

# KEPUTUSAN PEMBANGUNAN PUSAT DISTRIBUSI YANG BERKELANJUTAN DALAM RANTAI PASOKAN

Ronsen Purba

STMIK Mikroskil

Jl. Thamrin No. 112, 124, 140 Medan 20212

[ronsens@mikroskil.ac.id](mailto:ronsens@mikroskil.ac.id)

---

## Abstrak

Rantai pasokan merupakan sebuah jaringan yang mengelola pengadaan bahan baku, transformasi bahan baku ke produk antara dan akhir, dan distribusi produk akhir ke pengecer atau pelanggan. Menentukan lokasi fasilitas (pusat) distribusi dalam rantai pasokan dengan kendala pemenuhan pasar memungkinkan perusahaan lebih dekat kepada pelanggan, dan memberikan keuntungan kompetitif. Mengurangi waktu transportasi dan penggunaan minyak, biaya tenaga kerja dan peralatan merupakan faktor utama untuk membantu perusahaan untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan profitabilitas mereka. Dalam paper ini kami mengusulkan sebuah pendekatan MINLP untuk menyelesaikan model optimisasi untuk memutuskan pusat distribusi berbasis pertimbangan lingkungan.

Kata kunci : *rantai pasokan, pusat distribusi, keberlanjutan, MINLP, modeling*

---

## 1. Pendahuluan

Manajemen Rantai Pasokan - *Supply Chain Management* (SCM) merupakan bidang yang semakin digeluti oleh perusahaan dan peneliti. SCM pada awalnya mulai menarik perhatian perusahaan pada tahun 1990-an setelah menyadari potensi yang ada melalui integrasi dengan pemain lain dalam rantai pasokan mereka dengan memperhitungkan biaya dan keuntungan. Faktor biaya utama dalam satu rantai pasokan dapat dimasukkan ke dalam kategori: produksi, transportasi dan persediaan. Pihak-pihak yang terlibat dalam rantai pasokan yang efektif biasanya mempunyai keinginan dan keperdulian bersama dengan partner yang ada di bawahnya (*downstream elements*) dan secara bersamaan mengharapkan hal yang sama ke elemen di atasnya (*upstream elements*).

Tujuan dari rantai pasokan adalah menyediakan produk yang memuaskan pelanggan dan tetap menjaga kelestarian lingkungan. Perusahaan yang fokus pada rantai pasokan telah berada satu langkah di depan dalam mengadopsi dan mengembangkan ide keberlanjutan karena rantai pasokan memperhatikan produk mulai dari pengadaan sampai penyaluran ke pelanggan (Linton et al. [28-29]). Akan tetapi, perspektif rantai pasokan saat ini lebih pada aspek *anthropocentric* dibandingkan dengan *bio-centric*. Ukuran ekonomi dalam rantai ini biasanya lebih dominan dibandingkan tujuan terkait dengan aspek lingkungan. Lebih jauh, bagian penting dari penciptaan nilai serta konsumsi energi dan pengaruhnya pada lingkungan biasanya terjadi pada saat proses sebelum pengadaan bahan baku sampai pada penyelesaian produk dengan siklus hidup penggunaannya. Dengan menggunakan formulasi rantai pasokan sebagai dasar untuk mendiskusikan keberlanjutan, pada kondisi terbaik mencapai optimisasi hanya aspek *eco-efficiency* dan kondisi terburuk memberikan alasan untuk mengalihkan tanggung jawab masalah lingkungan ke pihak lain. Tidak satupun solusi optimal untuk *eco-efficiency* secara keseluruhan untuk sistem rantai pasokan. Kemunculan rantai pasokan berkelanjutan mengharuskan satu rantai pasokan dalam lingkup tertutup (*closed-loop supply chain*) perlu dimodelkan.

Saat ini, meskipun fakta menunjukkan bahwa perhatian yang meningkat diberikan terhadap *green supply chain management* dan *sustainable supply chain management*, sangat sedikit riset yang dilakukan untuk mengatasi area yang menghubungkan keberlanjutan dengan *eco-efficiency* and *closed-loop supply chain*. Saat ini, organisasi bisnis berhadapan dengan peningkatan tekanan untuk menyeimbangkan pasar dan kepedulian terhadap lingkungan (Hui et al. [17]). Akibatnya muncul kesadaran yang terus meningkat terkait kebutuhan-hijau dalam proses fabrikasi dan layanan, prosedur terkait *reverse logistic* serta program pengelolaan limbah pada akhir penggunaan produk.

Tujuan dari riset ini adalah mengembangkan model optimisasi dan algoritma untuk menyelesaikan masalah rancangan rantai pasokan multi-eselon dan manajemen persediaan yang ramah lingkungan. Dengan menggunakan pendekatan yang memberi jaminan layanan untuk memodelkan waktu tunda dalam aliran material dalam sistem persediaan yang juga multi-eselon ([1], [11-13], 18-21], [33], [39]) kami memanfaatkan sifat stokastik dari pengadaan produk pada setiap eselon pada rantai pasokan dan mengembangkan model optimisasi deterministik yang ekuivalen. Model ini menentukan rancangan rantai pasokan, level pengiriman dari pabrik ke pusat distribusi dan dari pusat distribusi ke pelanggan, dan keputusan persediaan seperti *pipeline inventory* dan pasokan penyangga pada setiap *node* dalam jaringan rantai pasokan. Model ini juga menangkap *risk-pooling effects* [9] dengan mengkonsolidasikan pasokan penyangga pada level di bawah ke *node* di atasnya dalam rantai pasokan multi-eselon yang dimodelkan sebagai MINLP. Untuk menyelesaikan masalah secara efisien dikembangkan sebuah algoritma pencarian yang bersifat *tailored feasible neighborhood* berdasarkan relaksasi Lagrange untuk memperoleh solusi optimal global.

Selanjutnya diskusi dalam paper ini akan dibagi sebagai berikut: bagian dua akan memaparkan kajian pustaka, diikuti dengan metode penelitian pada bagian tiga, selanjutnya pada bagian empat akan diusulkan sebuah solusi terhadap model yang dikembangkan, diakhiri dengan kesimpulan dan rencana kerja berikutnya pada bagian lima.

## 2. Kajian Pustaka

Secara umum diakui bahwa rantai pasokan dan manajemen yang berkaitan merupakan perkembangan yang logis dalam logistik dan manajemen logistik secara berturut-turut (Cooper dan Ellram, [5]; Bowersox dan Closs [2]; Kent dan Flint [23]; Ganeshan et al. [10]). Banyak literatur sepakat bahwa evolusi logistik dan kemudian SCM melalui tiga fase (Masters and Pohlen [32]; Langley Jr. [25]), yakni: (1) manajemen fungsional (1960-1970) – fungsi seperti pembelian, pengiriman, dan distribusi yang dikelola secara terpisah, (2) integrasi internal (1980s) – manajemen fungsi rantai pasokan yang terdiri dari fasilitas tunggal digabungkan dan menjadi tanggung jawab satu individu, dan (3) integrasi eksternal (1990s) – fungsi manajemen rantai pasokan melalui keseluruhan rantai digabungkan yang membutuhkan kerjasama dan koordinasi antara pihak-pihak yang terlibat dalam rantai tersebut. Fase-fase ini dipandang lebih berdasarkan perluasan konsep cakupan manajemen. Sebelum tahun 1990-an, isu lingkungan atau hijau sangat jarang dibicarakan. Fokus utama adalah pada kinerja terkait produktivitas, efisiensi biaya dan hal berkaitan dengan waktu. Pada saat sebelum 1990an persoalan didominasi dengan konsep. Akan tetapi, sampai akhir tahun 1980-an pemanasan global menjadi pemicu utama pemikiran pembangunan yang berkelanjutan (*sustainable development*). Laporan Brundtland yang terkenal itu merupakan awal munculnya “sustainable development” yang merupakan definisi yang komprehensif untuk menggambarkan “pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa harus mengorbankan generasi berikutnya”. Keberlanjutan memperoleh relevansi yang bersifat eksponensial dan mendapatkan popularitas yang terus meningkat dalam setiap bidang penelitian. Pada tahun 1990-an, sejumlah studi menunjukkan bukti bahwa efek kerusakan

lapisan memberikan akibat negatif pada kesehatan umat manusia. (Longstreth et al. [30], Lim dan Cooper [26]). Perkembangan ini memunculkan pengembangan trilogi lingkungan-energi-ekologi dalam mengelola keberlanjutan. Dengan trilogi ini, keberlanjutan dapat dikelola dengan menyeimbangkan isu lingkungan, energi dan ekologi dalam setiap sistem.

Telah terbukti bahwa praktik rantai pasokan hijau memberi nilai kompetitif dan kinerja secara ekonomi. Studi awal pada lima perusahaan besar di Inggris yang dilakukan oleh (Lamming dan Hampson [24]) menunjukkan bahwa rantai pasokan memperoleh keuntungan dengan menerapkan pendekatan ramah lingkungan yang lebih baik. (Rao dan Holt [36]) telah melakukan sebuah survei pada sejumlah organisasi di kawasan Asia Tenggara. Berdasarkan investigasi tersebut, mereka menyimpulkan bahwa terdapat “korelasi yang signifikan antara adanya penerapan rantai pasokan yang ramah lingkungan dengan kemampuan kompetisi dan kinerja ekonomi dari perusahaan-perusahaan yang disurvei”.

Bersamaan dengan isu-isu lingkungan, peningkatan akan kekurangan energi secara global telah menarik perhatian pada topik seperti konservasi energi (Markis dan Paravantis [31], Lin [27], He et al. [15]) dan pengembangan energi terbarukan (de Vries et al. [7], Dincer [8], Jefferson [22]). Dibandingkan dengan pengembangan energi terbarukan yang mempunyai tujuan untuk mengembangkan dan menggunakan regenerasi dan sumber energi dengan kemampuan self-recoverable, konservasi energi bertujuan untuk mengurangi atau mengeliminasi penggunaan energi dan limbah dengan meningkatkan efisiensi energi selama proses produksi dan konsumsi. Peningkatan efisiensi energi dapat mengatasi krisis kekurangan pasokan energi dengan efek yang langsung sementara pengembangan energi terbarukan mempunyai dampak dalam jangka waktu yang lama. Lebih jauh, dibandingkan dengan sumber energi tradisional (mis., minyak bumi, batubara dan gas alam), energi terbarukan merupakan usaha untuk mencaai sumber energi alternatif dengan dampak lingkungan yang rendah bahkan mencapai nol. Akan tetapi, karena lebih dari 75% energi saat ini masih berasal dari sumber tradisional dan industri energi tradisional justru menjadi penyumbang terbesar terhadap polusi di dunia, membuat upaya mengefisienkan penggunaan energi menjadi hal yang harus dilakukan dan oleh karena itu pengurangan konsumsi energi yang memberikan dampak negatif pada lingkungan dapat dihilangkan atau dikurangi.

Efisiensi ekologi (*eco-efficiency*) adalah suatu *break-even point* pada mana penggunaan sumber daya alam paling efisien, polusi lingkungan minimal dan keseimbangan antara aspek ekonomis dan ekologi dicapai. Karena *eco-efficiency* dipengaruhi oleh banyak faktor seperti keberadaan teknologi, filosofi manajemen dan lain-lain, maka peningkatan berkelanjutan dibutuhkan sepanjang waktu.

Sementara itu mengoptimalkan persediaan melalui rantai pasokan memberikan insentif secara ekonomi [4, 14]. Untuk mencapai tujuan ini, tantangan terbesar adalah bagaimana melakukan integrasi manajemen persediaan dengan rancangan jaringan untuk proses rantai pasokan yang multi-eselon secara efektif, sehingga pengambilan keputusan terhadap lokasi didasarkan pada pertimbangan lingkungan untuk menyimpan persediaan yang optimal. Meskipun manajemen persediaan adalah masalah sangat penting dalam proses industri, kebanyakan model menjalankan manajemen persediaan dan perancangan rantai pasokan secara terpisah. Pada sisi lain, terdapat beberapa penelitian tentang optimisasi rantai pasokan yang mengaitkannya dengan biaya persediaan, tetapi melihat isu persediaan secara kasar tanpa kebijakan manajemen persediaan yang rinci [3, 19-21, 41]

Daskin et al. [6] dan Shen et al. [8] memberikan sebuah model *joint location-inventory*, yang memperluas model fasilitas kapasitas tak terbatas (*uncapacitated*) klasik untuk memasukkan area persediaan nonlinier dan biaya pasokan penyangga untuk jaringan rantai pasokan dua-tahap, sehingga keputusan pada instalasi pusat distribusi dan pengisian kembali persediaan secara detail ikut dioptimalkan. Untuk menyederhanakan masalah, persediaan pada

pengecer diabaikan, dan diasumsikan bahwa semua pusat distribusi mempunyai waktu tunda yang sama dan tetap, dan permintaan pada setiap pelanggan mempunyai rasio variansi-vs-rerata. Dengan asumsi yang sama, Ozsen et al. [34] telah mengembangkan model dengan mempertimbangkan kapasitas terbatas pada pusat distribusi. Hasil kerja mereka lebih jauh dikembangkan oleh Ozsen et al. [35] untuk membandingkannya dengan kasus dimana pelanggan dibatasi hanya mendapat barang dari satu pusat distribusi dengan kasus jika pelanggan dapat memperoleh barang dari banyak pusat distribusi. Pengembangan lain dilakukan oleh Sourirajan et al. [40], dengan asumsi waktu tunda pengisian yang identik direduksi, sementara asumsi pada ketidakpastian permintaan tetap dibutuhkan. You and Grossmann [41] mengusulkan pendekatan *mixed-integer nonlinear programming* (MINLP) untuk mempelajari model yang lebih umum berdasarkan model yang dibuat oleh Daskin et al. [16] dan Shen et al. [38], untuk mereduksi asumsi pada rasio variansi-vs-rerata untuk permintaan pelanggan.

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1 Optimisasi Komprehensif

Optimisasi Komprehensif terhadap Jaringan Logistik Berkelanjutan dapat dilakukan dengan:

- Mengurangi jarak tempuh dan biaya terkait seperti tenaga kerja, konsumsi minyak, masa pakai dan pemeliharaan peralatan
- Mencoba strategi pengadaan alternatif seperti “*near shoring*”, “*reshoring*”, membeli langsung dan lokalisir, menguji dampak persediaan, LTL dan dampak konsolidasi pemasukan
- Mencoba mode transportasi alternatif (jalan raya, rel kereta api, kapal atau gabungan)
- Mengoptimalkan persediaan untuk mengurangi emisi gas beracun
- Mengelola kelangkaan minyak bumi dan harga minyak yang sulit diduga
- Mengurangi emisi gas beracun terkait dengan transportasi dan fasilitas (*carbon footprint*)
- Mengurangi biaya operasional (biasanya sekitar 15%) dan penghematan tambahan (sekitar 5 - 15%) terkait dengan pengurangan persediaan dan peningkatan tingkat pelayanan

#### 3.2 Merumuskan Masalah

Kita mempunyai rantai pasokan potensial yang terdiri dari sekumpulan pabrik (suplier)  $i \in I$ , sejumlah kandidat lokasi pusat distribusi  $j \in J$ , dan sekumpulan zona pelayanan konsumen  $k \in K$ , dimana biaya peresediaannya harus diperhitungkan. Zona pelayanan konsumen dapat merepresentasikan distributor, gudang, pemasok, pengecer atau penjual yang biasanya membutuhkan komponen rantai pasokan untuk material tertentu [1, 3]. Alternatif lain, kita dapat memandang permintaan konsumen sebagai agregasi dari kelompok konsumen yang dioperasikan dengan penjual yang mengelola persediaan (penjual mengurus persediaan konsumen), yang umum terjadi dalam perusahaan industri [16, 37].

Dalam rantai pasokan potensial yang dimaksud, lokasi pabrik, pusat distribusi potensial dan zona pelayanan konsumen serta jarak antar lokasi tersebut diberikan. Biaya investasi untuk instalasi pusat distribusi dinyatakan dengan fungsi biaya dengan tarif statis. Masing-masing pengecer (toko)  $i$  mempunyai permintaan berdistribusi normal yang tidak berkorelasi dengan rata-rata  $\mu_i$  dan variansi  $\sigma_i^2$  dalam setiap unit waktu. Pembatasan dengan sumber tunggal, yang umum dalam rantai pasokan perusahaan industri [16, 37,42], digunakan untuk distribusi dari pabrik ke pusat distribusi dan dari pusat distribusi ke zona pelayanan konsumen. Jadi setiap pusat distribusi dilayani oleh satu pabrik, dan setiap zona pelayanan

konsumen dilayani oleh satu pusat distribusi. Biaya transportasi linier diberikan dari pabrik  $i$  ke pusat distribusi  $j$ , dan dari pusat distribusi  $j$  ke zona pelayanan konsumen  $k$ . Waktu pemenuhan order deterministik terkait pada pusat distribusi dan zona pelayanan konsumen yang terdiri dari waktu pengemasan barang, waktu transportasi dan periode penilaian persediaan diberikan. Waktu pelayanan untuk setiap pabrik, dan waktu pelayanan maksimum untuk masing-masing zona pelayanan konsumen diketahui. Juga diberikan faktor persediaan penyangga untuk pusat distribusi dan zona pelayanan konsumen, yang berhubungan dengan deviasi standar normal dari maksimum jumlah permintaan yang akan dipenuhi oleh *node* dari persediaan penyangganya. Periode peninjauan digunakan untuk kendali persediaan pada setiap *node*. Biaya persediaan yang muncul pada pusat distribusi dan konsumen juga diberikan..

Masalahnya adalah bagaimana menentukan berapa banyak pusat distribusi yang dibangun, di mana lokasi masing-masing pusat distribusi, pabrik mana yang akan melayani pusat distribusi tertentu, dan pusat distribusi yang mana yang akan melayani masing-masing zona pelayanan konsumen, berapa lama seharusnya setiap pusat distribusi memperhitungkan waktu pelayanannya, dan berapa tingkat stok pengaman untuk memenuhi kebutuhan pada masing-masing pusat distribusi dan zona pelayanan konsumen sehingga dapat meminimumkan biaya instalasi pusat distribusi, transportasi, persediaan dan konsumsi energi.

### 3.3 Memformulasikan Model

Yang menjadi masalah dalam riset ini adalah bagaimana merancang jaringan bersama rantai pasokan yang multi-eselon berbasis lingkungan dan manajemen persediaan yang dapat diformulasikan sebagai mixed-integer nonlinear program (MINLP). Parameter model dan variabel keputusan didefinisikan sebagai berikut:

#### Sets

- $I$  Himpunan pabrik (pemasok) dengan indeks  $i$   
 $J$  Himpunan calon pusat distribusi dengan indeks  $j$   
 $K$  Himpunan zona pelayanan konsumen dengan indeks  $k$

#### Parameters

- $\alpha 1_{ij}$  Biaya unit transportasi dari pabrik  $i$  ke  $DC_j$   
 $\alpha 2_{jk}$  Biaya unit transportasi dari  $DC_j$  ke zona pelayanan konsumen  $k$   
 $\beta_j$  Biaya tetap untuk instalasi sebuah a DC pada lokasi kandidat  $j$  (per tahun)  
 $\gamma_j$  Koefisien biaya variabel untuk instalasi calon  $DC_j$  (per tahun)  
 $\delta 1_j$  Biaya unit penyimpanan persediaan pada  $DC_j$  (per tahun)  
 $\delta 2_k$  Biaya unit penyimpanan persediaan pada zona pelayanan konsumen  $k$  (per tahun)  
 $T_k$  Waktu servis bergaransi maksimum untuk pelanggan pada zona pelayanan konsumen  $k$   
 $S_i$  Waktu layanan dari pabrik  $i$   
 $p 1_{ij}$  Waktu pemenuhan order dari  $DC_j$  jika DC tersebut dilayani oleh pabrik  $i$ , termasuk waktu pengemasan pada DC, waktu transportasi dari pabrik  $i$  ke  $DC_j$ , dan periode peninjauan persediaan, serta waktu pemrosesan order pada zona pelayanan konsumen  $k$  jika zona tersebut dilayani oleh  $DC_j$ .  
 $p 2_{jk}$  Waktu pengemasan pada  $DC_j$ , waktu transportasi dari  $DC_j$  ke zona pelayanan konsumen  $k$ , dan periode peninjauan persediaan  
 $\mu_k$  Permintaan rata-rata pada zona pelayanan konsumen  $k$  (per hari)  
 $\sigma_k^2$  Variansi permintaan pada zona pelayanan konsumen  $k$  (per hari)  
 $\rho$  Jumlah hari dalam satu tahun  
 $\tau 1_j$  Faktor stok penyangga dari  $DC_j$

- $\tau 2_k$  Faktor stok penyangga dari zona pelayanan konsumen  $k$   
 $\varepsilon 1_{ij}$  Biaya konsumsi energi jika  $DC_j$  dilayani oleh pabrik  $i$   
 $\varepsilon 2_j$  Biaya konsumsi energi pada  $DC_j$   
 $v$  Keandalan (Reliability) ( $0 \leq v \leq 1$ )

#### Variabel Biner

- $X_{ij}$  1 jika  $DC_j$  dilayani oleh pabrik  $i$  dan 0 jika tidak  
 $Y_j$  1 jika kita membangun DC di lokasi  $j$  dan 0 jika tidak  
 $Z_{jk}$  1 jika zona pelayanan konsumen  $k$  dilayani oleh  $DC_j$  dan 0 jika tidak

#### Variabel Kontinu

- $L_k$  Waktu tunda netto dari zona pelayanan konsumen  $k$   
 $N_j$  Waktu tunda netto dari  $DC_j$   
 $S_j$  Jaminan waktu layanan pada  $DC_j$  ke zona pelayanan konsumen

### 3.4 Menentukan Fungsi Objektif

Model pada penelitian ini adalah meminimumkan biaya total pengembangan rantai pasokan sebagai berikut:

- a. Biaya instalasi pusat distribusi pada lokasi  $j$  yang dipilih dinyatakan dalam bentuk biaya tetap yang merupakan skala ekonomis dalam investasi. Permintaan ekspektasi untuk  $DC_j$  adalah  $(\sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k)$ , yang sama dengan permintaan rata-rata tahunan untuk semua zona pelayanan konsumen  $k \in K$  yang dilayani oleh  $DC_j$ . Oleh karena itu, biaya instalasi  $DC_j$  terdiri dari biaya tetap  $\beta_j$  dan biaya variabel  $(\gamma_j \sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k)$ , yakni perkalian koefisien biaya variabel dan permintaan rata-rata DC tersebut per tahun. Jadi, biaya total instalasi untuk semua DC adalah:

$$\sum_{j \in J} \beta_j Y_j + \sum_{j \in J} \left( \gamma_j \sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k \right) + C_v \quad (1)$$

- b. Perkalian permintaan rata-rata dari  $DC_j$   $(\sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k)$  dan biaya unit transportasi  $(\sum_{i \in I} \alpha 1_{ij} X_{ij})$  antara pabrik  $i$  dan  $DC_j$  menghasilkan biaya transport tahunan dari pabrik ke DC adalah:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( \alpha 1_{ij} X_{ij} \sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k \right) \quad (2)$$

Dengan cara sama, permintaan produk rata-rata tahunan dari zona pelayanan konsumen  $k$  dan biaya transportasi per unit antar zona pelayanan konsumen  $k$  memberikan biaya tahunan transportasi dari DC ke zona pelayanan konsumen adalah:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha 2_{ij} \rho Z_{jk} \mu_k \quad (3)$$

- c. Biaya konsumsi energi untuk  $DC_j$  jika dilayani oleh pabrik  $i$  adalah:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \varepsilon 1_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

dan Biaya konsumsi energi untuk  $DC_j$  jika kita meletakkan DC pada lokasi  $j$  adalah:

$$\sum_{j \in J} \varepsilon 2_j Y_j$$

(5)

- d. Permintaan pada zona pelayanan konsumen  $k$  mengikuti sebuah distribusi normal dengan rata-rata  $\mu_k$  dan variansi  $\sigma_k^2$ . Akibat dari *risk-pooling effect* [32], permintaan atas waktu tunda netto ( $N_j$ ) pada  $DC_j$  juga berdistribusi normal dengan rata-rata  $N_j \sum_{k \in J_k} \mu_k$  dan variansi  $N_j \sum_{k \in J_k} \sigma_k^2$ , dimana  $J_k$  adalah sekumpulan zona pelayanan konsumen  $k$  yang dilayani oleh  $DC_j$ . Jadi, stok penyangga yang diperlukan pada  $DC_j$  dengan satu faktor stok

penyangga  $\tau 1_j \sqrt{N_j} \cdot \sqrt{\sum_{k \in K} \sigma_k^2 Z_{jk}}$ . Dengan menghitung biaya penyimpanan persediaan per tahun adalah  $\delta 1_j$ , kita memperoleh biaya tahunan untuk semua DC adalah:

$$\sum_{j \in J} \tau 1_j \delta 1_j \sqrt{N_j} \cdot \sqrt{\sum_{k \in K} \sigma_k^2 Z_{jk}} + C_v \quad (6)$$

Dengan cara sama, permintaan atas waktu tunda netto  $L_k$  dari zona pelayanan konsumen  $k$  berdistribusi normal dengan rata-rata  $L_k \mu_k$  dan variansi  $L_k \sigma_k^2$ . Jadi biaya pengadaan stok penyangga pada semua zona pelayanan konsumen adalah:

$$\sum_{k \in K} \tau 2_j \delta 2_j \sigma_k \sqrt{L_k} \quad (7)$$

Oleh karena itu, fungsi objektif dari model ini adalah:

$$\begin{aligned} \min : & \sum_{j \in J} \beta_j Y_j + \sum_{j \in J} \left( \gamma_j \sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k \right) + C_v + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left( \alpha 1_j X_{ij} \sum_{k \in K} \rho Z_{jk} \mu_k \right) \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \alpha 2_j \rho Z_{jk} \mu_k \\ & + \sum_{j \in J} \tau 1_j \delta 1_j \sqrt{N_j} \cdot \sqrt{\sum_{k \in K} \sigma_k^2 Z_{jk}} + C_v \\ & + \sum_{k \in K} \tau 2_k \delta 2_k \cdot \sigma_k \sqrt{L_k} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.5 Menentukan Kendala

Terdapat tiga jenis kendala yang digunakan untuk menentukan struktur jaringan. Yang pertama adalah bahwa jika  $DC_j$  dibangun, DC tersebut hanya dilayani oleh satu pabrik  $i$ , jika DC tidak dibangun, maka tidak ada pabrik yang ditunjuk untuk melayani. Hal ini dapat dimodelkan dengan:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = Y_j, \quad \forall j \quad (9)$$

Kendala kedua menyatakan bahwa setiap zona pelayanan konsumen  $k$  dilayani oleh satu DC, dan dinyatakan dengan:

$$\sum_{j \in J} Z_{jk} = 1, \quad \forall k \quad (10)$$

Kendala ketiga adalah bahwa jika zona pelayanan konsumen  $k$  dilayani oleh DC pada kandidat lokasi  $j$ , maka DC tersebut harus ada dan dinyatakan dengan:

$$Z_{jk} \leq Y_j, \quad \forall j, k \quad (11)$$

Dua kendala digunakan untuk menentukan waktu tunda netto dari DC dan zona pelayanan konsumen. Pergantian waktu tunda dari  $DC_j$  harus sama dengan waktu layanan bergaransi ( $SI_i$ ) dari pabrik  $i$ , yakni untuk melayani  $DC_j$ , ditambah dengan waktu pemrosesan order ( $p_{ij}$ ). Perlu dicatat bahwa waktu layanan bergaransi ( $SI_i$ ) dari pabrik  $i$  diperlakukan sebagai parameter, dan merepresentasikan kasus terburuk ketidakpastian pasokan dan penundaan produksi di pabrik. Karena setiap DC hanya dilayani oleh satu pabrik, waktu tunda pengisian kembali barang pada  $DC_j$  dihitung dengan  $\sum_{i \in I} (SI_i + p_{ij}) \cdot X_{ij}$ . Jadi, waktu tunda netto dari  $DC_j$  harus lebih besar dibandingkan dengan waktu tunda pengisian kembali barang dikurangi dengan waktu pelayanan bergaransi ke zona pelayanan konsumen di bawahnya,  $S_j$ , yang merupakan sebuah variabel.

$$N_j \geq \sum_{i \in I} (SI_i + p_{ij}) \cdot X_{ij} - S_j, \quad \forall j \quad (12)$$

Dengan cara sama, waktu tunda netto  $L_k$  pada zona pelayanan konsumen  $k$  lebih besar dari waktu tunda pengisian kembali barang dikurangi dengan waktu pelayanan maksimum bergaransi,  $R_k$ , yang diberikan dengan pertidaksamaan nonlinier berikut:

$$L_k \geq \sum_{j \in J} (S_j + p_{2jk}) \cdot Z_{jk} - R_k, \quad \forall k \quad (13)$$

Dalam paper ini kami menganggap  $R_k$  sebagai parameter, meskipun formulasi ini dapat dikembangkan menjadi model optimisasi dwi-kriteria dengan memperlakukan  $R_k$  sebagai variabel untuk meminimumkan biaya total secara simultandan tingkat responsif, seperti diuraikan pada [40]. Akhirnya, semua variabel keputusan untuk struktur jaringan adalah variabel biner, dan variabel untuk waktu layanan bergaransi serta waktu tunda netto merupakan variabel non-negatif sebagai berikut:

$$X_{ij}, Y_j, Z_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k \quad (14)$$

$$S_j \geq 0, N_j \geq 0, \quad \forall j \quad (15)$$

$$L_k \geq 0, \quad \forall k \quad (16)$$

#### 4. Algoritma Penyelesaian Masalah

Setelah menyelesaikan problema relaksasi, prosedur untuk pencarian suboptimal tetapi solusi layak-bulat dari solusi optimal kontinu dapat dijelaskan sebagai berikut:

Misalkan:  $x = [x] + f$ ,  $0 \leq f \leq 1$ ; merupakan solusi problema relaksasi,  $[x]$  adalah komponen bulat dari variabel non-integer  $x$  dan  $f$  adalah komponen pecahan.

Selanjutnya algoritma ditempuh dengan langkah-langkah sebagai berikut:

**Langkah 1.** Pilih baris  $i^*$  bilangan bulat terkecil yang tidak fisibel sedemikian hingga  $\delta_{i^*} = \min\{f_i, 1 - f_i\}$

**Langkah 2.** Hitung

$$v_{i^*}^T = e_{i^*}^T B^{-1}; \text{ yang merupakan harga operasional}$$

**Langkah 3.** Hitung  $\sigma_{ij} = v_{i^*}^T a_j$ ; dimana  $j$  berhubungan dengan  $\min_j \left\{ \left| \frac{d_j}{\sigma_{ij}} \right| \right\}$

I. Untuk nonbasic  $j$  pada batas bawah

$$\text{Jika } \sigma_{ij} < 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{(1 - \delta_{i^*})}{-\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} > 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = 1 - f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{(1 - \delta_{i^*})}{\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} < 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = 1 - f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{\delta_{i^*}}{-\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} > 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{\delta_{i^*}}{\sigma_{ij}}$$

II. Untuk nonbasic  $j$  pada batas atas

$$\text{Jika } \sigma_{ij} < 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = 1 - f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{(1 - \delta_{i^*})}{-\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} > 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{(1 - \delta_{i^*})}{\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} > 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = 1 - f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{\delta_{i^*}}{\sigma_{ij}}$$

$$\text{Jika } \sigma_{ij} < 0 \text{ dan } \delta_{i^*} = f_i \text{ hitung } \Delta = \frac{\delta_{i^*}}{-\sigma_{ij}}$$

Jika tidak, pergi ke nonbasic non-integer berikutnya atau  $j$  (jika ada). Akhirnya kolom  $j^*$  dinaikkan dari BB atau diturunkan dari BA. Jika tidak ada pergi ke  $i^*$  berikutnya.

**Langkah 4.** Hitung

$$\alpha_{j^*} = B^{-1} \alpha_{j^*};$$

**Langkah 5.** Uji rasio;

Jika  $j^*$  adalah BB ( lower bound)

Misalkan:

$$A = \min_{i' \neq i^* | \alpha_{ij^*} > 0} \left\{ \frac{x_{B_{i'}} - l_{i'}}{\alpha_{ij^*}} \right\}$$

$$B = \min_{i' \neq i^* | \alpha_{ij^*} < 0} \left\{ \frac{u_{i'} - x_{B_{i'}}}{-\alpha_{ij^*}} \right\}$$

$$C = \Delta$$

pergerakan maksimum  $j^*$  yang tergantung pada:  $\theta^* = \min(A, B, C)$

Jika  $j^*$  adalah BA (upper bound)

Misalkan:

$$A' = \min_{i' \neq i^* | \alpha_{ij^*} < 0} \left\{ \frac{x_{B_{i'}} - l_{i'}}{\alpha_{ij^*}} \right\}$$

$$B' = \min_{i' \neq i^* | \alpha_{ij^*} > 0} \left\{ \frac{u_{i'} - x_{B_{i'}}}{-\alpha_{ij^*}} \right\}$$

$$C' = \Delta$$

pergerakan maksimum  $j^*$  yang tergantung pada:  $\theta^* = \min(A', B', C')$

**Langkah 6.** Pertukarkan basis untuk ketiga kemungkinan berikut:

1. Jika  $A$  atau  $A'$ 
  - $x_{B_{i'}}$  menjadi nonbasic pada batas bawah  $l_{i'}$ .
  - $x_{j^*}$  menjadi basic (menggantikan  $x_{B_{i'}}$ .)
  - $x_{i^*}$  tetap basic (*non-integer*)
2. Jika  $B$  atau  $B'$ 
  - $x_{B_{i'}}$  menjadi nonbasic pada batas atas  $u_{i'}$ .
  - $x_{j^*}$  menjadi basic (menggantikan  $x_{B_{i'}}$ .)
  - $x_{i^*}$  tetap basic (*non-integer*)
3. Jika  $C$  atau  $C'$ 
  - $x_{j^*}$  menjadi basic (menggantikan  $x_{i^*}$ .)
  - $x_{i^*}$  menjadi superbasic pada nilai bulat

Ulangi dari Langkah 1.

## 6. Kesimpulan

Dalam paper ini, kami telah memberikan sebuah model MINLP untuk menghasilkan struktur jaringan optimal, transportasi dan tingkat persediaan pada rantai pasokan multi-eselon dengan konsiderasi keberlanjutan. Pendekatan layanan bergaransi digunakan untuk memodelkan sistem persediaan multi-eselon. *Risk pooling effect* dipertimbangkan di dalam model ini dengan menghubungkan permintaan pada *downstream nodes* ke *upstream nodes*. Untuk menyelesaikan problema MINLP yang dihasilkan secara efisien untuk kasus skala besar, sebuah pencarian fisibel tetangga yang didasarkan pada relaksasi Lagrange diusulkan.

Penelitian selanjutnya akan membahas integrasi perencanaan produksi berkelanjutan dan manajemen persediaan multi-eselon yang bersifat stokastik, karena aktivitas produksi sangat mempengaruhi lingkungan, waktu tunda, dan waktu layanan bergaransi pada pabrik harus merupakan variabel yang tergantung pada perencanaan produksi, meskipun dalam penelit Future work will address the integration of sustainability production plannian ini kami menganggap konsumsi energi sebagai parameter dengan nilai tetap.

**Referensi**

- [1] Bossert, J. M.; Willems, S. P., (2007) A periodic-review modeling approach for guaranteed service supply chains. *Interfaces*, 37 (5), 420-435.
- [2] Bowersox & Closs, D. J. (1997) *Logistics Management - the integrated supply chain process*, McGraw-Hill.
- [3] Campbell, A. M.; Clarke, L. W.; Savelsbergh, M. W. P., (2001) Inventory Routing in Practice. In *The Vehicle Routing Problem*, Toth, P.; Vigo, D., Eds. SIAM: Philadelphia, PA, USA, pp 309-330.
- [4] Chopra, S.; Meindl, P., (2003) *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Prentice Hall NJ.
- [5] Cooper, M. C. & Ellram, L. M. (1993) Characteristics of Supply Chain Management and the Implications for Purchasing and Logistics Strategy. *The International Journal of Logistics Management*, 4.
- [6] Daskin, M. S.; Coullard, C.; Shen, Z.-J. M., (2002) An inventory-location model: formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of Operations Research*, 110, 83-106.
- [7] De Vries, B. J. M., Van Vuuren, D. P. & Hoogwijk, M. M. (2007) Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach. *Energy Policy*, 2590-2610.
- [8] Dincer, I. (2000) Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 157-175.
- [9] Eppen, G., (1979) Effects of centralization on expected costs in a multi-echelon newsboy problem. *Management Science*, 25 (5), 498-501.
- [10] Ganeshan, R., Jack, E., Magazine, M. J. & Langkahhens, P. (1998) A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research. *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers.
- [11] Graves, S. C.; Willems, S. P., Optimizing strategic safety stock placement in supply chains. *Manufacturing & Service Operations Management* 2000, 2 (1), 68-83.
- [12] Graves, S. C.; Willems, S. P. (2003) Supply chain design: safety stock placement and supply chain configuration. In *Handbooks in Operations Research and Management Science*, de Kok, A. G.; Graves, S. C., Eds. Elsevier: North-Holland, Amsterdam, Vol. 11, pp 95-132.
- [13] Graves, S. C.; Willems, S. P., (2005) Optimizing the supply chain configuration for new products. *Management Science*, 51, (8), 1165-1180.
- [14] Grossmann, I. E., Enterprise-wide Optimization: A New Frontier in Process Systems Engineering. *AIChE Journal* 2005, 51, 1846-1857.
- [15] He, J., Liu, B. & Zhang, A. (2006) Analysis of the effect and potential of energy conservation in China. *Energy Policy*, 3702-3708.
- [16] Hübner, R., *Strategic Supply Chain Management in Process Industries: An Application to Specialty Chemicals Production Network Design*. Springer-Verlag: Heidelberg, 2007.
- [17] Hui, K. H., Spedding, T. A., Bainbridge, I. & Taplin, D. M. R. (Eds.) (2006) *Creating a Green Supply Chain: A Simulation and Modeling Approach*, Springer.
- [18] Humair, S.; Willems, S. P., (2006) Optimizing strategic safety stock placement in supply chains with clusters of commonality. *Operations Research*, 54, (4), 725-742.
- [19] Inderfurth, K., (1991) Safety Stock Optimization in Multi-Stage Inventory Systems. *International Journal of Production Economics*, 24, 103-113.
- [20] Inderfurth, K., (1993) Valuation of leadtime reduction in multi-stage production systems. In *Operations Research in Production Planning and Inventory Control.*, Fandel, G.; Gullledge, T.; Jones, A., Eds. Springer: Berlin, Germany, pp 413-427.
- [21] Inderfurth, K.; Minner, S., Safety stocks in multi-stage inventory systems under different service measures. *European Journal of Operations Research* 1998, 106, 57-73.
- [22] Jefferson, M. (2006) Sustainable energy development: performance and prospects. *Renewable Energy*, 571-582.
- [23] Kent, J. L. & Flint, D. J. (1997) Perspectives on the evolution of logistics thought. *J. of Business Logistics*, 18.
- [24] Lamming, R. & Hampson, J. (1996) The environment as a supply chain management issue. *British Journal of Management*, 7, S45.
- [25] Langley Jr., C. J. (1992) The evolution of the logistics concept. IN CHRISTOPHER, M.(Ed.) *Logistics: the strategic issues*.

- [26] Lim, H. W. & Cooper, K. (1999) The health impact of solar radiation and prevention strategies. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 41, 81-99.
- [27] Lin, J. (2007) Energy conservation investments: A comparison between China and the US *Energy Policy*, 916-924.
- [28] Linton, J. D., Klassen, R. & Jayaraman, V. (2007a) Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*.
- [29] Linton, J. D., Klassen, R. & Jayaraman, V. (2007b) Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*.
- [30] Longstreth, J., et.al. (1998) Health risks. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 20-39.
- [31] Markis, T. & Paravantis, J. A. (2007) Energy conservation in small enterprises. *Energy and Buildings*, 404-415.
- [32] Masters, J. M. & Pohlen, T. L. (1994) Evolution of the logistics profession. *The Logistics Handbook*. New York, Free Press.
- [33] Minner, S., (2001) Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains. *International Journal of Production Economics*, 71, 417-428.
- [34] Ozsen, L.; Daskin, M. S.; Coullard, C. R., Capacitated warehouse location model with risk pooling. In *Naval Research Logistics*, Accepted: 2006.
- [35] Ozsen, L.; Daskin, M. S.; Coullard, C. R., Location-inventory planning with risk pooling and multi-sourcing. In *Transportation Science*, Submitted: 2006.
- [36] Rao, P. & Holt, D. (2005) Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management*, 25, 898.
- [37] Savelsbergh, M.; Song, J.H., (2007) Inventory routing w/ continuous moves *Comp. & OR*, 34, (6), 1744-1763.
- [38] Shen, Z.-J. M.; Coullard, C.; Daskin, M. S., (2003) A joint location-inventory model. *Trans. Sci.*, 37, 40-55.
- [39] Sourirajan, K.; Ozsen, L.; Uzsoy, R., (2007) A single-product network design model with lead time and safety stock considerations. *IIE Transactions*, 39, 411-424.
- [40] You, F.; Grossmann, I. E., (2008) Mixed-Integer Nonlinear Programming Models and Algorithms for Large-Scale Supply Chain Design with Stochastic Inventory Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, (20), 7802.
- [41] You, F.; Grossmann, I. E., (2009) Balancing Responsiveness and Economics in the Design of Responsive Process Supply Chains with Multi-Echelon Stochastic Inventory.