

## BAB 3

### PERMASALAHAN PEMUATAN KARGO

#### 3.1 Definisi Permasalahan Pemuatan Kargo

Permasalahan Pemuatan Kargo (*Container Loading Problems*) dapat diartikan sebagai permasalahan penugasan geometris, dimana barang-barang kecil tiga-dimensi (yang disebut kargo) harus ditugaskan (disusun) ke dalam objek-objek segi empat yang besar (yang disebut kontainer) sedemikian sehingga fungsi tujuan yang diberikan dapat dioptimalkan dan dua syarat kelayakan geometris dasar terpenuhi, yakni:

1. Semua barang kecil sepenuhnya terletak di dalam kontainer
2. Barang-barang kecil tidak tumpang-tindih (*overlap*)

Deskripsi formal dari solusi untuk permasalahan penugasan jenis ini disebut pola pemuatan (*loading pattern*). Perlu diperhatikan bahwa objek yang besar bisa saja merupakan kontainer sebenarnya, tetapi, menurut definisi yang diberikan, objek besar tersebut juga bisa menjadi ruang pemuatan truk atau pallet yang dapat dimuat ke suatu ketinggian tertentu.

Menurut tipologi yang diperkenalkan oleh Wascher, Haubner & Schumann (2007), seseorang dapat membedakan antara permasalahan pemuatan

kontainer, di mana kontainer yang cukup tersedia untuk mengakomodasi semua barang-barang kecil, dan masalah tersebut, di mana hanya sebagian dari barang-barang kecil yang bisa dikemas karena ketersediaan kontainer yang terbatas. Permasalahan jenis pertama adalah jenis minimalisasi input (nilai), dan jenis kedua merupakan jenis maksimalisasi output (nilai). Jenis permasalahan minimalisasi input (nilai) adalah sebagai berikut:

1. *Single Stock-Size Cutting Stock Problem (SSSCSP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo yang tidak terlalu heterogen ke dalam sejumlah minimum kontainer yang sama;
2. *Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem (MSSCSP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo yang tidak terlalu heterogen ke dalam bermacam kontainer yang tidak terlalu homogen sedemikian sehingga nilai kontainer yang digunakan adalah minimum;
3. *Residual Cutting Stock Problem (RCSP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo yang tidak terlalu heterogen ke dalam bermacam kontainer yang sangat heterogen sedemikian sehingga nilai dari kontainer yang digunakan adalah minimum;
4. *Single Bin-Size Bin Packing Problem (SBSBPP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo yang sangat heterogen ke dalam sejumlah minimum kargo yang identik;
5. *Multiple Bin-Size Bin Packing Problem (MBSBPP)*, yaitu pengemasan

sehimpunan kargo yang sangat heterogen ke dalam bermacam kontainer yang tidak terlalu heterogen sedemikian sehingga nilai dari kontainer yang digunakan adalah minimum;

6. *Residual Bin Packing Problem (RBPP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo yang sangat heterogen ke dalam berbagai kontainer yang sangat heterogen sedemikian sehingga nilai dari kontainer yang digunakan adalah minimum;
7. *Open Dimension Problem (ODP)*, yaitu pengemasan sehimpunan kargo ke dalam satu kontainer tunggal dengan satu atau lebih dimensi variabel sedemikian sehingga volume kontainer adalah minimum.

Sebagai perluasan dari tipologi Wscher, Hauner & Schumann (2007), dengan mengacu kepada *Open Dimension Problem (ODP)* seseorang mungkin lebih jauh membedakan antara permasalahan dengan bermacam kargo yang tidak terlalu heterogen (*ODP/W*) dan bermacam kargo yang sangat heterogen (*ODP/S*). Jenis permasalahan maksimalisasi output (nilai) berikut dapat dibedakan menjadi:

1. *Identical Item Packing Problem (IIPP)*, yaitu pemuatan satu kontainer tunggal dengan sejumlah maksimum barang-barang kecil yang identik;
2. *Single Large Object Placement Problem (SLOPP)*, yaitu pemuatan satu kontainer tunggal dengan penyortiran dari sehimpunan kargo yang tidak

terlalu heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum;

3. *Multiple Identical Large Object Placement Problem (MILOPP)*, yaitu pemuatan sehimpunan kontainer yang identik dengan penyortiran dari sehimpunan kargo yang tidak terlalu heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum;

4. *Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem (MHLOPP)*, yaitu pemuatan sehimpunan kontainer yang tidak terlalu atau sangat heterogen dengan penyortiran dari sehimpunan kargo yang tidak terlalu heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum;

5. *Single Knapsack Problem (SKP)*, yaitu pemuatan satu kontainer tunggal dengan penyortiran dari sehimpunan kargo yang sangat heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum;

6. *Multiple Identical Knapsack Problem (MIKP)*, yaitu pemuatan sehimpunan kontainer yang identik dengan penyortiran dari sehimpunan kargo yang sangat heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum;

7. *Multiple Heterogeneous Knapsack Problem (MHKP)*, yaitu pemuatan sehimpunan kontainer yang tidak terlalu atau sangat heterogen dengan

penyortiran dari sehimpunan kargo yang sangat heterogen sedemikian sehingga nilai dari barang-barang yang dimuat adalah maksimum.

Perlu diperhatikan bahwa maksimalisasi output (nilai) setara dengan maksimalisasi pemanfaatan volume kontainer jika nilai barang-barang kecil sebanding dengan volume mereka. Mengacu pada definisi dari istilah "kargo" dan "kontainer" yang diberikan di atas, masalah pemuatan kontainer dianggap sini seluruhnya sebagai permasalahan tiga dimensi (3D) pemotongan dan pengepakan (Cutting & Packing/C & P).

Secara umum, barang-barang kecil bisa jadi memiliki jenis yang biasa (persegi panjang, bulat, dll.) atau bahkan bentuk yang tidak teratur. Namun, dengan beberapa pengecualian, publikasi di wilayah pemuatan kontainer yang berkaitan hanya dengan benda-benda kecil persegi panjang. Sebagaimana penggunaan bahasa yang umum dalam literatur, istilah kotak akan digunakan untuk menyatakan barang-barang yang demikian. Selanjutnya, akan diperlihatkan bahwa dengan mengacu pada masalah standar C & P itu sudah ter-sirat bahwa asumsi tertentu (misalnya mengenai fungsi tujuan, aneka kotak dan kontainer, dll.) dipenuhi untuk masalah pemuatan kontainer dalam pembahasan. Secara khusus, setiap kali kotak harus dimuat, akan diasumsikan - sesuai dengan literatur yang ada - hanya penempatan orthogonal yang diizinkan, yaitu permukaan kotak harus selaras dalam kesejajarannya dengan lantai dan dinding kontainer.

### 3.2 Kendala dalam Pemuatan Kontainer

Pada bagian ini akan diperkenalkan kendala praktis yang relevan yang dapat ditemui dalam permasalahan pemuatan kontainer dan akan diidentifikasi apakah dan bagaimana permasalahan itu dipertimbangkan dalam literatur. Akan dibedakan antara kendala yang terkait dengan objek yang besar (kendala terkait kontainer) dan yang berkaitan dengan barang-barang kecil, di mana yang terakhir bisa merujuk ke barang individu (kendala terkait barang) atau untuk seluruh himpunan atau bagian dari barang-barang (kendala terkait kargo). Selanjutnya, kendala-kendala dapat dikaitkan dengan hubungan antara benda-benda yang besar dan barang-barang yang kecil. Benda-benda yang besar dan barang-barang yang kecil itu diwujudkan dalam kendala posisi dari benda-benda kecil dalam kargo. Akhirnya, kendala-kendala mungkin terkait dengan hasil dari proses pengemasan, yaitu terhadap beban (kendala terkait beban).

Kendala dalam pemuatan kontainer dapat terjadi sebagai kendala keras atau lunak. Kendala-kendala keras harus dipenuhi; pola pemuatan yang melanggar kendala keras adalah tidak layak. Kendala yang lunak sebaiknya dipenuhi, namun pelanggaran akan kendala yang demikian dapat ditolerir - setidaknya dalam batas-batas tertentu.

### 3.2.1 Kendala Terkait Kontainer

#### 3.2.1.1 Batasan Berat

Biasanya, sebuah kontainer hanya dapat diisi dengan barang-barang kecil selama batasan berat tertentu tidak terlampaui. Kendala tersebut tidak selalu menjadi jelas (yaitu ketika sehimpunan barang kecil yang akan dikemas terdiri dari furnitur busa-karet), namun, kendala kendala akan menjadi jelas setiap kali barang-barang berat harus dimuat. Dalam kasus tersebut, batasan berat mungkin tampak lebih ketat daripada kendala ruang yang ditetapkan oleh dimensi dari kontainer. Dalam literatur pemuatan kontainer, batasan berat menjadi perhatian oleh Egeblad dkk. (2010) dan Liu *et al.* (2011). Dalam semua kasus ini, batasan berat dianggap sebagai kendala keras. Batasan berat dapat dimodelkan secara langsung sebagai kendala knapsack linier, di mana jumlah dari berat barang yang dimuat harus lebih kecil dari atau sama dengan batas berat yang dikenakan pada kontainer. Dalam algoritma-algoritma bagi pemuatan kontainer, dimungkinkan untuk pengecekan sederhana dan cepat dari kelayakan solusi.

Perlu dicatat bahwa kendala berat mencerminkan masalah yang rutin dihadapi dalam publikasi yang bertujuan pada solusi integratif dari ekstensi permasalahan C & P, yaitu dari gabungan antara pemuatan kontainer dan permasalahan rute kendaraan (Gendreau et al 2006;. Tarantilis, Zachariadis & Kiranoudis 2009; Fuellerer et al 2010; Iori & Martello 2010; Bortfeldt 2011).

Sehimpunan kargo, yang mana setiap barang - selain dimensi geometrisnya - ditandai dengan berat, disediakan di depot pusat dan harus disampaikan kepada pelanggan secara geografis. Barang-barang tersebut harus diangkut oleh sehimpunan kendaraan, biasanya diasumsikan homogen dan diberi ketetapan berat tertentu sebagai daya angkut (batasan berat), yang juga tersedia di depot. Tujuan dari permasalahan yang diperluas tersebut terdiri menemukan satu set rute yang meminimalkan total jarak yang ditempuh dan sehimpunan pola pembebanan yang bersesuaian yang layak tidak hanya berkenaan dengan ruang tetapi juga mengacu pada berat kapasitas angkut masing-masing kendaraan.

Dereli & Das (2010) membahas permasalahan di mana kapasitas muatan kontainer terbatas dalam volume dan berat. Namun, terlepas dari sasaran pemanfaatan volume kontainer maksimal saja, mereka juga mencoba untuk memuat kontainer dengan muatan berat maksimal. Hal ini menyebabkan masalah optimasi dengan dua fungsi objektif, untuk mana mereka mengajukan sebuah formulasi pemrograman tujuan (*goal-programming*).

### 3.2.1.2 Kendala Distribusi Berat

Kendala distribusi berat yang disebut juga dengan kendala keseimbangan beban load balance constraints, (lihat Bortfeldt & Gehring 2001) mengharuskan berat kargo tersebar semerata mungkin di lantai kontainer. Muatan yang seimbang mengurangi risiko bahwa pergeseran kargo saat kontainer terse-



but akan dipindahkan. Beban tidak seimbang dapat mengakibatkan tidak dapat diterima, distribusi yang tidak merata dari beban gardan saat kontainer diangkut dengan truk. Operasi penanganan tertentu (misalnya operasi mengangkat diterapkan kontainer) bahkan bisa jadi mustahil sepenuhnya (Bischoff & Ratcliff, 1995). Dalam literatur, untuk mencapai pemerataan berat badan, seseorang mungkin menuntut agar pusat gravitasi dari beban dekat dengan geometri titik tengah dari lantai kontainer (lihat Balakirsky et al 2010) atau tidak boleh melebihi jarak tertentu (Liu et al 2011). Dengan kata lain, kendala distribusi berat mewakili kendala lunak.

Eley (2002) hanya mengacu pada distribusi berat sepanjang kontainer, yaitu - menurut definisi hanya dimensi kontainer terbesar. Demikian pula, Chen, Lee & Shen (1995) memperkenalkan model optimasi mixed integer (linear) untuk semua jenis masalah input minimalisasi dan output maksimalisasi dan menunjukkan, bagaimana kendala keseimbangan muatan satu dimensi dapat diintegrasikan ke dalam model ini. Seperti pandangan satu dimensi tampaknya dibenarkan dengan aplikasi tertentu, misalnya, dalam pemuatan pesawat, di mana - mengingat profil dari lambung pesawat - keseimbangan longitudinal (memanjang) jauh lebih signifikan dari keseimbangan lateral (Davies & Bischoff, 1999). Meskipun dengan aplikasi lain, itu dapat memberikan hasil yang tidak dapat diterima. Balakirsky dkk. (2010) dan Liu *et al* (2011) memperhatikan distribusi berat di sepanjang ketinggian kontainer. Dalam semua kasus, penulis mengharuskan pusat gravitasi akan terletak

serendah mungkin. Oleh karena itu, barang-barang yang lebih berat harus disimpan di dekat bagian bawah kontainer sementara barang-barang yang lebih ringan harus dikemas pada tingkat yang lebih tinggi.

### **3.2.2 Kendala Terkait Barang**

#### **3.2.2.1 Prioritas Pemuatan**

Jenis kendala yang dibahas dalam bagian ini hanya mungkin timbul dalam hubungannya dengan permasalahan pemuatan jenis maksimalisasi nilai *output*. Karena ruang kontainer yang tersedia tidak cukup untuk menampung semua barang-barang kecil, harus diputuskan barang mana yang harus dimuat dan barang mana yang harus ditinggalkan. Dalam prakteknya, pemuatan beberapa barang mungkin lebih diinginkan daripada pemuatan lain, yaitu prioritas pemuatan yang disebut juga prioritas pengiriman (Bischoff & Ratcliff, 1995) ada untuk barang-barang tersebut. Prioritas yang demikian dapat mengakibatkan, misalnya, dari tenggat waktu pengiriman atau dari persyaratan yang berhubungan dengan kesegaran atau masa kadaluwarsa produk.

Biasanya, sebagian dari barang yang harus dimuat menimbulkan kendala keras. Barang-barang lainnya yang harus dimuat, hanya menimbulkan kendala lunak. Barang-barang yang terakhir dapat dibedakan lebih lanjut kepada kelas prioritas yang berbeda. Prioritas tersebut mungkin mencerminkan suatu kondisi di mana ada barang dari prioritas yang lebih rendah harus dikirim jika memerlukan barang dari prioritas yang lebih tinggi akan tertinggal (pri-

oritas mutlak), atau barang-barang tersebut mungkin hanya mewakili nilai dari menempatkan barang dalam kontainer sebagai ganti yang lain (prioritas relatif) (Bischoff & Ratcliff, 1995).

Meskipun prioritas pemuatan kadang-kadang dicirikan sebagai kendala penting (lihat, misalnya, Junqueira, Morabito & Yamashita 2012), mereka hampir tidak pernah secara eksplisit dipertimbangkan dalam desain algoritma untuk pemuatan kontainer. Ren, Tian & Sawaragi (2011) memperkenalkan algoritma untuk masalah jenis *SLOPP* dan *SKP*. Barang-barang memiliki prioritas (mutlak) rendah dan tinggi.

Pemanfaatan volume kontainer harus dimaksimalkan di bawah kendala tambahan yang semua prioritas tinggi dimuat, yaitu prioritas pemuatan keras diperhatikan. Bortfeldt & Gehring (1999) mengusulkan algoritma genetika untuk masalah dari *SKP* dan jenis *SLOPP* yang memungkinkan untuk kedua prioritas pemuatan lunak dan keras. Ada dua kelas prioritas, yaitu setiap kotak memiliki prioritas rendah atau tinggi. Jika prioritas pemuatan keras ada untuk beberapa kotak, kotak prioritas rendah tidak harus disertakan dalam pola pemuatan kecuali semua kotak prioritas tinggi telah ditampung. Prioritas lunak, yaitu masuknya kotak prioritas rendah dalam pola pemuatan, ditangani dengan cara mengatur fungsi tujuan. Bischoff & Ratcliff (1995) menyebutkan bahwa kasus prioritas relatif bisa ditangani oleh penyesuaian koefisien dalam fungsi tujuan. Namun, mereka tidak memperkenalkan algoritma yang sesuai.

### 3.2.2.2 Kendala Orientasi

Pada prinsipnya, setiap dimensi dari kotak dapat berfungsi sebagai tinggi, sehingga menimbulkan tiga orientasi vertikal. Dengan memilih dimensi tertentu sebagai tinggi, orientasi vertikal kotak didefinisikan. Kemudian, mengingat bahwa hanya pola pemuatan orthogonal yang diizinkan, kotak dapat selaras secara horizontal ke dinding kontainer melalui dua orientasi horisontal. Dengan kata lain, enam orientasi eksis menurut mana kotak (persegi panjang) dapat ditempatkan ortogonal ke dalam kontainer. Dalam prakteknya, bagaimanapun, jumlah yang dapat diterima dari orientasi kotak dapat dibatasi baik dalam arah vertikal maupun dalam arah horisontal.

Kendala orientasi umumnya membatasi orientasi vertikal kotak untuk satu dimensi atau dua (dari tiga) dimensi (misalnya, dalam kasus kotak panjang tapi rendah dan sempit yang tidak harus ditempatkan di permukaan terkecil). Juga kekuatan bantalan-muatan dari kotak tergantung pada orientasi vertikal. Akibatnya, tidak semua orientasi vertikal mungkin dapat digunakan ketika kontainer sedang dimuat. Bahkan mungkin mungkin bahwa orientasi tertentu mungkin pada tingkat beban yang lebih tinggi (lapisan) yang tidak diizinkan pada yang lebih rendah. Kendala orientasi vertikal diperkenalkan untuk mencegah barang dan kemasan tidak rusak atau dalam rangka untuk menjamin stabilitas muatan. Selain kendala tersebut yang membatasi orientasi vertikal kotak, juga kendala mungkin aktif yang membatasi orientasi horizontal kotak. Sebagai contoh, Bischoff & Ratcliff (1995) menyebutkan pallet (masuk

dua-arah) yang harus dimuat oleh sebuah truk dan hanya dapat didekati dari dua sisi, "depan" dan "belakang" . Kendala orientasi merupakan jenis kendala yang paling sering dibahas dalam literatur. Lima kasus berikut dapat dibedakan (termasuk kasus bebas-kendala):

- Kasus 1: Hanya orientasi tunggal diijinkan untuk setiap kotak (tipe) di kedua arah vertikal dan horisontal, yaitu kotak tidak bisa diputar (misalnya Amossen & Pisinger 2010; Junqueira et al. 2012). Asumsi ini dapat terkait, misalnya, untuk kasus praktis yang relevan yang kontainer harus dimuat dengan (tiga dimensi) palet yang hanya dapat didekati oleh pengangkat dari sisi tertentu (dan sisi sebaliknya).
- Kasus 2: Hanya orientasi vertikal tunggal yang diijinkan untuk setiap kotak (tipe) sementara tidak ada pembatasan yang diberikan sehubungan dengan arah horisontal (misalnya, Fuellerer dkk. 2010; Tarantilis, Zachariades & Kiranoudis 2009; Iori & Martello 2010). Karena hanya pola pemuatan orthogonal biasanya dibolehkan jika kotak yang akan dimuat ke dalam kontainer persegi panjang, kendala ini praktis memungkinkan untuk 90 rotasi dari kotak pada bidang horizontal. Kendala semacam ini mencerminkan situasi di mana semua kotak hanya dapat diletakkan pada permukaan tertentu (dan pada permukaan yang berlawanan yang sesuai), misalnya ketika semua kotak ditandai.
- Kasus 3: Tidak ada batasan umum sehubungan dengan orientasi ko-

tak dalam arah vertikal. Namun, hingga dua orientasi vertikal dapat dilarang untuk setiap kotak (tipe). Pada arah horisontal, orientasi ini gratis, tetapi - karena keterbatasan pola orthogonal - kotak bisa diputar di langkah 90 (misalnya, He & Huang 2011). Pengaturan ini meliputi pengaturan (ii), tetapi juga memungkinkan untuk kotak diputar gratis dan bagi orang lain yang, misalnya dalam kasus kotak panjang tapi kecil dan sempit, tidak harus ditempatkan pada permukaan terkecil.

- Kasus 4: Tidak ada batasan umum sehubungan dengan orientasi kotak di kedua arah vertikal dan horisontal. Namun, hingga lima orientasi mungkin dilarang untuk setiap kotak (tipe). Kasus ini termasuk berbagai terbesar kendala orientasi yang berbeda (misalnya, Fanslau & Bortfeldt, 2010; Ceschia & Schaefer, 2011; Liu *et al* 2011; Ren, Tian & Sawaragi, 2011). Selain menetapkan (iii), juga kotak-non diputar (kasus 1) dapat ditangani.
- Kasus 5: Tidak ada kendala sehubungan dengan orientasi kotak, baik dalam maupun vertikal dalam orientasi horisontal. Semua kotak bebas diputar (misalnya Wang, Li & Levy 2008). Dibandingkan dengan pengaturan lain, yang satu ini menjamin tingkat terbesar kebebasan, yaitu ruang solusi terbesar. Kedua kendala orientasi vertikal dan horisontal diperlakukan sebagai kendala keras dalam literatur.

### 3.2.2.3 Kendala Penumpukan

Susun kendala disebut juga kendala beban (Junqueira, Morabito & Yamashita 2012) membatasi bagaimana kotak dapat ditempatkan di atas satu sama lain. Mereka muncul dari kekuatan beban terbatas kotak. Berapa banyak berat badan atau tekanan kotak dapat bertahan sebelum akan meledak tergantung - di tempat pertama - pada kekuatan dari kasus kotak, yang ditentukan oleh pembangunan kasus dan bahan yang digunakan. Namun, kekuatan pemikul beban belum tentu bisa hanya diukur dengan berat maksimum yang dapat diterapkan per satuan luas kotak pendukung. Sebaliknya, kekuatan beban sering ditentukan oleh kekuatan dinding samping kotak, sehingga menghancurkan tepi, yaitu berat atau massa yang akan menghancurkan kasus kotak bila diterapkan ke bawah ke tepi, dapat menjadi ukuran yang lebih tepat (Bischoff & Ratcliff, 1995).

Seperti telah disebutkan, kotak dapat memiliki beberapa orientasi vertikal yang dapat diterima, dan kekuatan beban yang mungkin berbeda dengan orientasi di mana ia ditempatkan di dalam kontainer (Ratcliff & Bischoff, 1998). Ini mungkin lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti isi kotak (misalnya kotak-benar penuh dengan isi padat seperti kayu umumnya memungkinkan untuk susun lebih tinggi dari kotak yang hanya tidak lengkap diisi dengan kurang isi padat), dan kondisi di mana kotak yang digunakan, termasuk kelembaban, durasi beban dan cara susun (penumpukan kolom atau penumpukan antar-penguncian). Kendala penumpukan biasanya diperkenalkan

untuk menghindari kerusakan kotak dan untuk melindungi barang dan kemasan.

Dalam literatur, kekuatan beban yang terbatas dari kotak dibahas dalam beberapa cara. Kerapuhan (*fragility*) dapat diartikan sebagai representasi sederhana dari kekuatan beban (Junqueira, Morabito & Yamashita, 2012), yaitu bahwa tidak ada tekanan harus dikenakan pada kotak, dan akibatnya, tidak ada kotak lain dapat ditempatkan di atas itu. Pendekatan ini dipilih oleh Bortfeldt & Gehring (1999, 2001) dan Gehring & Bortfeldt (1997, 2002). Dalam kasus pembatasan yang tidak ketat, kargo dapat dibagi menjadi himpunan bagian dari kotak rapuh dan kotak tak-rapuh. Kotak tak-rapuh hanya dapat ditempatkan pada yang tak-rapuh lainnya, tapi tidak pada yang rapuh, sementara kotak rapuh dapat diletakkan pada yang rapuh dan tak-rapuh lainnya (Tarantilis, Zachariades & Kiranoudis, 2009; Fuellerer *et al*, 2010).

Pendekatan lain terdiri dari pelarangan jenis kotak jenis *i* ditempatkan di atas jenis *j* lain (Sciomachen & Tanfani 2007), misalnya melarang kotak besar yang diletakkan pada yang lebih kecil. Demikian pula, jumlah kotak yang dapat ditumpuk di atas satu sama lain juga dapat dibatasi (Junqueira, Morabito & Yamashita 2012). Kendala yang terakhir jenis mungkin, misalnya, mewakili instruksi penumpukan yang tidak lebih dari ketinggian tertentu sering dijumpai dalam praktek (Bischoff 2006). Egeblad *et al* (2010) membutuhkan barang berat untuk ditempatkan di bawah yang ringan sementara Techanitisawad & Tangwiwatwong (2004) mengusulkan barang dengan kepa-



datan yang lebih tinggi untuk dikemas di bawah barang dengan kepadatan yang rendah.

Dalam pendekatan yang lebih umum, kekuatan beban yang terbatas dapat diwakili oleh tekanan maksimum (unit berat per satuan luas, misalnya  $\text{kg/m}^2$ ) yang dapat dikenakan pada kotak tertentu atau jenis kotak tanpa deformasi dan merusak isinya (Junqueira, Morabito & Yamashita 2012). Ukuran semacam ini, bagaimanapun, menunjukkan bahwa tekanan yang sama dapat diterapkan di mana saja pada permukaan atas kotak pendukung. Itu tidak mencerminkan fakta bahwa - karena konstruksi - kotak mungkin bisa menahan tekanan yang lebih tinggi di tepi daripada di pusat permukaan atasnya (Bischoff, 2006).

Selanjutnya, kekakuan permukaan atas kotak menentukan bagaimana berat kotak yang diletakkan di atas itu sebenarnya ditransmisikan. Jika permukaan atas kotak yang terletak di bawah terbuat dari bahan yang lembut (seperti karton), maka berat badan akan dikiriskan - kurang lebih hanya lurus ke bawah bidang kontak. Jika permukaan atas terdiri dari bahan yang sangat kaku (seperti piring logam) maka berat badan akan didistribusikan ke seluruh permukaan atas kotak pendukung (Bischoff 2006). Dalam pendekatan solusi kepada *SLOPP* untuk barang dengan kekuatan beban-bantalan yang terbatas, Bischoff (2006) khususnya menganggap kasus pertama, karena itu merupakan dampak kuat pada kotak di bawah ini. Sejauh ini hanya Bischoff (2006) dan Ceschia & Schaerf (2011) mempertimbangkan fakta (lihat di atas)

bahwa kekuatan menahan beban dari jenis kotak mungkin tergantung pada orientasi vertikal, yaitu mereka menentukan beban bantalan kekuatan secara terpisah untuk masing-masing jenis kotak dan setiap orientasi vertikal diterima.

### **3.2.3 Kendala Terkait Kargo**

#### **3.2.3.1 Kendala Pengiriman-Lengkap**

Permasalahan jenis maksimalisasi nilai (*output*) mensyaratkan kargo harus ditampung dalam cara terbaik, tetapi karena tidak tersedianya ruang kontainer yang cukup, beberapa barang mau tidak mau harus ditinggalkan. Dalam hal ini, sebagian tertentu dari barang yang akan dimuat sekarang dapat mewakili entitas fungsional atau administratif (Bischoff & Ratcliff, 1995). Jika salah satu dari sebagian barang dimuat, semua barang-barang lainnya dari bagian tersebut juga harus dimuat. Jika satu barang tidak dapat dimuat, tidak ada barang dari bagian tersebut yang akan dimuat sama sekali. Kendala pengiriman-lengkap tersebut ditemui, misalnya, ketika bagian dari perabot (unit dapur, *built-in* lemari, dll.) yang dikemas secara terpisah dan harus dirakit di tempat pelanggan. Dalam hal demikian, pengiriman lengkap biasanya tidak diizinkan. Jelaslah bahwa kendala pengiriman-lengkap hanya bermakna bagi permasalahan jenis maksimalisasi output (nilai) dan pada umumnya merupakan kendala keras. Dengan demikian dua kasus dapat dibedakan: dalam kasus pertama, jika setidaknya satu barang dari kargo bagian masing-

masing dimuat, itu sudah cukup bahwa semua barang yang termasuk dalam pengiriman, bagaimanapun, tidak harus dalam kontainer yang sama. Dalam kasus kedua, semua barang dari bagian berurutan harus dimuat ke dalam kontainer yang sama. Kendala pengiriman-lengkap sangat jarang dibahas dalam literatur. Eley (2003) memperhatikan *MHLOPP* dan mengidentifikasi varian berikut sehubungan dengan bagian kargo yang baik harus dimuat sepenuhnya atau harus ditinggalkan secara total: (i) Terdapat bagian kargo tunggal semacam ini, dan semua kotak adalah dari jenis yang sama. (ii) Ada ada kargo bagian tunggal, tetapi kotak mungkin dari berbagai jenis. (iii) Terdapat beberapa bagian kargo tersebut, tetapi masing-masing bagian mewakili diberikan, banyak ukuran identik tipe kotak tunggal. (iv) Terdapat beberapa bagian kargo yang demikian, tetapi masing-masing bagian mewakili kombinasi identik beberapa jenis kotak.

### 3.2.3.2 Kendala Alokasi

Kendala alokasi timbul hanya dalam permasalahan pemuatan kontainer multiple. Di satu sisi, mereka mungkin meminta barang dari bagian tertentu harus masuk ke dalam kontainer yang sama (kendala konektivitas; Liu *et al* (2011), misalnya ketika mereka akan dikirim ke tujuan yang sama atau ketika mereka pergi ke seorang pelanggan yang ingin menerima semua barang pesanan sebagai konsinyasi tunggal dan bukan sebagai konsinyasi di bagian. Di sisi lain, kendala alokasi mungkin ada yang menuntut barang-barang tertentu atau kelas barang tidak sedang dimuat ke dalam kontainer yang sama (kendala

pemisahan). Biasanya, makanan dan wewangian tidak harus dimuat bersama dalam satu kontainer (Eley, 2003).

Sebagian dari penelitian yang membahas kendala alokasi ini mengacu pada kendala konektivitas. Permasalahan SSSCSP ditemui pada pemuatan palet manual (tiga dimensi), yang melibatkan kendala jenis ini, diteliti oleh Terno *et al* (2000). Untuk menghemat waktu operasi bongkar/muat, bila memungkinkan palet harus dimuat dengan barang dari satu jenis saja, yaitu ketika barang jenis ini cukup tersedia sehingga palet bisa diisi sepenuhnya. Jika tidak cukup barang dari jenis tertentu yang tersedia, maka barang-barang tersebut harus dimuat pada palet yang sama, kecuali jumlah palet yang diperlukan dapat dikurangi jika barang dibagi antara mereka. Dalam hal itu, bagaimanapun, barang dari jenis tertentu harus didistribusikan di sebagai beberapa palet mungkin. Untuk alasan yang sama, Liu *et al* (2011) memerlukan kotak identik dimuat bersama-sama dalam masalah pemuatan kontainer dari *SKP* dan *SLOPP* jenis. Tsai, Malstrm & Kuo (1993), berbeda dengan Terno *et al* (2000), yang melihat ke dalam permasalahan pememuatan palet tiga dimensi jenis *SLOPP* dalam distribusi, di mana pemuatan palet dengan jenis barang yang berbeda tunggal atau sangat sedikit saja tidak begitu diinginkan.

Algoritma yang mereka usulkan menghasilkan solusi di mana hubungan jumlah kotak dari jenis tertentu (atau beberapa tipe tertentu) untuk jumlah kotak sedekat mungkin dengan spesifikasi yang disediakan oleh pengguna algoritma. Para penulis menunjukkan bahwa pemenuhan kendala proporsi kotak

selalu bertentangan dengan memaksimalkan pemanfaatan volume palet dan dapat menyebabkan solusi yang buruk sehubungan dengan tujuan yang terakhir (Tsai, Malstrm & Kuo, 1993). Dalam tiga publikasi tersebut, kendala alokasi diperlakukan sebagai kendala yang lunak.

Kendala alokasi juga merupakan fitur standar dalam publikasi-publikasi yang memperhatikan gabungan permasalahan pemuatan kontainer dan permasalahan rute kendaraan dimana kendala-kendala alokasi tersebut dianggap sebagai kendala keras. Kendala jenis ini diperhitungkan dalam penelitian oleh Gendreau dkk. (2006), Moura & Oliveira (2009), Tarantilis, Zachariadis & Kiranoudis (2009), Fuellerer dkk. (2010) dan Iori & Martello (2010). Eley (2003) mengusulkan dan mengevaluasi sebuah heuristik sederhana untuk permasalahan pemuatan kontainer yang melibatkan kendala yang demikian.

### 3.2.3.3 Kendala Penempatan

Kendala penempatan membatasi lokasi barang dalam kontainer, baik secara absolut (yaitu di mana barang yang ditempatkan atau tidak berada di dalam kontainer) atau secara relatif (yaitu di mana barang yang ditempatkan atau tidak akan berada relatif satu sama lain). Dalam literatur, kendala-kendala yang demikian ini dianggap sebagai kendala keras atau juga kendala lunak.

Terdapat kajian terkait dengan kendala penempatan mutlak yang menuntut barang-barang tertentu yang ditempatkan (atau tidak untuk ditempatkan)

pada posisi tertentu atau di daerah tertentu dari kontainer. Kendala seperti ini biasanya dikenakan oleh ukuran, berat atau isi dari barang. Misalnya, barang berukuran besar seringkali hanya dapat dimuat/dikeluarkan jika terletak di sebelah pintu kontainer. Hodgson (1982) memperkenalkan permasalahan pemuatan palet tiga dimensi di mana pemuatan dimulai dengan memilih kotak besar dan menempatkannya di sudut palet. Lebih lanjut ia menyebutkan kasus untuk cairan yang mudah menguap atau bahan peledak harus dikemas di pinggiran palet sehingga mereka dapat dimasukkan dan dikeluarkan dengan cepat jika diperlukan.

Haessler & Talbot (1990) menjelaskan masalah di mana truk penjepit digunakan untuk pemuatan railcar. Karena manuver terbatas dari truk tersebut, pintu merupakan daerah yang paling sulit untuk memuat, barang-barang berat atau besar tidak harus dimuat. Bortfeldt & Gehring (1999) membagi kontainer (tunggal) menjadi zona yang berbeda (pintu, bawah, dll.) dan membatasi wilayah yang dapat diterima dari beberapa jenis kotak ke salah satu zona ini. Egeblad, Nielsen & Odgaard (2007) mengusulkan pencarian persekitaran untuk permasalahan bersarang (nesting problem) 2D dan 3D di mana objek besar dapat dibagi menjadi daerah-daerah yang berkualitas. Penugasan dari barang-barang kecil terbatas pada daerah-daerah kualitas yang sesuai dari objek besar dalam rangka untuk memastikan bahwa persyaratan kualitas mereka terpenuhi.

Kendala penempatan relatif diteliti dalam Makarem & Haraty (2010) dan Egeblad *et al* (2010). Di satu sisi, mereka mungkin memerlukan bagian tertentu dari barang yang ditempatkan berdekatan dalam kontainer, atau, setidaknya, terletak dalam jarak tertentu satu sama lain (juga disebut pengelompokan kendala; Bischoff & Ratcliff 1995.). Ini biasanya terjadi jika himpunan bagian kargo dapat diidentifikasi yang setiapnya harus dikirimkan ke pelanggan tertentu. Menempatkan barang dari pelanggan secara berdekatan bersama-sama akan - selama operasi bongkar/muat - memfasilitasi pemeriksaan apakah pesanan selesai dan mengurangi jumlah kesalahan (Haessler & Talbot 1990). Kendala penempatan relatif, di sisi lain, juga dapat meminta (bagian dari) barang tertentu tidak ditempatkan berdekatan atau dalam jarak dekat satu sama lain. Sekali lagi, barang yang akan mempengaruhi setiap kualitas orang lain dengan cara yang negatif (seperti makanan dan bensin) tidak harus ditempatkan berdampingan satu sama lain.

Situasi banyak pembongkaran (multi-drop) yang diajukan Bischoff & Ratcliff (1995) menghasilkan kombinasi kendala penempatan mutlak dan relatif. Kendala-kendala tersebut dicirikan oleh fakta bahwa himpunan bagian dari barang dikirim ke pelanggan yang berbeda. Barang dari setiap bagian tidak hanya harus berada berdekatan satu sama lain, tetapi susunan himpunan bagian dalam kontainer juga harus mencerminkan urutan sesuai dengan yang mereka harus kirimkan ke berbagai tujuan untuk menghindari pembongkaran yang tidak perlu dan operasi pemuatan ulang. Sebagian besar publikasi men-

ganggap kendala ini sebagai kendala keras (misalnya, Ceschia & Schaerf 2011).

Dalam algoritma yang diusulkan oleh Lai, Xue & Xu (1998), kontainer di-partisi menjadi bagian-bagian memanjang, dan kargo ditugaskan untuk bagian ini dalam urutan terbalik dari urutan di mana pelanggan yang dikunjungi nanti. Jin, Ohno & Du (2004) memperkenalkan masalah pemuatan kontainer ditemui di perusahaan yang menyediakan jasa pengiriman ke rumah-rumah. Permasalahan yang dipertimbangkan adalah dari jenis SLOPP dan termasuk situasi multi-drop di mana semuanya bisa dikirimkan ke pelanggan yang berbeda. Kemudian, Liu, Lin & Yu (2011) mempertimbangkan kembali situasi *multi-drop* seperti ini untuk masalah dari jenis *SKP*.

Publikasi yang mengkaji gabungan permasalahan pemuatan kontainer dan rute kendaraan biasanya memperkenalkan kondisi *multi-drop* khusus yang bertujuan untuk memfasilitasi operasi pembongkaran. Kondisi ini mengharuskan pada setiap pemberhentian barang yang diminta harus tersedia tanpa perlu menata ulang yang lain. Kondisi ini dipenuhi jika barang dimuat ke dalam kontainer (ruang pemuatan truk) menurut kebijakan bongkar/muat *LIFO* (*Last-In-First-Out*) yang disebut juga dengan kebijakan pemuatan berurutan atau kebijakan pemuatan belakang. Secara khusus, jika tujuan suatu barang  $i$  harus dikunjungi sebelum tujuan barang kedua  $j$ , maka  $j$  tidak harus ditempatkan di atas  $i$  atau di antara pintu kontainer dan  $i$  (Fuellerer *et al* 2010). Dalam hal demikian, pada setiap titik penurunan (*drop-off*), barang-barang yang berurutan dapat ditarik satu per satu dari kontainer dengan urutan ger-



akan maju (satu per barang) menuju pintu kontainer (Gendreau *et al* 2006; Tarantilis, Zachariadis & Kiranoudis 2009; Iori & Martello 2010).

### 3.2.4 Kendala Terkait Muatan

Kendala terkait muatan merujuk sifat-sifat yang diinginkan atau yang diperlukan dari pengaturan akhir barang dalam kontainer.

#### 3.2.4.1 Kendala Stabilitas

Dalam literatur, stabilitas muatan sering dianggap sebagai salah satu isu yang paling penting di luar pemanfaatan ruang kontainer (Parreno *et al*, 2010). Muatan yang tidak stabil dapat mengakibatkan kerusakan kargo dan bahkan mengakibatkan cedera pada personil selama transportasi dan/atau selama operasi bongkar/muat.

Meskipun signifikansinya tampak jelas, permasalahan stabilitas muatan sering tidak dianggap secara eksplisit dalam publikasi-publikasi yang memperhatikan pemuatan kontainer. Perlu diperhatikan bahwa stabilitas menjadi konsekuensi langsung dari kepadatan muatan terkait saat pemanfaatan ruang kontainer yang tinggi dapat dijamin (Parreno *et al*, 2010). Hal ini biasanya berlaku untuk permasalahan jenis maksimalisasi nilai *output* di mana hanya sebagian dari barang-barang kecil dapat dikemas karena ketersediaan kontainer yang terbatas. Praktis, stabilitas muatan juga dapat dicapai dengan dukungan tambahan atau penggunaan bahan pengisi (seperti potongan-potongan busa) yang disisipkan pada celah-celah kecil yang tersisa (Parreno *et al* 2010; Ege-

blad *et al* 2010). Secara khusus, dalam pemuatan palet (tiga dimensi), *foil* pematik digunakan untuk mencegah muatan agar tidak berantakan.

Sehubungan dengan stabilitas muatan, seseorang mungkin membedakan antara stabilitas vertikal dan horisontal. Stabilitas vertikal yang juga disebut sebagai stabilitas statis (de Castro Silva *et al* 2003) mencegah barang dari jatuh ke lantai kontainer atau di atas barang-barang lainnya. Ini berkaitan dengan situasi ketika kontainer tidak dipindahkan dan menggambarkan kapasitas muatan untuk menahan gaya gravitasi (Junqueira, Morabito & Yamashita 2012).

Permasalahan stabilitas vertikal biasanya didekati dengan menuntut bahwa alas kotak harus disokong (total atau sebagian) oleh lantai kontainer atau bahkan ruang pada tingkat ketinggian yang sama yang disediakan oleh permukaan atas kotak lainnya. Sokongan yang diperlukan mungkin harus diberikan kepada seluruh daerah alas (dukungan sepenuhnya misalnya, Ceschia & Schaerf 2011; Liu *et al* 2011; Ren, Tian & Sawaragi 2011; Goncalves & Resende, 2012). Atau, sokongan kotak diperlukan setidaknya untuk sebagian kecil minimal sebelum ditetapkan dari daerah alas (dukungan parsial misalnya Fuellerer *et al* 2010; Tarantilis, Zachariadis & Kiranoudis 2009). Dalam kasus terakhir, pola pemuatan dengan kotak yang menjorok diizinkan.

Hemminki, Leipl & Nevalainen (1989) menyatakan bahwa sokongan sebesar 70% sudah cukup untuk pemuatan palet dalam praktek jika palet yang dikemas dibungkus *foil* plastik sebelum pengiriman. Berbeda dengan pen-

dekatan ini, Techanitisawad & Tangwiwatwong (2004), untuk orientasi vertikal yang relevan diberikan dari sebuah kotak, menentukan persentase minimum untuk kedua dimensi panjang dan lebar yang harus dipenuhi terhadap sokongan yang diberikan ke alas setiap kotak.

Sebagai alternatif di samping menentukan tingkat aspirasi untuk daerah penyokong, dapat dituntut bahwa pusat gravitasi dari setiap kotak harus didukung oleh permukaan atas kotak lain atau lantai kontainer (misalnya Lin, Chang & Yang 2006). Mack, Bortfeldt & Gehring (2004) menunjukkan bahwa kondisi ini mungkin tidak cukup untuk menjamin muatan yang stabil ketika kotak yang menjerok dikemas secara bersamaan pada beberapa lapisan. Dalam hal ini, pusat gravitasi dari kotak mungkin didukung oleh kotak lain di bawah tetapi tidak (secara tidak langsung) oleh lantai kontainer.

Setiap kali sokongan 100% diperlukan, daerah penyokong secara implisit menuntut untuk terhubung. Dalam beberapa penelitian, daerah penyokong diperbolehkan untuk dilakukan oleh hanya satu kotak, yaitu kotak yang diletakkan di atas harus lebih kecil dari atau sama dengan yang di bawah di kedua dimensi dasar (misalnya Ceschia & Schaerf, 2011; Liu, Lin & Yu, 2011). Atau, daerah pendukung juga dapat terdiri dari bagian yang berbeda dan tak-terhubung sehingga kotak yang diletakkan di atas membentuk sebuah jembatan (misalnya de Castro Silva, Soma & Maculan, 2003). Beberapa pendekatan bahkan mengizinkan barang yang akan ditempatkan di atas daerah tak-terhubung menyokong daerah ketinggian yang berbeda (Egeblad *et*

al 2010).

De Castro Silva, Soma & Maculan (2003) mengasumsikan bahwa semua kotak memiliki kepadatan yang sama dan bahwa bobot kotak tersebut sebanding dengan volumenya. Dengan demikian, pusat gravitasi dan pusat geometris setiap kotak bertepatan. Kemudian, sehubungan dengan momen gaya dan putar, para peneliti merumuskan kondisi keseimbangan untuk lokasi pusat geometris yang merupakan muatan yang stabil secara vertikal. Pertimbangan tersebut digabungkan dalam sebuah algoritma heuristik untuk solusi dari masalah pemuatan kontainer dari jenis SBSBPP. Para peneliti menunjukkan bahwa beban mungkin tidak stabil bahkan jika pusat gravitasi dari setiap kotak didukung dari bawah. Dengan kata lain, dengan melonggarkan syarat sokongan kotak 100% dapat mengakibatkan pola pemuatan tidak stabil dan, karena itu, harus ditangani dengan hati-hati.

Stabilitas horisontal atau juga disebut dengan stabilitas dinamis menjamin bahwa barang tidak dapat bergeser secara signifikan saat kontainer dipindahkan (Bischoff & Ratcliff, 1995). Hal ini mengacu pada kapasitas barang untuk menahan inersianya (Junqueira, Morabito & Yamashita, 2012). Stabilitas horisontal penuh dapat dipandang sebagai pemastian apakah setiap barang dikemas adalah berdekatan (secara horisontal) dengan barang lain atau dinding kontainer. Dengan demikian, Bischoff & Ratcliff (1995) dan Eley (2002) mengevaluasi dukungan lateral muatan dengan persentase barang yang tidak bersentuhan dengan barang lain maupun dinding kontainer pada seti-

daknya tiga dari empat (sisi) permukaan. Liu *et al* (2011) hanya membutuhkan satu kotak (sisi) permukaan yang bersentuhan dengan barang lain atau dinding kontainer.

Dalam pemuatan palet (tiga dimensi), stabilitas horizontal muatan palet dapat ditingkatkan dengan saling mengunci (interlocking) berbagai lapisan kotak. Carpenter & Dowsland (1985) memperkenalkan tiga kriteria untuk mengukur tingkat interlock (lihat juga Bischoff 1991):

- Kriteria suportif, yaitu alas setiap kotak harus bersentuhan langsung dengan permukaan atas setidaknya dua kotak lainnya (atau palet) di bawahnya.
- Kriteria kontak alas, yaitu setidaknya persentase tertentu dari daerah alas setiap kotak harus didukung oleh lapisan (atau palet) di bawahnya.
- Kriteria non-guillotine, yaitu panjang jahitan (potongan *guillotine*) yang melalui tumpukan harus tidak melebihi persentase maksimum tertentu dari panjang maksimum tumpukan atau lebar.

Kotak-kotak yang saling mengunci, sesuai dengan kriteria ini, diuji dalam algoritma yang diusulkan oleh Jin, Ohno & Du (2004). Juga, prosedur pasca-proses khusus digunakan untuk membuat solusi yang dihasilkan sebelumnya lebih padat dan stabil. Penerapan seperti prosedur pemadatan (Bischoff 1991), yang menghilangkan kesenjangan yang tidak perlu antara barang, disarankan

untuk pemuatan kontainer oleh Parreno dkk. (2008, 2010) dan pemuatan palet tiga dimensi oleh Carpenter & Dowsland (1985) dan oleh Bischoff (1991).

Terlepas dari persentase kotak dengan sokongan lateral yang cukup, Bischoff & Ratcliff (1995) memperkenalkan ukuran lain untuk stabilitas horisontal, yaitu rata-rata jumlah kotak di mana barang-barang selain yang di lantai yang didukung. Kedua indeks stabilitas horisontal diterapkan dalam sejumlah besar penelitian, misalnya Bortfeldt & Gehring (2001), Eley (2002), Moura & Oliveira (2005), dan de Araujo & Armento (2007).

Parreno *et al* (2010) menyatakan bahwa tidak ada langkah-langkah stabilitas yang disebutkan secara eksklusif menjamin stabilitas muatan kontainer. Pola pemuatan yang stabil secara vertikal mungkin terbukti menjadi tidak stabil secara horizontal, misalnya jika solusi dibangun dengan cara menara kotak. Oleh karena itu, banyak peneliti menyimpulkan bahwa pola pemuatan harus diterima sehubungan dengan beberapa langkah stabilitas. Demikian juga, Terno *et al* (2000) menekankan bahwa pola pemuatan guillotineable dan pola struktur menara cenderung tidak stabil.

Perlu dicatat bahwa langkah-langkah stabilitas tidak hanya diterapkan pada pola pemuatan secara keseluruhan tetapi juga harus mempertimbangkan dinamika stabilitas ketika kontainer sedang diturunkan di beberapa pemberhentian. Muatan yang awalnya stabil mungkin menjadi tidak stabil setelah bagian itu dibongkar. Kendala stabilitas mencerminkan relevansi yang tinggi

dari pertimbangan stabilitas dalam pemuatan kontainer.

#### 3.2.4.2 Kendala Kompleksitas

Pola pemuatan yang kompleks, di satu sisi, mungkin tidak dapat diterima untuk panduan pemuatan kontainer karena pola tersebut tidak selalu dapat divisualisasikan dengan cara yang dapat dipahami dengan baik oleh personil pemuat dan pelaksanaannya mungkin terlalu memakan waktu. Di sisi lain, mekanisme dan teknologi pengemasan/pemuatan otomatis yang lebih maju tidak selalu cocok untuk pengaturan kargo yang kompleks dan mungkin memerlukan keterlibatan tambahan, yaitu biaya tenaga kerja. Kendala kompleksitas mencerminkan keterbatasan seperti teknologi dan sumber daya manusia (Bischoff & Ratcliff 1995). Kendala-kendala yang demikian ini umumnya diperlakukan sebagai kendala keras. Carpenter & Dowsland (1985) merujuk pada situasi di mana - selama operasi bongkar/muat - kargo dipindahkan dalam bentuk tumpukan oleh truk penjepit. Agar "*clampable*", tumpukan harus memiliki minimal dua wajah datar sempurna yang berlawanan satu sama lain dan setidaknya persentase tertentu dari panjang semua kotak tepi sejajar dengan bidang yang menjepit harus bersentuhan dengan kotak lainnya (kriteria *clampability*).

Kendala kompleksitas yang paling sering diperhatikan adalah kendala guillotine cutting yang dilihat dari perspektif pemuatan. Sebuah pola guillotine (lebih tepatnya, pola guillotineable atau pola guillotine-cuttable) meru-

pakan jenis pola pemuatan yang dapat dijelaskan dan dikemas dengan mudah. Sebuah pola pemuatan dikatakan *guillotineable*, jika dapat diperoleh dengan serangkaian "pemotongan" secara paralel dengan wajah kontainer. Meskipun demikian, pola *guillotine* tidak secara luas dibahas dalam literatur pemuatan kontainer. Pengecualian diberikan oleh Arenales & Morabito (1994), yang menyajikan pendekatan grafik "dan/atau" untuk masalah dari jenis *SLOPP*, dan oleh Hifi (2002), yang memperkenalkan sebuah algoritma perkiraan untuk masalah dari *SSSCSP* dan jenis *MILOPP*.

Egeblad & Pisinger (2009) menggambarkan heuristik pencarian lokal untuk masalah dari jenis *SKP* yang berkinerja baik untuk contoh ukuran sedang. Untuk jenis masalah yang sama, Amossen & Pisinger (2010) menyajikan algoritma yang konstruktif berdasarkan pemrograman kendala. Penelitian tentang pemotongan tiga dimensi yang mungkin cocok untuk penurunan pola pemuatan kontainer *guillotineable* termasuk yang dari Hifi (2004).

Pola *guillotinable* tidak selalu tepat dalam pemuatan kontainer dikarenakan masing-masing muatan cenderung agak tidak stabil saat dibawa. Secara khusus, pola tersebut sering tidak dapat diterima dalam aplikasi pemuatan palet yang akan membutuhkan operasi tambahan seperti *shrinkwrapping* atau *interlocking* untuk mengamankan muatan.

Pola *robot-packable* (Amossen & Pisinger, 2010) adalah pola yang dapat diimplementasikan dengan menempatkan kotak secara berturut-turut, mulai



dari sudut kiri di belakang kontainer dan menempatkan setiap kotak selanjutnya di depan, di sebelah kanan, atau di atas yang ditempatkan sebelumnya. Setiap pola guillotinable juga merupakan pola *robot-packable* tetapi tidak sebaliknya (lihat contoh di Martello *et al* 2007).

Pola *robot-packable* merujuk pada situasi di mana kotak yang dikemas oleh robot yang dilengkapi dengan tangan buatan sejajar dengan kontainer atau alas palet dan yang - dengan cara sel vakum - mampu mengangkat kotak dan melepaskannya pada posisi yang ditunjuk. Martello *et al* (2007) mengajukan sebuah algoritma untuk generasi pola *robot-packable* yang memecahkan permasalahan yang cukup besar dari jenis *SBSBPP* kepada solusi yang optimal.

## BAB 4

### BEBERAPA PENDEKATAN PEMODELAN DAN ALGORITMA

#### 4.1 Pendekatan Pemodelan

Model, khususnya model linear, integer dan/atau biner, memungkinkan untuk penerapan paket perangkat lunak standar (misalnya *CPLEX*); yang memfasilitasi penyediaan informasi tentang nilai-nilai fungsi tujuan yang optimal dan batas-batas yang sangat membantu untuk mengevaluasi kualitas solusi dari algoritma heuristik. Analisis struktur model tersebut juga mengungkapkan jalur untuk pengembangan teknik solusi yang canggih berdasarkan generasi kolom, *branch-and-bound*, *branch-and-cut*, dll. Karena pemodelan permasalahan pemuatan kontainer 3D harus dipastikan, penelitian tersebut masih sangat awal, khususnya sehubungan dengan masuknya kendala praktis yang relevan.

Pendekatan yang paling awal adalah pendekatan yang digunakan Tsai (1987). Ia menyediakan model untuk mengatur kotak dengan ukuran yang berbeda dalam tiga dimensi pada palet tanpa tumpang tindih, tetapi tidak termasuk kendala lanjut. Chen, Lee & Shen (1995) mengusulkan model bilangan bulat campuran linear (*linear mixed-integer model*) yang mencakup semua jenis masalah menengah atas yang terdaftar sebagai kasus khusus. Ukuran model yang sebenarnya (dalam hal jumlah variabel dan pembatasan) ditentukan oleh

jenis masalah masing-masing. Sebagai contoh mereka menunjukkan bagaimana kendala distribusi berat dan orientasi dapat dihadirkan. Eksperimen numerik terbatas pada penerapan *LINGO* untuk satu contoh masalah tunggal dengan enam kotak.

Padberg (2000) memperkenalkan model bilangan bulat campuran (*mixed-integer model*) untuk permasalahan kontainer 3D bebas kendala dari jenis *IIPP*, *SKP* dan *SLOPP*. Ia memperkirakan bahwa kasus permasalahan dengan 10 sampai 20 kotak dapat diselesaikan dalam waktu komputasi yang wajar dengan cara algoritma *branch-and-bound* standar. Secara signifikan contoh yang lebih besar dipecahkan dengan metode *branch-and-cut*. Namun, tidak ada hasil dari percobaan numerik yang dilaporkan. Moura & Oliveira (2009) mengembangkan model bilangan bulat campuran (*mixed-integer model*) dari gabungan permasalahan pemuatan kontainer dan rute kendaraan. Masalah ini, di satu sisi, berbeda dari Gendreau *et al* (2006) sehubungan dengan masuknya jendela waktu. Di sisi lain, lebih sedikit kendala pemuatan yang diperhatikan.

Junqueira, Morabito & Yamashita (2012) mengajukan model pemrograman linear 0-1 (*0-1 linear programming models*) yang meliputi kendala orientasi, kendala stabilitas (vertikal dan horizontal), dan kendala penumpukan. Permasalahan-permasalahan yang dipertimbangkan adalah permasalahan jenis *IIPP*, *SLOPP* dan *SKP*. Model yang diusulkan divalidasi dengan cara eksperimen numerik. Ini menjadi jelas, meskipun, bahwa hanya contoh permasalahan dengan ukuran menengah yang dapat ditangani oleh *problem solver* standar

(*GAMS/CPLEX*) yang digunakan dalam percobaan ini.

## 4.2 Algoritma Eksak dan Aproksimasi

Permasalahan *C & P* multi-dimensi tergolong permasalahan optimasi kombinatorial *NP-hard* (dalam arti yang kuat) yang berarti sangat sulit untuk dipecahkan - berbeda dengan, misalnya permasalahan knapsack satu dimensi. Akibatnya, hanya sedikit algoritma eksak yang ada.

Martello, Pisinger & Vigo (2000) dan den Boef *et al* (2005) mengusulkan algoritma *branch-and-bound* untuk *SKP* dan - berdasarkan algoritma ini - metode *branch-and-bound* untuk masalah *SBSBPP*. Orientasi semua barang diasumsikan tetap dan tidak ada kendala lain yang diperhatikan. Hasil penelitian memperlihatkan contoh permasalahan yang diselesaikan hingga 90 barang, meskipun hanya contoh hingga 20 barang yang bisa diselesaikan dengan optimal dalam jangka waktu tertentu dengan pasti.

Hifi (2004) memperkenalkan pencarian *depth-first* yang eksak dan algoritma pemrograman dinamis untuk memecahkan *SLOPP 3D* dalam konteks pemotongan (*cutting*). Orientasi kendala (dalam varian yang berbeda) dan kendala guillotine cutting diperhatikan. Jumlah kotak per jenis tidak terbatas. Dalam penelitian tersebut dilakukan pengujian dengan 64 contoh permasalahan termasuk hingga 50 barang dan diperoleh solusi optimal untuk sebagian besar contoh masalah, tapi tidak untuk semuanya.

Fekete, Schepers & van der Veen (2007) mengusulkan algoritma pencarian pohon dua tingkat (*two-level tree search algorithm*) untuk memecahkan permasalahan pengemasan dari berbagai jenis permasalahan dengan dimensi yang lebih tinggi. Pendekatan yang digunakan didasarkan pada karakterisasi teoritis grafik dari posisi relatif kotak dalam pola pemuatan layak. Lebih dari 70% dari 150 contoh yang diusulkan dari jenis SKP sampai dengan 80 barang dapat diselesaikan untuk optimalitas; Namun, hanya contoh dengan 20 barang selalu bisa diselesaikan tepat dalam batas waktu yang diberikan. Tidak ada hasil yang dilaporkan untuk jenis masalah lainnya.

Algoritma aproksimasi tidak selalu menghasilkan solusi yang optimal, tetapi menjamin kinerja tertentu, misalnya sehubungan dengan kualitas solusi [lihat Vazirani (2001) untuk rinciannya]. Algoritma semacam ini diperkenalkan oleh Bansal *et al* (2006) untuk permasalahan jenis *ODP/S*, dan oleh Miyazawa & Wakabayashi (2009) untuk permasalahan jenis *SSSBPP*. Awalnya, sebagian besar metode ini mengasumsikan orientasi barang yang tetap, sedangkan perkembangan kemudian (Miyazawa & Wakabayashi 2009) juga memungkinkan untuk barang dirotasi secara bebas. Kendala lain dari kendala orientasi belum dipertimbangkan dalam algoritma aproksimasi sejauh ini.

## BAB 5

### PEMODELAN DAN METODE SOLUSI

#### 5.1 Pemodelan

Operasi angkutan kargo udara pada umumnya menggunakan kontainer murni dan kontainer gabungan. Kontainer murni adalah paket yang akan dikirimkan ke tempat tujuan yang sama. Bila kontainer ini diangkut ke *hub* atau sentral, maka kontainer dapat ditransfer langsung (yang disebut *trans-loaded*) dari pesawat ke pesawat. Kontainer gabungan adalah paket yang akan dikirimkan ke tempat tujuan yang berbeda. Paket ini memerlukan proses sortir di *hub* atau sentral untuk memisahkan paket tertutup dan untuk memuatnya ke kontainer lain yang kemudian diangkut ke pesawat berbeda dan ke tujuan yang berbeda. Kedua jenis pemuatan kontainer memiliki dampak berbeda terhadap tempat asal atau gateway dan *hub* atau sentral. Proses sortir atau pemilihan paket harus dilakukan terhadap pemuatan kontainer murni di tempat asal dan untuk penanganan kontainer gabungan di *hub* atau sentral.

Untuk menentukan rencana pemuatan kontainer optimal yaitu mencakup volume permintaan yang akan dimuat dalam setiap kontainer murni/gabungan dan jumlah setiap jenis kontainer murni/gabungan yang perlu ditangani di tempat asal dan sentral, adalah sangat rumit, karena berhubungan dengan biaya dan faktor penghalang. Faktor tersebut meliputi; permintaan *OD* kargo,

konfigurasi kontainer, jumlah kontainer murni/gabungan yang perlu dimuat untuk setiap permintaan  $OD$ , kapasitas pesawat, kapasitas penanganan setiap gateway dan sentral, biaya penanganan setiap kontainer murni/gabungan di setiap gateway dan di sentral, jadwal penerbangan, perbandingan waktu airport yang tersedia dalam operasi yang dipengaruhi oleh jadwal penerbangan, dan berbagai faktor penghalang operasi terkait lainnya.

Selain gangguan stokastik atau faktor penghalang, dalam permintaan kargo, biasanya mempengaruhi keputusan rencana pemuatan kontainer. Sehingga, hampir tidak mungkin untuk mendapatkan solusi optimal tanpa analisis sistematis. Yan, *et al* (2008) dalam penelitiannya mengemukakan, dengan memperhatikan faktor penghalang atas permintaan kargo setiap hari yang terjadi dalam operasi sesungguhnya dari perspektif angkutan ekspres udara, dapat dikembangkan model rencana pemuatan kargo kontainer berdasarkan permintaan stokastik yang disebut *Stochastic Demand Cargo Container Loading Plan Model (SDCCLPM)*. Model ini dirumuskan sebagai program bilangan bulat tak-linier campuran sebagai berikut:

Minimumkan:

$$\sum_{\omega \in \Omega} \delta_{\omega} \left[ \begin{aligned} & \sum_j f_i(\rho_{ij}^b d_{ij}(\omega)/\forall j) + \sum_i \sum_j \sum_b c_b m_{ij}^b(\omega) \\ & + \sum_i g_i(\gamma_{ij}^b d_{ij}(\omega)/\forall j) + \sum_{ij \in OD} c_{ij} n_{ij}(\omega) \end{aligned} \right] \quad (5.1)$$

Dengan kendala:

$$\sum_b \rho_{ij}^b d_{ij}(\omega) + \gamma_{ij}^b d_{ij}(\omega) + n_{ij}(\omega) = d_{ij}(\omega), \forall ij \in OD, \forall \omega \in \Omega \quad (5.2)$$

$$\sum_j \sum_b \rho_{ij}^b d_{ij}(\omega) + \alpha_i \sum_j \gamma_{ij} d_{ij}(\omega) \leq u_i, \forall i \in SP, \forall \omega \in \Omega \quad (5.3)$$

$$\sum_i \beta \sum_j \gamma_{ij} d_{ij}(\omega) \leq s, \forall \omega \in \Omega \quad (5.4)$$

$$(\rho_{ijt}^b / v_b) d_{ij}(\omega) \leq m_{ij}^b(\omega), \forall ij \in OD, \forall b \in AC, \forall \omega \in \Omega \quad (5.5)$$

$$\sum_j m_{ij}^b(\omega) \leq p_b, \forall i \in SP, \forall b \in AC, \forall \omega \in \Omega \quad (5.6)$$

$$\sum_j \sum_b v_b m_{ij}^b(\omega) + \sum_j \gamma_{ij} d_{ij}(\omega) \leq \sum_b v_b p_b, \forall i \in SP, \forall \omega \in \Omega \quad (5.7)$$

$$\sum_j m_{ij}^b(\omega) \leq p_b, \forall j \in TP, \forall b \in AC, \forall \omega \in \Omega \quad (5.8)$$

$$\sum_i \sum_b v_b m_{ij}^b(\omega) + \sum_i \gamma_{ij} d_{ij}(\omega) \leq \sum_b v_b p_b, \forall j \in TP, \forall \omega \in \Omega \quad (5.9)$$

$$\sum_b \rho_{ij}^b + \gamma_{ij} \leq 1, \forall ij \in OD \quad (5.10)$$

$$0 \leq \rho_{ij}^b \leq 1, \forall ij \in OD, \forall b \in AC \quad (5.11)$$

$$0 \leq \gamma_{ij} \leq 1, \forall ij \in OD \quad (5.12)$$

$$n_{ij}(\omega) \geq 0, \forall ij \in OD, \forall \omega \in \Omega \quad (5.13)$$

$$m_{ij}^b(\omega) \geq 0, m_{ij}^b \in I, \forall ij \in OD, \forall b \in AC, \forall \omega \in \Omega \quad (5.14)$$

Variabel keputusan:

$\rho_{ij}^b$  : persentase permintaan dari  $i$  ke  $j$  yang akan dimuat ke dalam kontainer murni  $AMJ$  atau  $AKE$  ke- $b$

$\gamma_{ij}$  : persentase permintaan dari  $i$  ke  $j$  yang akan dimuat ke dalam kontainer gabungan

$m_{ij}^b(\omega)$  : jumlah kontainer murni  $AMJ$  atau  $AKE$  (dalam bilangan bulat) yang akan diangkut dari  $i$  ke  $j$  dalam skenario stokastik ke- $\omega$



$n_{ij}^b(\omega)$  : volume kontainer murni (dalam ekivalen *AMJ* yang dapat berupa bilangan riil yang akan diangkut dari *i* ke *j* dalam skenario stokastik ke- $\omega$ )

Notasi lainnya:

$\omega$  : skenario stokastik

$\Omega$  : himpunan semua skenario stokastik

$\delta_\omega$  : probabilitas untuk skenario ke- $\omega$

$d_{ij}(\omega)$  : volume permintaan (dalam ekivalen *AMJ* yang dapat berupa bilangan riil yang akan diangkut dari *i* ke *j* dalam skenario stokastik ke- $\omega$ )

*OD* : himpunan semua pasangan *OD*

$\alpha_i$  : ekivalen kontainer murni sepenuhnya untuk penanganan kontainer campuran pada asal *i*

$\beta_i$  : ekivalen kontainer murni sepenuhnya di *hub* untuk penanganan kontainer campuran yang dikirim dari asal *i*

*b* : jenis kontainer ke-*b* ( $b = 1$  untuk *AMJ* dan  $b = 2$  untuk *AKE*)

$u_i$  : kapasitas penanganan (ekivalen *AMJ* murni sepenuhnya) pada asal *i*

*s* : kapasitas penanganan (ekivalen *AMJ* murni sepenuhnya) pada *hub*

$P_b$  : kapasitas pemuatan pesawat untuk kontainer jenis *b*

- $v_b$  : ekivalen *AMJ* untuk kontainer jenis  $b$   
 $f_i()$  : fungsi biaya untuk penanganan kontainer murni dan gabungan  
 (ekivalen *AMJ*) pada tempat awal  $i$   
 $cb$  : biaya marjinal untuk suatu kontainer murni  
 $g_i()$  : fungsi biaya pada *hub* untuk penanganan kontainer gabungan  
 (ekivalen *AMJ*) yang dikirim dari *gateway- $i$*   
 $c_{ij}$  : biaya mengangkut volume kontainer *AMJ* oleh pihak ketiga  
 dari  $i$  ke  $j$   
 $SP$  : himpunan semua asal  
 $TP$  : himpunan semua tujuan  
 $AC$  : himpunan semua jenis kontainer

Tujuannya adalah meminimumkan total biaya penanganan kontainer pada sistem. Secara khusus, suku pertama dalam fungsi objektif adalah total biaya penanganan kontainer murni dan gabungan di tempat awal, suku kedua adalah total biaya penanganan kontainer murni di *hub*, suku ketiga adalah total biaya penanganan kontainer gabungan di *hub*, dan suku keempat adalah biaya transportasi volume kelimpahan oleh pihak ketiga terhadap semua pasangan *OD*.

Mengacu kepada model (5.1) sampai (5.14) di atas, dengan memperhatikan problema keputusan rantai pasokan logistik yang muncul dalam industri perikanan laut di Indonesia dimana produk yang mudah rusak seperti

ikan olahan, akan menjadi kesulitan tambahan untuk manajemen rantai pasokan logistik karena masa kadaluwarsa yang terbatas dan dengan diberikan tuntutan kargo, jadwal penerbangan, kapasitas pemuatan pesawat, kapasitas penanganan kontainer di setiap asal dan di *hub*, fungsi biaya penanganan kontainer di setiap gerbang dan di *hub*, biaya untuk mengangkut volume limbah oleh pihak ketiga, dan parameter-parameter lainnya, dikembangkan model pemrograman tak linier bilangan bulat campuran (*mixed integer nonlinear programming* [*MINLP*]) dan metode solusi dari perspektif operator ekspres udara.

### 5.1.1 Asumsi Pemodelan

Untuk merefleksikan realita secara logis dan memudahkan penyelesaian masalah, dibuat asumsi-asumsi berikut:

1. Semua permintaan *OD* kargo dalam sistem diberikan.
2. Permintaan *OD* kargo dalam sistem ini diketahui. Dengan kata lain, volume ekspor dan impor diberikan untuk setiap bandara.
3. Kelebihan angkut (*overflows*) oleh pihak ketiga. Sebagian besar volume ekspor dan impor sehari-hari baik di tempat asal atau di *hub*, sepenuhnya dapat diangkut oleh armada operator. Jika terjadi kelebihan angkut, dapat diangkut oleh pihak ketiga.
4. Armada pesawat diasumsikan dalam operasi angkutan udara.
5. Pelayanan penerbangan udara umum tidak disertakan. Laba jasa pener-

bangun udara ini jauh lebih rendah dibandingkan jasa penerbangan ekspres. Sehingga, prioritas utamanya lebih rendah. Karena jasa penerbangan udara tidak mempengaruhi keputusan rencana pemuatan kontainer ekspres, maka tidak disertakan dalam penelitian ini.

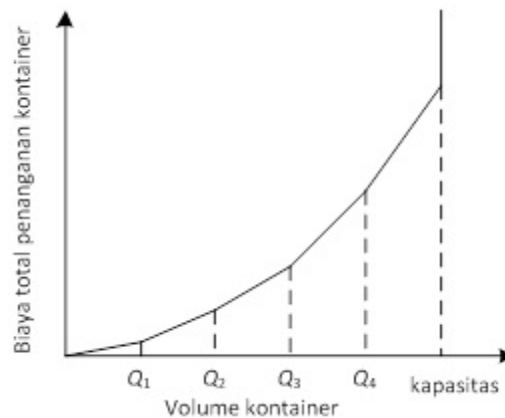
6. Penerbangan yang beroperasi antara gerbang dan *hub* adalah langsung. Penerbangan *one-stop* antara setiap gerbang dan *hub* jarang dipergunakan karena keterbatasan waktu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini diasumsikan bahwa semua penerbangan yang ditawarkan, adalah penerbangan langsung antara gerbang dan *hub*.
7. Dua jenis kontainer dipergunakan untuk pesawat Dua jenis kontainer, *AMJ* dan *AKE*. Kontainer *AMJ* dimuat ke dek utama dan kontainer *AKE* dimasukkan kedalam dek bawah. Dalam prakteknya, kontainer *AMJ* dapat memuat sekitar 3,77 kali jumlah paket yang dapat dimuat oleh kontainer *AKE*. Karena kapasitas pemuatan pesawat tetap, maka harus disertakan dalam rencana pemuatan kontainer, untuk mencegah pemuatan yang tidak layak. Misalnya, jika gerbang awal mengirimkan terlalu banyak kontainer *AMJ* murni ke *hub* untuk tujuan tertentu, maka jumlah total kontainer *AMJ* dapat melampaui kapasitas penerbangan, akan tetapi mungkin ada ruang tersisa dalam kontainer *AKE* pada dek bawah. Sehingga, di *hub* beberapa paket harus dipindahkan dari kontainer *AMJ* ke kontainer *AKE*, yang menimbulkan penanganan paket ganda.

8. Kontainer gabungan dapat menjadi ekivalen dengan rasio kontainer murni ditinjau dari efisiensi operasinya. Karena dalam praktek, efisiensi penanganan kontainer gabungan dan kontainer murni di setiap asal dan *hub* adalah berbeda. Untuk menyederhanakan pemodelan, digunakan ekivalensi dari kontainer murni yaitu, kontainer murni yang dimuat sepenuhnya untuk merepersentasikan kontainer gabungan. Ekivalensi ini menghasilkan rasio efisiensi operasi di tempat asal atau di *hub* untuk menangani kontainer gabungan relatif terhadap penanganan kontainer murni sepenuhnya. Rasio dapat berbeda di tempat asal atau di *hub*, karena keduanya dipengaruhi oleh perbedaan fasilitas bandara dan prosedur operasi. Misalnya, proses pemilahan diperlukan di tempat asal untuk mengasembling kontainer murni, tetapi tidak demikian untuk kontainer gabungan, sehingga rasio ini lebih kecil dari 1. Di sisi lain, rasio ini lebih besar dari 1 di *hub*, karena kontainer murni penuh memerlukan sumber daya lebih sedikit untuk transfer dari pesawat ke pesawat, tetapi diperlukan upaya lebih besar untuk memilah paket, dan untuk menangani kontainer gabungan.
9. Jadwal penerbangan diberikan untuk setiap operasi satu *hub*. Berdasarkan jadwal penerbangan ini, waktu yang tersedia untuk setiap penerbangan dari tempat asal, dapat ditentukan.
10. Sasaran model adalah untuk meminimumkan total biaya penanganan kontainer. Dalam prakteknya, operator bertujuan untuk menurunkan

biaya operasi penanganan kontainer di bandara, sehingga hal ini biasanya ditetapkan sebagai tujuan model.

11. Fungsi biaya penanganan kontainer dan kapasitas diberikan di setiap gerbang atau di *hub*.

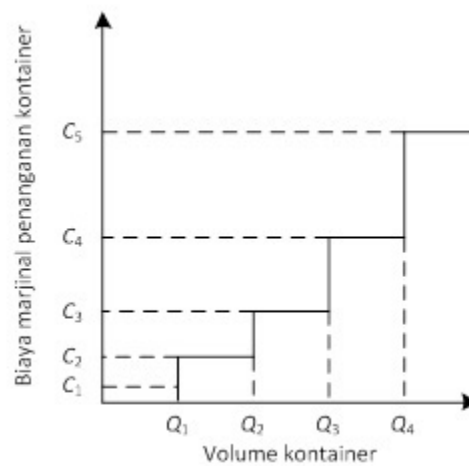
(a) Fungsi biaya penanganan kontainer di gerbang. Karena jendela waktu operasi yang tersedia adalah tetap untuk setiap *gateway*, maka tenaga kerja yang diperlukan akan meningkat bila volume kontainer meningkat. Dalam operasi sesungguhnya, fungsi biaya *gateway* dirumuskan sebagai fungsi *piece-wise* yang linier dan konveks.



Gambar 5.1 Fungsi biaya total penanganan kontainer pada sebuah *gateway*

Sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 5.1, jika volume kontainer melebihi  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  atau  $Q_4$ , maka tenaga kerja baru harus ditambahkan, yang membuat fungsi biaya bergerak naik. Karena volume lebih tinggi akan membuat proses pemilahan semakin rumit dan semakin banyak tenaga kerja diperlukan untuk memilah paket,

hal ini berarti tenaga kerja meningkat, yang membuat fungsi biaya menjadi cembung. Bila volume mencapai kapasitas penanganan, maka biaya akan mendekati tak terhingga. Biaya marginal penanganan (per kontainer) akan meningkat secara bertahap, sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Biaya marginal penanganan kontainer pada sebuah *gateway*

Jika volume penanganan lebih dari  $Q_1$ , maka biaya marginal penanganan kontainer akan melompat dari  $C_1$  ke  $C_2$ . Situasi yang sama terjadi pada  $Q_2$ ,  $Q_3$  dan  $Q_4$ . Biaya marginal penanganan mendekati tak terhingga, yakni bila volume penanganan kontainer mencapai kapasitas fasilitas.

- (b) Fungsi biaya penanganan kontainer di *hub*. Biaya penanganan kontainer murni dan gabungan di *hub* dibahas secara terpisah. Pertama, karena kontainer murni baik secara parsial maupun secara penuh (yakni, kontainer yang dimuat secara penuh atau sebagian),

ditransfer secara langsung dari pesawat ke pesawat, maka biaya marginal penanganan kontainer tidak berubah dengan volume kontainer. Biaya marginal konstan untuk penanganan kontainer murni baik secara penuh maupun secara parsial di *hub*. Kedua, biaya marginal penanganan kontainer gabungan di *hub* adalah berhubungan dengan volume kontainer dan waktu operasi yang tersedia untuk penerbangan. Dalam prakteknya, biaya marginal penanganan kontainer gabungan berhubungan dengan volume kontainer yang sama dengan biaya gerbang. Dengan adanya waktu operasi yang tersedia, maka biaya marginal penanganan akan meningkat. Akan tetapi, untuk volume kontainer, biaya marginal penanganan berhubungan dengan lama waktu yang tersedia yaitu jam operasi yang tersedia. Semakin banyak waktu yang tersedia, semakin kecil biaya marginal penanganan kontainer. Sebaliknya, biaya marginal penanganan kontainer akan mendekati nilai tak terhingga jika waktu operasi yang tersedia lebih kecil dari biaya minimum yang diperlukan. Waktu dikalkulasikan dari waktu kedatangan hingga keberangkatan pesawat yang mengangkut paket tertentu. Karena jam operasi penanganan kontainer gabungan yang tersedia mungkin berbeda untuk penerbangan yang berbeda, maka biaya marginal penanganan kontainer untuk volume kontainer yang sama, dapat pula berbeda.



Karena masalah logistik dalam penelitian ini melibatkan produk yang mudah rusak, maka pemodelan akan memasukkan periode waktu  $T$  yang mengandung  $\sigma_{max}$ , maksimum masa kadaluwarsa produk. Untuk merumuskan masalah, digunakan teknik pemrograman bilangan bulat.

### 5.1.2 Notasi yang Digunakan

Himpunan-himpunan:

$I$  : himpunan semua asal

$J$  : himpunan semua tujuan

$K$  : himpunan semua jenis kontainer

$T$  : periode waktu

Variabel-variabel keputusan:

$x_{ijt}^b$  : pecahan permintaan dari  $i$  ke  $j$  yang akan dimuat ke dalam kontainer murni jenis ke- $b$  ( $AMJ$  atau  $AKE$ ) dalam periode waktu  $T - \sigma_{maks}$

$y_{ijt}^b$  : pecahan permintaan dari  $i$  ke  $j$  yang akan dimuat ke dalam kontainer campuran dalam periode waktu  $T - \sigma_{maks}$

$z_{ij}^b$  : jumlah kontainer murni jenis ke- $b$  ( $AMJ$  atau  $AKE$ ) yang ditransportasikan dari  $i$  ke  $j$

$w_{ij}$  : volume kontainer (dalam kesetaraan  $AMJ$ ) yang ditransportasikan oleh pihak ketiga dari  $i$  ke  $j$

Parameter-parameter:

- $d_{ijt}$  : volume permintaan (dalam ekivalen *AMJ*) dari *i* ke *j* dalam periode waktu  $T - \sigma_{maks}$
- $\lambda_i$  : ekivalen kontainer murni sepenuhnya untuk penanganan kontainer campuran pada asal *i*
- $\mu_i$  : ekivalen kontainer murni sepenuhnya untuk penanganan kontainer campuran yang dikirimkan dai asal *i*
- $b$  : kontainer jenis ke-*b* ( $b = 1$  untuk *AMJ* dan  $b = 2$  untuk *AKE*)
- $u_i$  : kapasitas penanganan (ekivalen *AMJ* murni sepenuhnya) di asal *i*
- $s$  : kapasitas penanganan (ekivalen *AMJ* murni sepenuhnya) di *hub*
- $LC_b$  : kapasistas pemuatan pesawat untuk kontainer jenis ke-*b*
- $v_b$  : kivalen *AMJ* untuk kontainer jenis ke-*b*
- $A_i$  : biaya penanganan kontainer murni di asal *i*
- $B_i$  : biaya penanganan kontainer campuran di asal *i*
- $C_i$  : biaya penanganan kontainer campuran yang ditransfer dari *gateway-i*
- $c_b$  : biaya marginal untuk penanganan kontainer murni sebagian/ sepenuhnya jenis ke-*b* di *hub*
- $c_{ij}$  : biaya transportasi volume kontainer *AMJ* oleh pihak ketiga dari *i* ke *j*

### 5.1.3 Fungsi Tujuan

Masalah logistik diformulasikan sebagai program bilangan bulat campuran sebagai berikut.

Minimumkan

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in I} A_i \sum_{j \in J} \sum_{t \in T - \sigma_{max}} \sum_{b \in K} d_{ijt} x_{ijt}^b \\
& + \sum_{i \in I} B_i \sum_{j \in J} \sum_{t \in T - \sigma_{max}} \sum_{b \in K} d_{ijt} y_{ijt}^b \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{b \in K} c_b z_{ij}^b \\
& + \sum_{i \in I} C_i \sum_{j \in J} \sum_{t \in T - \sigma_{max}} d_{ijt} y_{ijt} \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} w_{ij}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Tujuan (5.15) adalah meminimumkan biaya penanganan kontainer keseluruhan dalam sistem. Jika terjadi kelimpahan (*overflow*), maka diperlukan pihak ketiga untuk menangani pengiriman karena produk ikan olahan memiliki jendela waktu yang terbatas. Biaya untuk kasus ini dinyatakan dalam suku kelima dari fungsi objektif (5.15).

### 5.1.4 Kendala

Terdapat beberapa kendala operasional yang harus dipenuhi. Formulasi dan rincian setiap kendala dalam model yang dikembangkan disajikan sebagai berikut.

$$\sum_b x_{ijt}^b d_{ijt} + y_{ij} d_{ijt} + w_{ij} = d_{ijt}, \forall i, j \in I, J, \forall t \in T - \sigma_{max} \tag{5.16}$$

Kendala (5.16) adalah memastikan bahwa setiap volume permintaan dari  $i$  ke  $j$  selesai dimuat ke dalam kontainer  $AMJ/AKE$  yang murni/campuran dalam periode waktu  $T$  sementara memperhatikan masa kadaluwarsa pro-

duk. Kendala ini juga mempertimbangkan jika volume kelimpahan terjadi. Penting untuk diperhatikan bahwa semua kontainer campuran dan volume kelimpahan direpresentasikan sebagai ekivalen  $AMJ$  untuk kemudahan pemodelan. Langkah berikutnya adalah jumlah kontainer campuran yang diperoleh dipilah ke dalam kontainer  $AMJ$  dan  $AKE$ , berdasarkan kapasitas pemuatan pesawat, setelah sejumlah kontainer yang murni sepenuhnya dan sebagian, dan volume kelimpahan, di setiap *gateway* telah ditentukan.

$$\sum_j \sum_b x_{ijt}^b d_{ijt} + \lambda_i \sum_{j \in J} y_{ijt} d_{ijt} = u_i, \forall i \in I, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.17)$$

Kendala (5.17) merupakan kendala kapasitas penanganan kontainer dalam ekivalen  $AMJ$  yang murni sepenuhnya untuk setiap *gateway* dalam periode waktu di dalam jendela waktu kadaluwarsa. Perhatikan bahwa kontainer campuran telah ditransformasikan ke ekivalen  $AMJ$  murni. Kontainer  $AKE$  murni juga telah dikonversi ke ekivalen  $AMJ$  murni.

$$\sum_{i \in I} \mu_i \sum_{j \in J} y_{ijt}^b d_{ijt} = s, \forall t \in T - \sigma_{max}, b \in K \quad (5.18)$$

Syarat untuk menempatkan kapasitas penanganan kontainer campuran dalam ekivalen  $AMJ$  yang murni sepenuhnya dinyatakan dalam (5.18). Namun, perlu diperhatikan bahwa kendala ini mengeluarkan penanganan kontainer campuran dengan menggunakan peralatan jenis lain. Ekspresi ini sebaiknya dimodifikasi jika kontainer murni diikutsertakan.

$$(x_{ijt}^b / v_b) d_{ijt} = z_{ij}^b, \forall i, j \in I, J, \forall b \in K, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.19)$$

Jumlah kontainer murni yang diperlukan untuk penanganan volume kontainer murni, diformulasikan dalam (5.19).

$$\sum_{j \in J} z_{ij}^b = p_b, \forall i \in I, \forall b \in K \quad (5.20)$$

Dalam (5.20), terlihat bahwa jumlah kontainer *AMJ* dan *AKE* murni yang akan dipindahkan (jika ada) dari setiap asal ke *hub* tidak bisa melampaui kapasitas pemuatan pesawat kontainer *AMJ* dan *AKE*.

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in K} v_b z_{ij}^b + \sum_{j \in J} y_{ijt} d_{ijt} = \sum_{b \in K} v_b p_b, \forall i \in I, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.21)$$

Persyaratan untuk memenuhi kapasitas pemuatan pesawat, secara khusus dalam ekivalen *AMJ*, karena pemindahan kontainer dari setiap asal ke *hub*, diekspresikan dalam (5.21)

$$\sum_{i \in I} z_{ij}^b = p_b, \forall j \in J, \forall b \in K \quad (5.22)$$

Kendala (5.22) menghadirkan kendala kapasitas pesawat untuk kontainer *AMJ* dan *AKE* murni, secara berturut-turut, dari *hub* ke setiap *gateway* tujuan. Perlu diperhatikan bahwa setiap kapasitas yang tersedia pada dek bagian atas/bawah dari pesawat dapat diisi dengan kontainer *AMJ/AKE* campuran.

$$\sum_{i \in I} \sum_{b \in K} v_b z_{ij}^b + \sum_{i \in I} y_{ijt} d_{ijt} = \sum_{b \in K} v_b p_b, \forall j \in J, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.23)$$

Persyaratan lain untuk kapasitas pemuatan pesawat, karena pemindahan sejumlah kontainer (dalam ekivalen *AMJ*) dari *hub* ke setiap tujuan.

$$\sum_{b \in K} x_{ijt}^b + y_{ijt} = 1, \forall i, j \in I, J, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.24)$$

Kendala (5.24) menghadirkan pecahan dari setiap permintaan buhul yang akan dimuat ke dalam kontainer murni dan campuran kurang dari atau sama dengan satu dalam periode waktu  $T - \sigma_{max}$ .

$$0 = x_{ijt}^b = 1, \forall i, j \in I, J, \forall b \in K, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.25)$$

Kendala (5.25) diperlukan untuk memastikan bahwa pecahan dari setiap buhul permintaan dalam periode waktu  $T - \sigma_{max}$  yang akan dimuat ke dalam kontainer *AMJ* atau *AKE* murni adalah tak-negatif.

$$0 = y_{ijt} = 1, \forall i, j \in I, J, \forall t \in T - \sigma_{max} \quad (5.26)$$

Kendala (5.26) menyatakan bahwa pecahan dari setiap permintaan dari buhul  $i$  ke buhul  $j$  dalam periode waktu  $T - \sigma_{max}$  yang akan dimuat ke dalam kontainer campuran seharusnya merupakan bilangan riil diantara 0 dan 1.

$$w_{ij} = 0, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5.27)$$

Volume kontainer ekuivalen *AMJ* yang ditransportasikan oleh pihak ketiga untuk setiap buhul permintaan seharusnya tak-negatif.

$$z_{ij}^b = 0, z_{ij}^b \in Z, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in K \quad (5.28)$$

Kendala (5.28) memastikan bahwa, jumlah kontainer *AMJ* atau *AKE* murni yang ditransportasikan untuk setiap buhul permintaan adalah bilangan bulat tak-negatif.

## 5.2 Metode Solusi

Untuk memecahkan permasalahan yang telah dimodelkan digunakan pendekatan pencarian langsung layak.

### 5.2.1 Pendekatan Dasar

Pertama perhatikan problema bilangan bulat campuran linier (*mixed integer linear problem/MILP*) dalam bentuk berikut:

Minimumkan

$$P = c^T x \quad (5.29)$$

Dengan kendala

$$Ax \leq b \quad (5.30)$$

$$x \geq 0 \quad (5.31)$$

$$x_i \text{ bilangan bulat untuk beberapa } j \in J \quad (5.32)$$

Komponen vektor layak basis optimal,  $(x_B)_k$ , terhadap *MILP* yang diselesaikan sebagai kontinu dapat dituliskan sebagai

$$(x_B)_k = \beta_k - a_{k1}(x_N)_1 - \dots - a_{kj}(x_N)_j - \dots - a_{kn} - m(x_N)n - m \quad (5.33)$$

Perhatikan bahwa persamaan ini dapat ditemukan dalam tabel akhir prosedur Simplex. Jika  $(x_B)_k$  adalah variabel bilangan bulat dan diasumsikan bahwa  $\beta_k$  bukan bilangan bulat, partisi dari  $\beta_k$  ke dalam komponen bilangan

bulat dan pecahan diberikan

$$\beta_k = [\beta_k] + f_k, 0 = f_k = 1 \quad (5.34)$$

Misalkan kita ingin meningkatkan  $(x_B)_k$  ke bilangan bulat terdekat,  $([\beta] + 1)$ . Berdasarkan ide solusi suboptimal kita dapat meningkatkan variabel non-basis tertentu, katakan  $(x_N)_{j^*}$ , di atas batasnya nol, disediakan  $a_{kj^*}$ , sebagai salah satu elemen dari vektor  $a_{i^*}$ , adalah negatif. Misalkan  $\Delta_{j^*}$  merupakan jumlah gerakan non variabel  $(x_N)_{j^*}$ , sedemikian sehingga nilai numerik dari skalar  $(x_B)_k$  adalah bilangan bulat.  $\Delta_{j^*}$  dapat dinyatakan sebagai

$$\Delta_{f^*} = (1 - f_k) / -a_{kj^*} \quad (5.35)$$

sedangkan non-basis sisanya tetap nol. Dapat dilihat bahwa setelah mengganti (5.21) ke (5.19) untuk  $(x_N)_{j^*}$  dan dengan mempertimbangkan partisi  $\beta_k$  yang diberikan dalam (5.20), diperoleh

$$(x_B)_k = [\beta] + 1$$

Dengan demikian,  $(x_B)_k$  sekarang adalah bilangan bulat.

Sekarang jelas bahwa variabel non-basis memainkan peran penting untuk membulatkan variabel basis yang sesuai. Oleh karena itu, hasil berikut ini diperlukan untuk mengkonfirmasi bahwa harus ada variabel tak-bulat yang bekerja dalam proses pembulatan.



**Teorema 5.2.1** *Misalkan masalah MILP (5.29)–(5.32) memiliki solusi yang optimal, maka beberapa variabel non-basis  $(x_N)_j, j = 1, \dots, n$ , haruslah variabel tak-bulat.*

**Bukti\* 1** *Pemecahan problema sebagai kontinu dari variabel slack (yang tak-bulat, kecuali dalam kasus kendala kesetaraan). Jika diasumsikan bahwa vektor variabel basis  $x_B$  terdiri dari semua variabel slack maka semua variabel bilangan bulat akan berada di vektor non-basis  $x_N$  dan oleh karena itu bernilai bilangan bulat.*

Jelas bahwa komponen lain,  $(x_B)_{(i \in k)}$ , dari vektor  $x_B$  juga akan terpengaruh bila nilai numerik dari skalar  $(x_N)_{j^*}$  meningkat ke  $\Delta_{j^*}$ . Akibatnya, jika beberapa elemen vektor  $a_{j^*}$ , yaitu,  $a_{j^*}$  untuk  $i \in k$ , adalah positif, maka elemen yang sesuai  $x_B$  akan berkurang, dan akhirnya bisa melewati nol. Namun, setiap komponen vektor  $x$  tidak harus berada di bawah nol karena pembatasan tak-negatif. Oleh karena itu, rumus yang disebut uji rasio minimum yang diperlukan untuk melihat apakah gerakan maksimum dari non-basis  $(x_N)_{j^*}$  sedemikian sehingga semua komponen  $x$  tetap layak. Uji rasio ini akan mencakup dua kasus:

1. Sebuah variabel basis,  $(x_B)_{i \neq k}$  pertama menurun ke nol (batas bawah).
2. Variabel basis,  $(x_B)_k$  meningkat ke bilangan bulat.

Secara khusus, sesuai dengan masing-masing dua kasus di atas, seseorang akan menghitung

$$\theta_1 = \min_{i \neq k | a_{j^*} > 0} \{\beta_i / a_{j^*}\} \quad (5.36)$$

$$\theta_2 = \Delta_{j^*} \quad (5.37)$$

Seberapa jauh seseorang dapat melepaskan non-basis  $(x_N)_{j^*}$  dari batas nol-nya, sedemikian sehingga vektor  $x$  tetap layak, akan tergantung pada uji rasio  $\theta^*$  yang diberikan di bawah ini

$$\theta^* = \min(\theta_1, \theta_2) \quad (5.38)$$

Jelas, jika  $\theta^* = \theta_1$ , salah satu variabel dasar  $(x_B)_{i \neq k}$  akan mencapai batas bawah sebelum  $(x_B)_k$  menjadi bulat. Jika  $\theta^* = \theta_2$ , nilai numerik dari variabel dasar  $((x_B)_k$  akan bulat dan kelayakan masih dipertahankan. Analog, kita akan mampu mengurangi nilai numerik dari variabel dasar  $(x_B)_k$  ke bilangan bulat terdekat  $[\beta_k]$ . Dalam hal ini jumlah pergerakan variabel non-basis tertentu,  $(x_N)_{j^*}$ , sesuai dengan sebarang unsur positif dari vektor  $a_{j^*}$ , diberikan oleh

$$\Delta'_f = f_k / a_{kj} \quad (5.39)$$

Untuk mempertahankan kelayakan, uji rasio  $\theta^*$  masih diperlukan. Perhatikan pergerakan variabel non-basis tertentu,  $\Delta$ , seperti yang diungkapkan dalam persamaan (5.39) dan (5.33). Satu-satunya faktor yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah unsur yang sesuai vektor  $\alpha$ . Sebuah vektor  $\alpha_j$  dapat

dinyatakan sebagai

$$\alpha_j = B^{-1}a_j, j = 1, \dots, n - m \quad (5.40)$$

Oleh karena itu, untuk mendapatkan elemen tertentu dari vektor  $\alpha_j$  kita harus bisa membedakan kolom yang sesuai dari matriks  $[B]^{-1}$ . Misalkan diperlukan nilai elemen  $\alpha_{kj*}$ , dengan memisalkan  $v_k$  menjadi vektor kolom ke- $k$  dari  $[B]^{-1}$ , kemudian didapatkan

$$v_k^T = e_k^T B^{-1} \quad (5.41)$$

Selanjutnya, nilai numerik dari  $\alpha_{kj*}$  dapat diperoleh dari

$$\alpha_{kj*} = v_k^T a_{j*} \quad (5.42)$$

Dalam terminologi Pemrograman Linier, operasi yang dilakukan dalam persamaan (5.41) dan (5.42) disebut operasi harga. Vektor biaya tereduksi  $d_j$  dapat digunakan untuk mengukur kerusakan nilai fungsi tujuan yang disebabkan oleh pelepasan sebuah variabel non-basis dari batasnya. Akibatnya, dalam menentukan non-basis mana yang harus dilepaskan dalam proses pembulatan, vektor  $d_j$  harus diperhitungkan, sehingga kerusakan diminimalkan. Ingat bahwa solusi berkelanjutan minimum memberikan batas bawah untuk solusi layak bilangan bulat. Namun demikian, jumlah pergerakan variabel non-basis tertentu seperti yang diberikan dalam persamaan (5.35) atau (5.39), tergantung dalam beberapa cara pada elemen yang sesuai dari vektor  $\alpha_j$ . Oleh karena itu dapat diamati bahwa kerusakan nilai fungsi tujuan karena

melepas variabel non-basis  $(x_N)_{j^*}$  sehingga pembulatan variabel basis  $(x_B)_k$  dapat diukur dengan rasio

$$|d_k/\alpha_{kj^*}| \quad (5.43)$$

dimana  $|a|$  berarti nilai mutlak dari skalar  $a$ . Untuk meminimumkan kerusakanan solusi kontinu optimal digunakan strategi berikut untuk menentukan variable non-basis mana yang bisa ditingkatkan dari batas nol-nya, yaitu,

$$\min_j \{|d_k/\alpha_{kj^*}|\}, j = 1, \dots, n - m \quad (5.44)$$

Dari strategi kendala aktif dan partisi kendala yang sesuai dengan variabel-variabel basis ( $B$ ), superbasis ( $S$ ) dan non-basis ( $N$ ), dapat ditulis

$$\begin{bmatrix} B & S & N \\ & & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ x_S \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ b_N \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

atau

$$Bx_B + Sx_S + Nx_N = b \quad (5.46)$$

$$x_N = b_N \quad (5.47)$$

Matriks basis  $B$  diasumsikan persegi dan non-singular, dengan demikian

$$x_B = \beta - Wx_S - \alpha x_N \quad (5.48)$$

dimana

$$\beta = B^{-1}b \quad (5.49)$$

$$W = B^{-1}S \quad (5.50)$$

Ekspresi (4.47) menunjukkan bahwa variabel-variabel non-basis ditahan sama dengan batas mereka. Hal ini terbukti melalui ekspresi "hampir" basis dari persamaan (5.48), strategi pembulatan dibahas dalam bagian sebelumnya yang dirancang untuk problema *MILP*, dapat diimplementasikan. Khususnya, variabel non-basis bisa dilepas dari batasnya, persamaan (5.47), dan menukarnya dengan variabel basis yang sesuai dalam proses pembulatan, meskipun solusi akan merosot.

### Pivoting

Saat ini, posisi berada pada mana variabel basis tertentu,  $(x_B)_k$  sedang dibulatkan, sehingga variabel non-basis yang sesuai,  $(x_N)_{j^*}$ , yang dilepas dari batas nol-nya. Misalkan pergerakan maksimum  $(x_N)_{j^*}$  memenuhi

$$\theta^* = \Delta_{j^*}$$

sedemikian sehingga  $(x_B)_k$  bernilai bulat untuk mengeksploitasi cara mengubah basis,  $(x_N)_{j^*}$  bisa digerakkan ke  $B$  (untuk menggantikan  $(x_B)_k$  dan  $(x_B)_k$  bernilai bulat ke dalam  $S$  untuk mempertahankan solusi bulat. Saat ini solusi yang dimiliki adalah solusi yang merosot karena variabel basis berada pada batasnya. Proses pembulatan berlanjut dengan satu himpunan baru  $[B, S]$ . Dalam hal ini, semua variabel bulat mungkin menjadi superbasis.

## 5.2.2 Algoritma

### Tahap 1

(L-1) Dapatkan baris  $i^*$  ketidaklayakan bilangan bulat terkecil, sedemikian sehingga  $\delta_{i^*} = \min\{f_i, 1 - f_i\}$ . Langkah ini dilakukan untuk mendapatkan kerusakan minimum fungsi tujuan.

(L-2) Lakukan operasi harga  $v_{i^*}^T = e_{i^*}^T B^{-1}$

(L-3) Hitung  $\delta_{ij} = v_{i^*}^T a_j$  dimana  $j$  berhubungan dengan  $\min_j \{\|d_j/\sigma_{ij}\|\}$

I. Untuk non-basis  $j$  pada batas bawah Jika  $\sigma_{ij} < 0$  dan  $\delta_{i^*} = f_i$ ,

hitung  $\Delta = (1 - \delta_{i^*})/-\sigma_{ij}$

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

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

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

II. Untuk non-basis  $j$  pada batas atas Jika  $\sigma_{ij} < 0$  dan  $\delta_{i^*} = 1 - f_i$ ,

hitung  $\Delta = (1 - \delta_{i^*})/-\sigma_{ij}$

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

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

Jika  $\sigma_{ij} > 0$  dan  $\delta_{i^*} = f_i$ , hitung  $\Delta = \delta_{i^*}/-\sigma_{ij}$

Jika tidak, lanjutkan ke non-basis atau superbasis yang tak-bulat  $j$  (jika ada). Akhirnya kolom  $j^*$  akan dinaikkan dari batas bawah atau diturunkan dari batas atasnya. Jika tidak terdapat yang demikian lanjutkan

ke  $i^*$  berikutnya.

(L-4) Hitung  $\alpha_{j^*} = B^{-1}\alpha_{j^*}$ , yaitu selesaikan  $B\alpha_{j^*} = \alpha_{j^*}$  untuk  $\alpha_{j^*}$

(L-5) Uji rasio. Akan terdapat tiga kemungkinan bagi variabel-variabel non-basis agar tetap layak karena melepas non-basis  $j^*$  dari batasnya.

Jika  $j^*$  adalah batas bawah

Misalkan

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

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

$$C = \Delta$$

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

Jika  $j^*$  adalah batas atas

Misalkan

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

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

$$C' = \Delta$$

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

(L-6) Pertukarkan basis untuk ketiga kemungkinan:

(a) Jika  $A$  atau  $A'$ ,

- $x_{B_{i'}}$  menjadi non-basis pada batas bawah  $l_{i'}$
- $x_{j^*}$  menjadi basis (mengganti  $x_{B_{i'}}$ )
- $x_{i^*}$  tetap basis (tak-bulat)

(b) Jika  $B$  atau  $B'$ ,

- $x_{B_{i'}}$  menjadi non-basis pada batas atas  $u_{i'}$
- $x_{j^*}$  menjadi basis (mengganti  $x_{B_{i'}}$ )
- $x_{i^*}$  tetap basis (tak-bulat)

(c) Jika  $C$  atau  $C'$ ,

- $x_{j^*}$  menjadi basis (mengganti  $x_{i'}$ )
- $x_{i^*}$  menjadi superbasis pada saat bernilai bulat

(L-7) Jika baris  $i^* = \{\}$ , lanjutkan ke Tahap 2, dan jika tidak, ulangi dari

(L-1).

## Tahap 2

Lakukan pencarian garis bulat untuk meningkatkan solusi layak bulat.



## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

Untuk menjadi kompetitif secara global operator udara ekspres internasional harus memiliki perencanaan pemuatan wadah kargo yang baik. Untuk merancang rencana pemuatan wadah kargo yang baik, operator harus mempertimbangkan tidak hanya biaya operasi bandara, tetapi juga ketidakpastian permintaan pasar di operasi yang sebenarnya. Dalam penelitian ini telah dikembangkan model rencana pemuatan wadah kargo dengan permintaan stokastik yang dapat menyelesaikan tuntutan stokastik harian yang terjadi dalam praktek. Tujuannya adalah untuk meminimalkan biaya penanganan total, dengan kendala operasi terkait. Model ini dirumuskan sebagai program bilangan bulat campuran tak-linier yang termasuk ke dalam kelas *NP-hard* dalam hal optimisasi. Untuk memecahkan masalah digunakan pendekatan pencarian langsung layak. Model dan metode solusi diharapkan menjadi alat perencanaan yang berguna untuk operator ekspres udara dalam memutuskan rencana pemuatan wadah kargo, dalam rangka untuk menurunkan biaya operasi, meningkatkan keuntungan dan daya saing pasar.

## 6.2 Saran

Meskipun umumnya penerbangan kargo merencanakan jadwal penerbangan dengan penerbangan banyak pemberhentian (*multi-stop*), bagi operator ekspres terlalu banyak pemberhentian tidaklah praktis karena kendala waktu yang pasti dari komitmen pengiriman hari berikutnya. Sebagian besar penerbangan kargo adalah penerbangan dengan satu-pemberhentian, yaitu dari asal, ke *hub*, kemudian ke tujuan. Operasi bandara termasuk yang di asal, di tujuan dan pada *hub*.

Fungsi utama dari gerbang (sebuah bandara) adalah mengumpulkan paket-paket keluar (ekspor) dan mendistribusikan paket-paket masuk (impor). Proses ekspor dimulai dari paket yang diambil di asal oleh kurir. Pada penghujung hari, semua paket ekspor dibawa kembali ke stasiun, dan kemudian diangkut ke gerbang oleh *shuttle*. Gerbang bertanggung jawab untuk memilah paket dan menemukannya pada wadah murni atau campuran, yang kemudian dimuat ke pesawat.

Dalam hal apakah wadah murni atau campuran yang digunakan, wadah murni membutuhkan usaha lebih pada asal untuk dirakit karena proses penyortiran paket memakan waktu, tapi waktu yang lebih sedikit diperlukan di *hub* untuk proses transfer dari pesawat ke pesawat. Di sisi lain, wadah campuran memerlukan sedikit usaha di gerbang di mana terdapat sumber daya yang terbatas, tetapi membutuhkan lebih banyak tenaga kerja dan waktu pemi-

lahan paket yang lebih lama di *hub*. Jika kapasitas penanganan wadah di *hub* tidak terbatas dan biaya operasi marginal adalah konstan dan lebih rendah dari yang di setiap asal, maka jelas paket harus dimuat ke dalam wadah campuran di semua tempat asal, untuk mencapai biaya operasi minimum total. Namun, biasanya kapasitas penanganan di *hub* terbatas dan biaya operasi marginal tidak konstan. Memang, biaya operasi paket penanganan berhubungan secara negatif dengan jendela waktu operasi yang tersedia, ditentukan oleh jadwal penerbangan. Artinya, semakin besar jendela waktu operasi yang tersedia dalam jadwal penerbangan, semakin rendah biaya penanganan. Misalnya, penerbangan kedatangan akhir dari asal ke *hub* perlu untuk membangun wadah murni, sehingga paket yang terkait dapat tiba tepat waktu untuk mendapatkan penerbangan awal berikutnya. Jelas, rencana pemuatan wadah kargo akan dipengaruhi oleh jadwal penerbangan. Dalam penelitian ini, masalah terfokus pada rencana pemuatan wadah kargo untuk jadwal penerbangan yang diberikan. Integrasi rencana pemuatan wadah kargo dan penjadwalan penerbangan dapat diteliti di masa depan.