, \tag{3.8}$$

$$LI_j - L_i \geq 0, \forall (i,j) \in A \tag{3.9}$$

$$L_j = 0, \forall j \texttt{ di akhir rantai pasok} \tag{3.10}$$

$$L_0 = 0, \tag{3.11}$$

$$L_j \leq M, \forall j \tag{3.12}$$

dimana
h_j adalah ongkos simpan per unit stok di perusahaan j,
SS_j adalah jumlah stok pengaman di perusahaan j,
z_α adalah ukuran standar untuk distribusi normal (misalkan, $z_\alpha = 2,33$ untuk 99% tingkat pelayanan)
σ_j^d adalah deviasi standar permintaan perusahaan j
L_j adalah lead time yang dijamin oleh perusahaan j
LI_j adalah lead time untuk mendapat material bagi perusahaan j
M adalah maksimum lead time yang diperbolehkan.

Rumus 3.6 menunjukkan ongkos total persediaan stok pengaman di seluruh rantai pasok. Besarnya stok pengaman ditentukan dengan menggunakan Rumus 3.7 yang berusaha untuk mengatasi variasi permintaan selama waktu penggantian stok (*net replenishment time*). Rumus 3.8 menghitung waktu penggantian stok untuk perusahaan j. Rumus 3.9 memastikan bahwa lead time untuk mendapatkan material oleh perusahan j ditentukan oleh lead time terbesar yang dijamin perusahaan sebelumnya (pemasoknya). Rumus 3.10 menunjukkan bahwa perusahaan yang berada di akhir rantai pasok harus memenuhi permintaan konsumen akhir seketika (lead time sama dengan nol). Rumus 3.11 menunjukkan bahwa perusahaan yang berada di awal rantai pasok mendapatkan materialnya dengan lead time nol. Lead time setiap perusahaan di rantai pasok dibatasi oleh Rumus 3.12.

Berbeda dengan rantai pasok yang berbentuk linear, rantai pasok yang berbentuk umum tidak dapat meneruskan permintaan konsumen akhir ke seluruh perusahaan yang ada dalam rantai pasok. Oleh karena itu, setiap perusahaan akan mengalami demand yang berbeda-beda dengan rata-rata μ_j^d dan standar deviasi σ_j^d.

3.3.2 Model matematis: masalah lead time stokastik

Untuk rantai pasok yang berbentuk linear, model penelitian dengan lead time yang stokastik telah dikembangkan sebelumnya oleh Sitompul dan Hariandja (2011). Waktu produksi T_j bisa bersifat stokastik yang berimplikasi langsung pada tingkat pemenuhan permintaan. Misalkan, T_j berdistribusi normal dengan rata-rata μ_j^T dan standar deviasi σ_j^T maka rata-rata waktu penggantian stok menjadi:

$$\mu_j^\tau = LI_j + \mu_j^T - L_j, \tag{3.13}$$

dan standar deviasi waktu penggantian stok adalah:

$$\sigma_j^\tau = \sqrt{0 + (\sigma_j^T)^2 + 0} = \sigma_j^T. \tag{3.14}$$

Menurut Silver dan Peterson (1985), permintaan selama waktu penggantian stok didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_j^{D\tau} = \mu_j^d \mu_j^\tau, \tag{3.15}$$

dengan standar deviasi permintaan selama waktu penggantian stok sebesar:

$$\sigma_j^{D\tau} = \sqrt{\mu_j^\tau (\sigma_j^d)^2 + (\mu_j^d)^2 \sigma_j^{\tau 2}}. \tag{3.16}$$

Dengan demikian, stok pengaman yang diperlukan selama waktu penggantian stok di perusahaan j digunakan untuk mengatasi variasi permintaan selama waktu penggantian stok. Jadi, stok pengaman dapat ditulis sebagai berikut:

$$SS_j = z_\alpha \sqrt{\mu_j^\tau (\sigma_j^d)^2 + (\mu_j^d)^2 \sigma_j^{\tau 2}}. \tag{3.17}$$

Selengkapnya model matematis untuk masalah lead time stokastik dapat dijabarkan sebagai berikut:
Minimasi

$$\sum_{j=1}^{n} (h_j SS_j), \tag{3.18}$$

dibatasi oleh

$$SS_j = z_\alpha \sqrt{\mu_j^\tau (\sigma_j^d)^2 + (\mu_j^d)^2 \sigma_j^{\tau 2}}. \tag{3.19}$$

$$\mu_j^\tau = LI_j + \mu_j^T - L_j, \forall j = 1, 2, ..., n, \tag{3.20}$$

$$\mu_j^\tau \geq 0 \tag{3.21}$$

$$LI_j - L_i \geq 0, \forall (i,j) \in A \tag{3.22}$$

$$L_j = 0, \forall j \texttt{ di akhir rantai pasok} \tag{3.23}$$

$$L_0 = 0, \tag{3.24}$$

$$L_j \leq M, \forall j \tag{3.25}$$

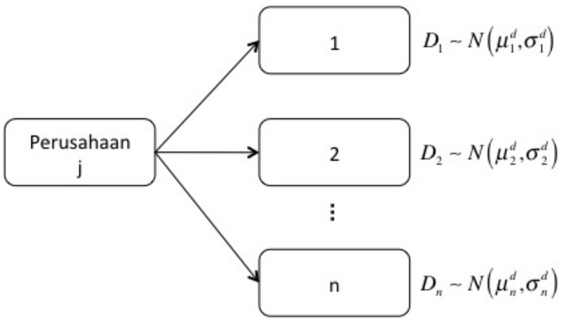
dimana
h_j adalah ongkos simpan per unit stok di perusahaan j,
SS_j adalah jumlah stok pengaman di perusahaan j,
z_α adalah ukuran standar untuk distribusi normal (misalkan, $z_\alpha = 2,33$ untuk 99% tingkat pelayanan)
μ_j^d adalah rata-rata permintaan di perusahaan j
σ_j^d adalah deviasi standar permintaan di perusahaan j
μ_j^T adalah rata-rata waktu produksi perusahaan j
σ_j^T adalah deviasi standar waktu produksi perusahaan j
L_j adalah lead time yang dijamin oleh perusahaan j
LI_j adalah lead time untuk mendapat material bagi perusahaan j
M adalah maksimum lead time yang diperbolehkan.

Rumus 3.18 menunjukkan fungsi tujuan yang meminimasi ongkos simpan stok pengaman. Rumus 3.19 adalah rumus untuk mencari besaran stok pengaman. Rumus 3.20 mendefinisikan rata-rata waktu penggantian stok, yang harus bernilai lebih besar atau sama dengan nol (Rumus 3.21) Pada Rumus 3.22 ditunjukkan bahwa lead time untuk mendapatkan material oleh perusahan j ditentukan oleh lead time terbesar yang dijamin perusahaan sebelumnya (pemasoknya). Secara berturut-turut, Rumus 3.23 dan Rumus 3.24 menunjukkan besaran lead time untuk perusahaan-perusahaan yang ada di akhir rantai pasok dan perusahaan yang ada di awal lantai pasok. Rumus 3.25 menetapkan batas maksimum lead time yang dijamin oleh semua perusahaan.

3.3.3 Model permintaan

Seperti telah disebutkan sebelumnya, permintaan untuk rantai pasok yang berbentuk umum tidak dapat diperlakukan sama seperti permintaan untuk rantai pasok yang berbentuk linear. Pada dasarnya, ada dua kategori model perhitungan permintaan sebuah perusahaan, yaitu:

1. Perusahaan j mendapat permintaan dari dua atau lebih perusahaan yang mengikutinya. Gambar 3.2 menunjukkan deskripsi perusahaan j yang mendapat permintaan dari n buah konsumen dengan masing-masing permintaannya. Masalah seperti ini biasanya terdapat pada rantai pasok yang bergerak di bidang distribusi. Pada rantai pasok seperti ini, rata-rata permintaan di



Gambar 3.2: Rantai pasok distribusi

perusahaan j didefinisikan sebagai:

$$\mu_j^d = \Sigma_{i=1}^n \mu_i^d, \tag{3.26}$$

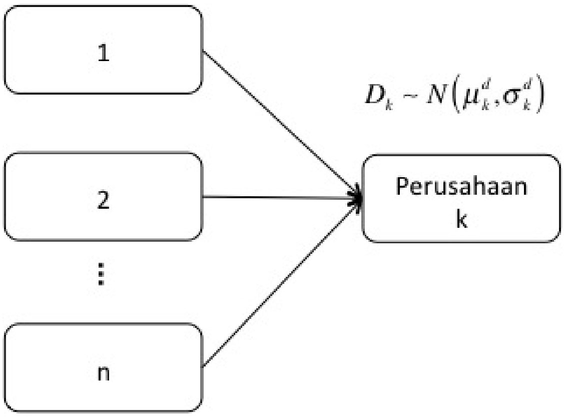
dengan standar deviasi sebesar:

$$\sigma_j^d = \sqrt{\Sigma_{i=1}^n (\sigma_i^d)^2}. \tag{3.27}$$

2. Dua perusahaan atau lebih mendapat permintaan dari satu perusahaan k yang mengikutinya. Masalah seperti ini biasanya terjadi pada rantai pasok yang berfungsi sebagai produsen yang merakit barang (*assembly*). Gambar 3.3 menunjukkan permasalahan yang terjadi di produksi perakitan.

   Pada rantai pasok seperti ini, rata-rata permintaan di perusahaan $i, \forall i \in \{1, 2, ..n\}$ didefinisikan sebagai:

$$\mu_i^d = \frac{\mu_k^d}{n}, \tag{3.28}$$



Gambar 3.3: Rantai pasok *assembly*

dengan standar deviasi sebesar:

$$\sigma_i^d = \frac{\sigma_k^d}{\sqrt{n}}. \tag{3.29}$$

Formulasi seperti ini mengasumsikan bahwa perusahaan k menerima pasokannya dari n perusahaan secara proporsional. Pada kenyataannya, perusahaan k mungkin meminta pasokan kepada berbagai perusahaan dengan jumlah yang tidak proporsional. Kasus yang tidak proporsional tersebut masih belum dapat diselesaikan pada penelitian ini.

Bab 4

Metode Penyelesaian

Pada bab ini akan dibahas metode penyelesaian untuk masalah rantai pasok yang melibatkan permintaan dan waktu produksi yang stokastik dengan bentuk rantai pasok yang umum. Model analitis yang sudah dikembangkan pada bagian sebelumnya merupakan model non linear yang dapat diselesaikan dengan metode seperti program kuadrat, metode gradien, serta relaksasi lagrangian.

Pada penelitian ini akan dibuat metode penyelesaian masalah dengan menggunakan metode optimasi tangguh yang diusulkan oleh Mulvey et al. (1995). Metode optimasi tangguh ini mengikutsertakan ukuran variansi (standar deviasi) dari performansi (ongkos).

4.1 Metode optimasi tangguh

Metode optimasi tangguh seperti yang diusulkan oleh Mulvey et al. (1995) menggunakan skenario sebagai usaha untuk menggambarkan ketidakpastian, baik dari segi permintaan maupun dari segi waktu produksi. Sitompul dan Hariandja (2011) telah mengembangkan evaluasi metode optimasi tangguh untuk rantai pasok yang berbentuk linear dengan ketidakpastiaan yang berasal dari waktu produksi. Misalkan $\Omega = 1, 2, ..S$ adalah himpunan semua skenario yang mungkin muncul dengan realisasi lead time T_{js} dan probabilitas kemunculan p_s. Jika realisasi T_{js} ini yang terjadi, maka waktu pengggantian stok di perusahaan j didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau_{js} = LI_j + T_{js} - L_j.$$

Di bagian sebelumnya, stok pengaman dihitung dengan menggunakan rata-rata μ_j^τ, bukan τ_{js}. Misalkan, perhatian ditujukan untuk keadaan dimana $\tau_{js} > \mu_j^\tau$ maka akan terjadi kekurangan stok di perusahaan j sebesar:

$$e_{js} = z_\alpha \sigma_j^d \sqrt{\tau_{js}} - z_\alpha \sqrt{\mu_j^\tau (\sigma_j^d)^2 + (\mu_j^d)^2 \sigma_j^{\tau 2}},$$

dimana bagian pertama menunjukkan stok pengaman dengan menggunakan realisasi τ_{js}, sedangkan bagian yang kedua menghitung stok pengaman menggunakan rata-rata μ_j^τ. Dengan cara yang sama, jika realisasi waktu produksi lebih kecil dari rata-ratanya maka diperoleh e_{js} yang bertanda negatif.

Dengan deminikian, model optimasi tangguh penentuan persediaan pengaman untuk rantai pasok yang berbentuk umum dapat diformulasikan sebagai berikut:

Minimasi

$$\bar{\xi} + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s(\xi_s - \bar{\xi})^2 \tag{4.1}$$

subject to

$$SS_j = z_\alpha \sqrt{\mu_j^\tau (\sigma_j^d)^2 + (\mu_j^d)^2 \sigma_j^{\tau 2}}. \tag{4.2}$$

$$e_{js} = z_\alpha \sigma_j^d \sqrt{\tau_{js}} - SS_j \tag{4.3}$$

$$\xi_s = \sum_{j=1}^{n} (h_j SS_j) + \omega \sum_{j=1}^{n} |e_{js}|, \forall s \in \Omega, \tag{4.4}$$

$$\bar{\xi} = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s \tag{4.5}$$

$$\mu_j^\tau = LI_j + \mu_j^T - L_j, \forall j = 1, 2, ..., n, \tag{4.6}$$

$$\mu_j^\tau \geq 0 \tag{4.7}$$

$$LI_j - L_i \geq 0, \forall (i, j) \in A \tag{4.8}$$

$$L_j = 0, \forall j \texttt{ di akhir rantai pasok} \tag{4.9}$$

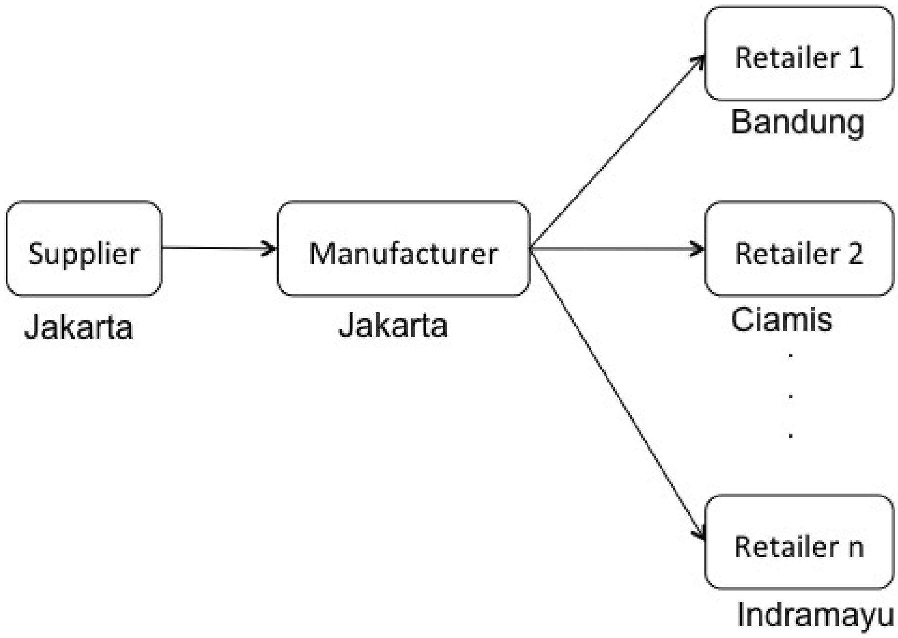
$$L_0 = 0, \tag{4.10}$$

$$L_j \leq M, \forall j, \tag{4.11}$$

dimana
λ adalah bobot untuk variabilitas ongkos total
ω adalah bobot penalti untuk penyimpangan stok pengaman
e_j^s adalah penyimpangan stok pengaman
$\bar{\xi}$ adalah rata-rata dari ongkos simpan beserta penalti.
Rumus 4.3 menyatakan fungsi tujuan yang ingin meminimasi rata-rata ongkos total serta variabilitas ongkos. Rumus 4.4 menghitung besarnya stok pengaman jika digunakan rata-rata waktu penggantian stok μ_j^τ. Rumus 4.5 menghitung besarnya deviasi stok pengaman dari yang seharusnya. Pada Rumus 4.6, deviasi dari yang seharusnya ini dikenai penalti sebesar ω untuk menghitung ongkos total jika realisasi skenario s yang terjadi. Rumus 4.7 merupakan formula perhitungan rata-rata ongkos secara keseluruhan. Rumus 4.8 menghitung rata-rata waktu penggantian stok yang diharuskan lebih besar dari nol (Rumus 4.9). Rumus 4.10 memastikan bahwa lead time untuk mendapatkan produk adalah waktu terbesar dari lead time para pemasoknya. Di akhir rantai pasok (retailer) diharuskan memenuhi kebutuhan konsumen secara seketika (Rumus 4.11). Rumus 4.12 berasumsi bahwa di awal rantai pasok memiliki material yang tidak terbatas sehingga kebutuhan selalu terpenuhi. Kebijakan perusahaan bahwa lead time perusahaan tidak lebih dari 3 diwujudkan dalam Rumus 4.13.

4.2 Kasus sederhana di Jawa Barat

PT.X yang bergerak di bidang usaha perakitan kendaraan bermotor jenis niaga berlokasi di Jakarta. Pemasok material untuk PT. X berasal dari daerah Jakarta dan sekitarnya. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa pasokan material untuk PT. X berasal dari satu pemasok (*single supplier*). Di wilayah Jawa Barat, PT. X memasok kebutuhan konsumen lewat retailer (dealer) yang tersebar di 37 daerah, yang meliputi: Bandung, Cimahi, Cirebon hingga Sukabumi. Permasalahan rantai pasok PT. X dapat dilihat pada Gambar 4.1. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa PT.X memiliki permasalahan yang sifatnya distribusi produk ke retailer yang terdapat di berbagai daerah di Jawa Barat.



Gambar 4.1: Rantai pasok distribusi PT. X

Sebagai bahan ilustrasi metode optimasi tangguh serta penyederhanaan masalah, maka distribusi kendaraan niaga ini akan diselesaikan dengan menggunakan data hipotesis. Empat daerah retailer, yaitu di Bandung, Cimahi, Ciamis dan Indramayu akan digunakan sebagai contoh penyelesaian masalah ini. Diasumsikan bahwa baik permintaan maupun produksi mengikuti bentuk distribusi normal.

Gambar 4.2 menunjukkan tabel yang berisi parameter permasalahan rantai pasok yang berdistribusi. Permintaan di retailer Bandung, Cimahi, Ciamis dan Indramayu mengikuti distribusi normal dengan parameter rata-rata μ dan standar deviasi σ seperti pada tabel. Dengan demikian, maka permintaan di produsen (manufacturer) akan memiliki distribusi normal dengan rata-rata:

$$\mu_2^d = 40 + 20 + 20 + 10 = 90, \tag{4.12}$$

dengan standar deviasi sebesar:

$$\sigma_2^d = \sqrt{10^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2} = 15.8. \tag{4.13}$$

Lokasi	Distribusi permintaan (μ, σ) unit	Distribusi produksi (μ, σ) unit	Ongkos simpan (Rp. /unit/hari)
1. Jakarta (supplier)		(1, 1)	1
2. Jakarta (manufacturer)		(2,1.5)	2
3. Bandung (retailer)	(40,10)	(1,0)	2.2
4. Cimahi (retailer)	(20,5)	(1,0)	2.3
5. Ciamis (retailer)	(20,10)	(1,0)	2.1
6. Indramayu (retailer)	(10,5)	(1,0)	2.2

Gambar 4.2: Parameter masalah di rantai pasok

Oleh karena supplier di Jakarta adalah satu-satunya pemasok PT. X, maka permintaan di supplier juga mengikuti distribusi normal dengan rata-rata 90 dan standar deviasi 15.8.

Ongkos simpan di Jakarta (*supplier*) adalah Rp. 1 per unit per hari, sedangkan ongkos simpan di Jakarta ($manufacturer$) adalah Rp. 2 per unit per hari. Ongkos simpan di retailer Bandung, Cimahi, Ciamis, Indramayu berturut-turut adalah sebesar Rp. 2.2, 2.3, 2.1 dan 2.2 per unit per hari. Waktu produksi di Jakarta berdistribusi normal dengan rata-rata 1 unit dan standar deviasi 1 unit untuk *supplier* dan rata-rata 2 serta standar deviasi 1.5 di $manufacturer$. Seluruh retailer menjanjikan lead time pemesanan sebesar 0 hari, artinya konsumen seketika mendapat produk yang dimintanya. Supplier di Jakarta juga mendapatkan materialnya dari lead time sama dengan nol ($LI_1 = 0$). Berdasarkan kebijakan perusahaan, lead time yang dijanjikan antara di dalam rantai pasok tidak melebihi 3 hari.

Perangkat lunak yang dikembangkan untuk menyelesaikan masalah rantai pasok dengan optimasi tangguh adalah perangkat lunak yang berbasis AMPL (*A Mathematical Programming Language*). Mesin (*engine*) yang digunakan adalah FilMint yang tersedia di website http://www.neos-server.org/, karena masalah yang dihadapi adalah masalah non linear. Gambar 4.3 menunjukkan model yang digunakan dan ditulis dalam bahasa AMPL. Data untuk permasalahan ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 dengan 9 skenario realisasi dari waktu produksi yang stokastik, terutama dari perusahaan 1 dan 2.

Gambar 4.5 menunjukkan solusi yang didapatkan dengan menggunakan FilMint untuk menyelesaikan permasalahan non linear. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa seluruh perusahaan memiliki lead time = 0, yaitu memenuhi kebutuhan konsumen secepatnya. Ini berarti bahwa setiap perusahaan harus menyediakan stok pengaman untuk memenuhi kebutuhan konsumennya.

```
param p{1..S};
param T{1..n, 1..S};
param muT{1..n};
param sigmaT{1..n};


var SS{j in 1..n}>=0, := j/10000;
var xi{1..S}>=0;
var xibar>=0;
var L{1..n} >=0, integer;
var es{1..n,1..S};
var tau{j in 1..n}>=0;

minimize z:
	xibar + lambda*(sum{s in 1..S}p[s]*(xi[s]-xibar)^2) ;
subject to const1{s in 1..S}:
	xi[s] == sum{j in 1..n}(h[j]*SS[j] + abs(es[j,s]));
subject to const2:
	xibar == sum{s in 1..S}(p[s]*xi[s]);
subject to const3a:
	tau[1] = 0 + muT[1]-L[1];
subject to const3b:
	tau[2]= L[1]+muT[2]-L[2];
subject to const3c{j in 3..6}:
	tau[j]=L[2]+muT[j]-L[j];
subject to const4{j in 1..n}:
	SS[j] ==  zalpha*sqrt(tau[j]*sigmaD[j]^2+muD[j]^2*sigmaT[j]^2);

subject to const5{j in 1..n, s in 1..S}:
	es[j,s] +SS[j] == if (tau[j]+T[j,s]-muT[j] >0) then zalpha*sigmaD[j]*sqrt(tau[j]+T[j,s]-muT
[j]) else 0;

subject to const6{j in 3..6}:
	L[j]=0;

subject to const7{j in 1..6}:
	L[j]<=3;
```

Gambar 4.3: Model optimasi tangguh dengan AMPL

```
robust.dat
param n:=6;
param lambda:=1;
param zalpha:=2.33;
param h:=
        1       1
        2       2
        3       2.2
        4       2.3
        5       2.1
        6       2.2;
param S:=9;
param p:=
        1       0.04
        2       0.12
        3       0.04
        4       0.12
        5       0.36
        6       0.12
        7       0.04
        8       0.12
        9       0.04    ;

param T(tr):
        1       2       3       4       5       6:=
1       0       1       1       1       1       1
2       0       2       1       1       1       1
3       0       3       1       1       1       1
4       1       1       1       1       1       1
5       1       2       1       1       1       1
6       1       3       1       1       1       1
7       2       1       1       1       1       1
8       2       2       1       1       1       1
9       2       3       1       1       1       1;
```

Gambar 4.4: Data optimasi tangguh dengan AMPL

```
filterSQP: version 20010817
FilMINT (AMPL) v0.0000000001: Optimal solution found
z = 1823.4

L [*] :=
1  0
2  0
3  0
4  0
5  0
6  0
;

SS [*] :=
1  212.907
2  318.829
3   23.3
4   11.65
5   23.3
6   11.65
;

es [*,*] (tr)
:      1          2        3   4   5   6    :=
1   -212.907   -282.015   0   0   0   0
2   -212.907   -266.767   0   0   0   0
3   -212.907   -255.066   0   0   0   0
4   -176.093   -282.015   0   0   0   0
5   -176.093   -266.767   0   0   0   0
6   -176.093   -255.066   0   0   0   0
7   -160.844   -282.015   0   0   0   0
8   -160.844   -266.767   0   0   0   0
9   -160.844   -255.066   0   0   0   0
;
```

Gambar 4.5: Output FilMint

Bab 5

Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini, kesimpulan hasil penelitian diberikan beserta dengan saran-saran untuk penelitian lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perencanaan strategis rantai pasok yang berbentuk umum berkaitan dengan stok pengaman dapat diselesaikan secara analitis. Namun, permasalahan yang dihadapi masih berbentuk non linear. Metode penyelesaian masalah yang nonlinear ini masih perlu dikembangkan agar diperoleh solusi yang efisien.

Permasalahan rantai pasok yang dibahas meliputi permasalahan yang diakibatkan oleh parameter stokastik permintaan serta waktu produksi. Permasalahan ini adalah generalisasi dari permasalahan sebelumnya yang dibahas oleh Graves & Willems (2000) yang hanya membahas permintaan stokastik dengan asumsi waktu produksi konstan. Permasalahan ini juga generalisasi dari penelitian sebelumnya Sitompul & Suryadi (2011) dan Sitompul & Hariandja (2011) yang membahas hanya pada rantai pasok yang bersifat linear.

Hasil penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Permasalahan rantai pasok PT. X di Jawa Barat berkaitan dengan perencanaan strategis stok pengaman dimana rantai pasok PT. X berbentuk umum.
2. Permasalahan rantai pasok yang berbentuk umum bersifat non linear dan dapat diselesaikan dengan menggunakan metode optimasi tangguh Mulvey et al., (1995).

5.2 Saran

Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diselesaikan pada penelitian mendatang, yaitu:

1. Efisiensi komputasi masih belum diteliti. Penelitian berikutnya berfokus kepada pencarian metode yang lebih efisien.

2. Rantai pasok yang berbentuk *assembly* belum sepenuhnya dapat dimodelkan, terutama untuk kasus dengan order ke pemasok yang tidak proporsional (tidak dibagi rata ke seluruh pemasoknya).

3. Masalah-masalah strategis di rantai pasok, selain stok pengaman perlu diselesaikan juga, seperti perencanaan kapasitas.

Daftar Pustaka

[1] Geary, S., Childerhouse, P., Towill, D., 2002. Uncertainty and the seamless supply chain. Supply Chain Management Review 6 (4), 52-60.

[2] Gfrerer, H., Zapfel, G., 1995. Hierarchical model for production planning in the case of uncertain demand. European Journal of Operational Research 86 (1), 142-161.

[3] Graves, S. C., Willems, S. P., 2000. Optimizing strategic safety stock placement in supply chains. Manufacturing and Service Operations Management 2 (1), 68–83.

[4] Lasserre, J. B., Merce, C., 1990. Robust hierarchical production planning under uncertainty. Annals of Operations Research 26, 73-87.

[5] Lesnaia, E., Vasilescu, I., Graves, S. C., 2004. The complexity of safety stock placement problem in general-network supply chains. Technical report, Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST), Massachusetts Institute of Technology.

[6] Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., Zenios, S. A., 1995. Robust optimization of large scale systems. Operations Research 43 (2), 264-281.

[7] Rosenblatt, M. J., Lee, H. L., 1987. A robustness approach to facilities design. International Journal of Production Research 25 (4), 479-486.

[8] Sitompul, C., Aghezzaf, E. H., Van Landeghem, H., Dullaert, W., 2008. Safety stock placement problems in capacitated supply chains. International Journal of Production Research 46, 4709–4727.

[9] Sitompul, C., Hariandja, J., 2011. Evaluasi metode optimasi tangguh untuk perencanaan rantai pasok. Laporan Penelitian LPPM Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.

[10] Sitompul, C., Suryadi, D., 2011. Perencanaan rantai pasok di level strategis. Laporan Penelitian LPPM Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.

[11] Van Landeghem, H., Vanmaele, H., 2002. Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. Journal of Operations Management 20, 769-783.