

## Karakterisasi Model Optimisasi untuk Masalah Perencanaan Taktis Manajemen Perhutanan berbasis *Clean Development Mechanism* (CDM)\*

D. Chaerani, I. Permana, Firdaniza, Sudradjat  
Jurusan Matematika FMIPA Universitas Padjadjaran  
Jalan Raya Bandung Sumedang KM 21 Jatinangor 45323  
e-mail: [d.chaerani@unpad.ac.id](mailto:d.chaerani@unpad.ac.id)

### Abstrak

*Clean Development Mechanism* (CDM) atau Mekanisme Pembangunan Bersih telah menjadi suatu isu yang penting dalam kaitannya mencari sumber energi terbarukan. Salah satu sumber daya alam yang memegang peranan penting dalam konteks CDM adalah manajemen perhutanan. Termotivasi oleh model optimisasi untuk manajemen perhutanan berbasis CDM yang diusulkan oleh Guttierrez et al (2006), dalam makalah ini disajikan suatu usulan baru untuk mengaplikasikan model optimisasi yang berbeda dari usulan Guttierrez et al, yaitu Model Optimisasi untuk Masalah Perencanaan Taktis Manajemen Perhutanan (MPTP) yang merupakan pengembangan dari model optimisasi perhutanan yang diusulkan oleh M. Ronqvist (2003). Model ini merupakan masalah optimisasi yang dapat diklasifikasikan dalam kelas masalah *Mixed Integer Programming* (MIP). Hal ini mengakibatkan diperlukannya skema khusus untuk menangani keberadaan variabel integer yang terlibat dalam permasalahan. Dalam makalah ini, diusulkan skema *Branch and Bound* (BB) untuk pencarian solusi optimal. Data ilustratif digunakan sebagai bahan perhitungan dan analisis.

**Keyword:** Optimisasi, Perhutanan, Clean Development Mechanism (CDM), Mixed Integer Programming, Skema Branch and Bound

### 1. Pendahuluan

Mekanisme pembangunan bersih atau *Clean Development Mechanism* (CDM) merupakan suatu mekanisme yang diupayakan untuk mencegah dan mengatasi pemanasan global dan perubahan iklim. Diawali oleh Kyoto Protocol pada tahun 1997 yang bertujuan untuk mengurangi emisi *greenhouse gasses* (GHGs) sebesar 5.1% sepanjang tahun 2008-2012. Mekanisme CDM ini adalah suatu proyek yang berdasarkan pada proyek pengurangan emisi yang bertempat di negara berkembang dengan cara menjual kredit karbon kepada negara industri.

Topik utama yang diteliti dalam makalah ini adalah Model Optimisasi untuk Masalah Perencanaan Taktis Manajemen Perhutanan (MTMP) yang berbasis *Clean Development Mechanism* (CDM). Hal ini mengingat isu yang tengah mendunia mengenai pemanasan global dan perubahan iklim secara besar-besaran. Memandang pentingnya CDM dewasa ini, maka perlu dilakukan kajian teoritis dan praktis dari sisi pemodelan matematika untuk dapat menentukan solusi optimal dari manajemen CDM ini. Dengan memperhatikan dua variabel keputusan yaitu kredit karbon ( $CO_2$ ) dan penjualan kayu, maka fungsi tujuan dari model optimisasi yang akan diteliti dalam proposal ini adalah memaksimalkan keuntungan industri perhutanan sebagai sumber daya penghasil karbon ( $CO_2$ ) dan kayu. Model ini telah terlebih dahulu dikembangkan oleh V.H. Gutierrez et al (2006).

Selanjutnya, dalam makalah ini pembahasan akan dikaji dengan urutan sebagai berikut. Pada Bagian 2 dibahas mengenai sejarah, konsep dan pentingnya mekanisme CDM. Selanjutnya Model Optimisasi MPTP dibahas pada Bagian 3, termasuk reformulasi dari model ini dalam bentuk standar matriks dan juga kajian mengenai skema Branch and Bound. Hasil dan pembahasan dari contoh ilustratif disajikan dalam Bagian 4. Kesimpulan dibahas pada Bagian 5.

### 2. Sejarah, Konsep dan Pentingnya Mekanisme Pembangunan Bersih (*Clean Development Mechanism*)

Berikut akan dibahas rumusan masalah seperti yang diusulkan oleh V.H. Gutierrez et al (2006) yang mencakup mengenai sejarah dan pentingnya Mekanisme Pembangunan Bersih.

---

\* dipresentasikan pada Seminar Nasional Matematika III 2009, Jurusan Matematika FMIPA, Universitas Negeri Jakarta, Oktober 2009

## 2.1 Sejarah Perkembangan Konsep Mekanisme Pembangunan Bersih

Berdasarkan kepada *Kyoto Protocol* [UNFCCC1997], berbagai proyek dalam bidang *Clean Development Mechanism* (CDM) didisain untuk mempromosikan pembangunan yang berkesinambungan di berbagai negara berkembang dimana pada saat yang bersamaan proyek tersebut dapat digunakan untuk membantu negara berkembang tersebut untuk mencapai target pengurangan emisi [UNFCCC1997]. Aktivitas pada lahan perhutanan dapat membantu untuk mencapai tujuan ini karena proyek-proyek yang didisain dengan baik menghasilkan lingkungan yang penting dan juga kolaterasi sosial yang menguntungkan seperti peraturan perairan, pengurangan erosi, perbaikan habitat dan membuka lapangan kerja [Ji and Junfeng2000; Gracia et al 2005; IUCN 2006].

Akan tetapi, aktivitas perhutanan memiliki detektor karena CO<sub>2</sub> yang diserap oleh hutan tidak dihasilkan kembali dengan jumlah yang sama. Hal ini dipandang penting untuk dijadikan topik dalam *the Ninth Conference of the Parties (COP9)*, yang mana hal-hal yang terkait dengan prosedur untuk proyek CDM telah disetujui untuk dilakukan. Berdasarkan pada COP9 ini, peranan hutan ini terbatas oleh waktu, pada akhirnya, sumber daya alam ini harus diperbaharui atau digantikan oleh sumber daya lain (AAUs, CERs, ERUs dan RMUs) sebelum waktu yang ditentukan habis [UNFCCC 2003]. Keputusan-keputusan yang diadopsi mengenai ke-tidakpermanen-an dalam COP9 memungkinkan proyek-proyek perhutanan untuk memperoleh keuntungan dari *certified Emission Reductions (CERs)* dan kayu. Namun demikian, harga kayu dan CERs merupakan suatu *variable* yang harus ditentukan besaran optimalnya, seperti akan ditunjukkan berikut ini.

Keputusan yang harus dibuat dalam manajemen perhutanan bertujuan untuk memperoleh keuntungan dari salah satu dari dua sumber penghasilan ini, sehingga dapat memberikan suatu akibat secara negatif dari penghasilan (*income*) yang diperoleh dari sisi lainnya. Hal inilah yang menjadi alasan mengapa para pembuat proyek memerlukan suatu alat yang tepat untuk dapat mengetahui apa yang akan dijadikan suatu aturan regulasi dalam manajemen perhutanan (seperti misalnya frekuensi dan intensitas dari penebangan dan panjang periode rotasi) sehingga para pembuat proyek ini dapat memaksimalkan keuntungan dari kedua sumber penghasilan ini.

V.H. Gutie´rrez et al dalam tulisannya yang berjudul *Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model* yang diterbitkan dalam jurnal *Forest Ecology and Management* 226 (2006) 341–350, mengusulkan **Carboma’x**: model optimisasi manajemen untuk proyek perhutanan dalam bidang CDM. Carboma’x ini mensimulasikan beberapa peraturan manajemen dan mencari yang peraturan terbaik yang dapat memaksimalkan keuntungan dari proyek CDM dengan mempertimbangkan variabel karbon dan kapasitas produksi kayu dari spesies yang diperhatikan dan ekspektasi mengenai pasar karbon dan kayu.

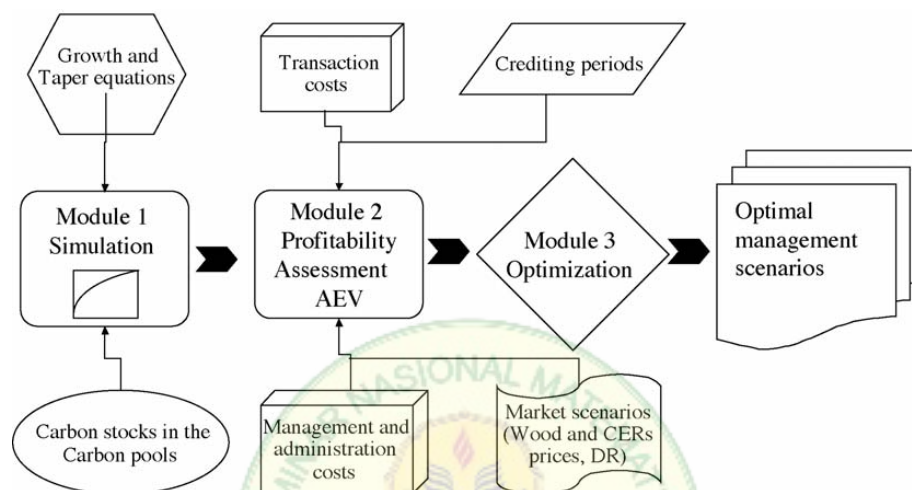
Dalam makalah ini akan dilakukan studi mengenai karakterisasi model optimisasi manajemen CDM berdasarkan makalah yang diusulkan oleh V.H Gutie´rrez et al dan diharapkan dapat diimplementasikan dalam studi kasus khusus. Merujuk pada model tersebut langkah penelitian yang akan dilakukan dibagi menjadi tiga tahap yaitu:

1. Tahap karakterisasi dari struktur umum untuk model optimisasi manajemen CDM. Dalam tahap ini akan dilakukan penyusunan model optimisasi verbal dari skenario manajemen CDM yang sesuai untuk diimplementasikan di suatu daerah penelitian.
2. Tahap kedua, model verbal yang diperoleh pada tahap pertama akan diformulasikan secara matematis sehingga dapat diperkenalkan model optimisasi manajemen CDM ini melalui terminologi dan konsep optimisasi.
3. Tahap ketiga, uji hipotesis akan dilakukan dengan studi kasus. Hipotesis tersebut adalah :
  - a. Manajemen perhutanan yang optimal sangat dipengaruhi oleh skenario pasar karbon dan kayu.
  - b. CERs akan lebih menguntungkan untuk industri perhutanan dalam mekanisme CDM karena akan memberikan fleksibilitas pada manajemen perhutanan

Penting untuk diketahui bahwa Corboma'x dibangun berbasis optimisasi dengan menggunakan algoritma genetika, yaitu suatu algoritma yang dapat menyelesaikan pencarian solusi optimal pada masalah optimisasi berdasarkan mekanisme dari genetika natural dan pemilihan natural [Kalyanmoy 1996]. Sementara itu, dalam makalah ini difokuskan topik penelitian ini pada tahap-tahap yang telah disebutkan diatas dan mencoba menjajaki kemungkinan penggunaan teknik optimisasi lain.

## 2.2 Konsep Optimisasi dalam Manajemen CDM

Sebagai tinjauan pustaka, pada subbab ini akan disajikan rangkuman dari usulan model optimisasi yang diusulkan oleh V.H. Gutie'rrrez et al. Seperti telah disebutkan pada subbab 2.1, Produk penelitian yang dihasilkan oleh V.H. Gutie'rrrez et al adalah Corboma'x, dimana Corboma'x ini terdiri dari tiga modul seperti dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 1. Representasi grafis dari struktur model dari Corboma'x [V.H. Gutie'rrrez et al2006 ]

Module optimisasi dalam modul ini menggunakan algoritma genetika untuk mengoptimalkan manajemen perhutanan. Dimana model ini merupakan model yang adaptif dari model stokastik yang berkaitan dengan pemilihan natural untuk menentukan solusi optimal. Dalam hal ini sangat membantu bila masalah yang diselesaikan adalah masalah optimisasi dalam skala besar dengan beberapa titik optimal local [Ansari and Hou, 1997; Fouskakis and Draper, 2002]. Dalam kasus ini, solusi dari dua modul sebelumnya akan dievaluasi dengan fungsi *fitness*, dalam hal ini didefinisikan sebagai AEV untuk menentukan nilai optimal. Kombinasi yang berbeda dari parameter-parameter ini dievaluai dengan algoritma sampai solusi optimal diperoleh. Pustaka rujukan untuk deskripsi dan formulasi lengkap dari Algoritma Genetika dapat dilihat dalam makalah [Fouskakis and Draper 2002].

## 3. Model Optimisasi Perencanaan Taktis Manajemen Perhutanan berbasis CDM

Pada Subbab ini disajikan karakterisasi model optimisasi manajemen CDM dengan menggunakan terminologi dan konsep optimisasi yang meliputi transformasi model optimisasi verbal menjadi model optimisasi matematis. Perlu dicatat bahwa dalam kajian yang disajikan oleh V.H. Gutie'rrrez et al model optimisasi untuk memaksimalkan keuntungan pada manajemen perhutanan tidaklah disajikan secara eksplisit. Untuk itu, dalam penelitian ini, model optimisasi manajemen perhutanan yang akan dikembangkan diambil berdasarkan model yang diusulkan oleh Mikael Ronnquist. Model ini dikenal dengan Masalah Perencanaan Taktis untuk Industri Perhutanan, yang merupakan masalah *Mixed Integer Programming*. Dengan demikian, dalam metode penyelesaian masalah ini digunakan metode lain selain Algoritma Genetika, dalam hal ini Skema *Branch and Bound*.

### 3.1 Masalah Perencanaan Taktis untuk Manajemen Perhutanan

Perencanaan penebangan hutan untuk sejumlah periode bulan dalam satu tahun menjadi topik utama dalam masalah perencanaan taktis manajemen perhutanan (MPTP) ini. Dalam hal ini, perlu ditentukan daerah perhutanan mana yang dapat ditebang, daerah industri mana yang akan dikirim hasil penebangan hutan dan peralatan atau kelompok kerja mana yang akan digunakan atau ditugaskan untuk menebang hutan. Masalah ini dirumuskan sebagai

model *Mixed Integer Programming (MIP)*. Secara verbal, skenario model optimisasi MPTP ini dapat dinyatakan sebagai model verbal berikut:

**Minimumkan** biaya total penebangan hutan dan biaya transportasi  
**dengan kendala**

1. Untuk setiap daerah penebangan, tebang daerah penebangan hanya satu kali dalam satu periode penebangan..
2. Untuk setiap periode penebangan dan kelompok kerja, hanya ada satu pekerjaan penebangan yang dikerjakan oleh satu kelompok kerja dalam satu periode penebangan.
3. Untuk setiap daerah industri, aliran kayu hasil penebangan hutan harus dapat memenuhi permintaan daerah industri.
4. Untuk setiap daerah industri, jumlah persediaan kayu hasil penebangan dari suatu daerah penebangan hutan harus lah lebih besar atau sama dengan jumlah aliran kayu yang dikirim ke daerah industri.

Sehingga, untuk mengkonstruksi model optimisasi MPTP secara matematis, berikut ini variabel dan koefisien-koefisien yang dapat digunakan untuk memformulasikan model matematis dari model optimisasi MPTP.

1. Variabel keputusan yang menyatakan apakah suatu daerah hutan  $i$  ditebang atau tidak, dinyatakan dengan notasi  $x_{itc}$ , dimana nilai  $x_{itc}$  adalah 0 atau 1.

$$x_{itc} = \begin{cases} 1, & \text{jika daerah } i \text{ ditebang pada periode } t \text{ oleh kelompok kerja } c \\ & \text{(dengan peralatan yang diberikan)} \\ 0, & \text{lainnya.} \end{cases}$$

2.  $y_{ijt}$  adalah jumlah aliran kayu hasil penebangan dari daerah penebangan  $i$  ke daerah industri  $j$  pada periode waktu  $t$ .
3.  $s_{itc}$  adalah jumlah persediaan di daerah penebangan  $i$  pada periode  $t$  yang dikerjakan oleh kelompok kerja  $c$ .
4.  $d_{jt}$  adalah jumlah permintaan kayu daerah industri  $j$  pada periode  $t$ .
5.  $f_{itc}$  adalah biaya penebangan yang harus dikeluarkan jika daerah penebangan  $i$  ditebang pada periode  $t$  oleh kelompok kerja  $c$ .
6.  $c_{ijt}$  adalah biaya unit transportasi pengiriman hasil penebangan dari daerah penebangan  $i$  ke daerah industri  $j$  pada periode  $t$ .

Dengan menggunakan notasi-notasi tersebut, maka model optimisasi MPTP dapat dinyatakan sebagai model optimisasi berikut:

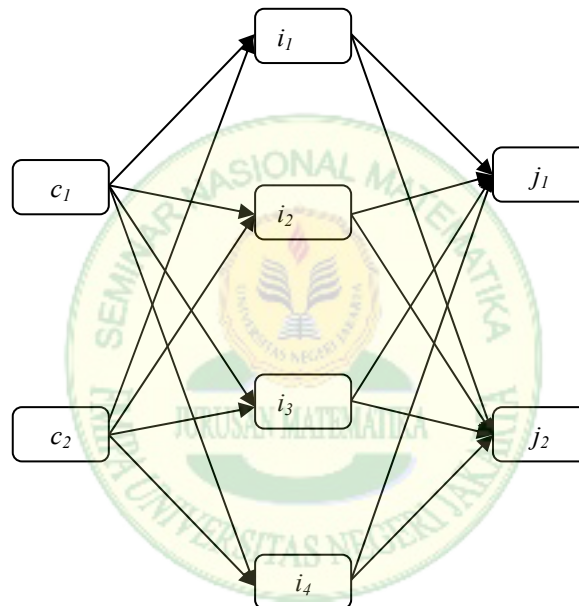
$$\begin{aligned} \min z &= \sum_i \sum_t \sum_c f_{itc} x_{itc} + \sum_i \sum_j \sum_t c_{ijt} y_{ijt} \\ \text{s.t} \quad & \sum_t \sum_c x_{itc} \leq 1, \forall i \\ & \sum_i x_{itc} \leq 1, \forall t, c \\ & \sum_j y_{ijt} \leq s_{itc} x_{itc}, \forall i, t, c \\ & \sum_i y_{ijt} = d_{jt}, \forall j, t, \\ & x_{itc} \in \{0, 1\}, \forall i, t, c, \\ & y_{ijt} \geq 0, \forall i, j, t. \end{aligned} \tag{1}$$

### 3.2 Reformulasi Model Optimisasi MPTP

Pada subbab ini dibahas bagaimana model optimisasi MPTP diatas diformulasi ulang ke dalam bentuk standar Pemrograman Linier, khususnya dalam bentuk standar matriks. Pada tahap ini, terlebih dahulu dibahas model ilustratif dari model optimisasi MPTP sebagai berikut.

Misalkan diberikan himpunan  $(I, J, T, C)$  dimana  $I$  adalah himpunan daerah penebangan hutan,  $J$  adalah himpunan daerah industri,  $T$  adalah himpunan periode waktu pelaksanaan pekerjaan, dan  $C$  adalah himpunan dari kelompok kerja yang akan melakukan penebangan hutan.

Selanjutnya, untuk memahami permasalahan MPTP, maka asumsikan bahwa masalah ini dapat dinyatakan sebagai masalah dari sebuah grap  $G=(V,A)$  dimana  $V = V_c \cup V_i \cup V_j$  adalah himpunan titik-titik yang menyatakan titik untuk kelompok kerja  $c$ , daerah penebangan hutan  $i$  dan daerah industri  $j$ ; dan  $A = A_{ci} \cup A_{ij}$  adalah gabungan antara himpunan  $A_{ci}$  (himpunan sisi-sisi yang menghubungkan kelompok kerja dan daerah penebangan) dan  $A_{ij}$  (himpunan sisi-sisi yang menghubungkan daerah penebangan hutan dan daerah industri). Dengan mengambil  $|I|=4, |J|=2, |T|=1$  dan  $|C|=2$ , maka grap  $G=(V,A)$  untuk masalah MPTP dapat digambarkan seperti dalam Gambar 1 berikut ini.



**Gambar 1. Grap  $G=(V,A)$  sebagai ilustrasi dari masalah MPTP**

Dengan demikian model optimisasi MPTP (3) untuk kasus ini adalah

$$\begin{aligned}
 & \min f^T x + c^T y \\
 & \text{s.t } Ax \leq b \\
 & \quad Sx + Ty \leq 0 \\
 & \quad Dy = d \\
 & \quad x \in \{0,1\}, y \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

dimana

$$f = \begin{bmatrix} f_{111} \\ f_{211} \\ f_{311} \\ f_{411} \\ f_{112} \\ f_{212} \\ f_{312} \\ f_{412} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_{111} \\ x_{211} \\ x_{311} \\ x_{411} \\ x_{112} \\ x_{212} \\ x_{312} \\ x_{412} \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_{111} \\ c_{121} \\ c_{211} \\ c_{221} \\ c_{311} \\ c_{321} \\ c_{411} \\ c_{421} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_{111} \\ y_{121} \\ y_{211} \\ y_{221} \\ y_{311} \\ y_{321} \\ y_{411} \\ y_{421} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} -s_{111} & 0 & 0 & 0 & -s_{112} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -s_{211} & 0 & 0 & 0 & -s_{212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -s_{311} & 0 & 0 & 0 & -s_{312} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s_{411} & 0 & 0 & 0 & -s_{412} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Formulasi model optimisasi (3) ekuivalen dengan formulasi dalam bentuk standar matriks untuk masalah pemrograman linier mixed integer berikut.

$$\begin{aligned} & \min \begin{bmatrix} f \\ c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ & \text{s.t} \\ & \begin{bmatrix} A & 0 \\ S & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ D \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = d \\ & x \in \{0,1\}, y, u, v \geq 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Tulis kembali model optimisasi (7) dalam model optimisasi dengan empat variabel keputusan  $x, y, u$  dan  $v$ , maka diperoleh model berikut.

$$\begin{aligned} \min & \begin{bmatrix} f \\ c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ u \\ v \end{bmatrix} \\ \text{s.t} & \begin{bmatrix} A & 0 & I_u & 0 \\ S & T & 0 & I_v \\ 0 & D & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ d \end{bmatrix} \\ & x \in \{0,1\}, y, u, v \geq 0, \end{aligned} \tag{8}$$

dimana  $I_u$  dan  $I_v$  adalah matriks identitas yang berukuran  $|u| \times |u|$  dan  $|v| \times |v|$ . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model optimisasi MPTP (1) adalah ekivalen dengan model optimisasi (8).

### 3.3 Skema *Branch and Bound* untuk menyelesaikan Masalah Perencanaan Taktis Perhutanan

Perhatikan bahwa model optimisasi MPTP (8) diatas merupakan kelas masalah optimisasi mixed integer programming (MIP). Dengan demikian, diperlukan suatu skema khusus untuk menangani keterlibatan variabel integer dalam model (8) ini. Beberapa algoritma yang telah dikenal sebagai metode penyelesaian masalah MIP diantaranya adalah Metode Gomory Cutting Plane (GCP), Metode Balas dan Skema *Branch and Bound* (BB). Dalam makalah ini dibahas mengenai skema khusus BB untuk model optimisasi MPTP, seperti terlihat dalam Gambar 2.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Data Ilustratif

Untuk melengkapi analisa terhadap model optimisasi MPTP (8), sebuah contoh ilustratif digunakan untuk memberikan pemahaman lebih jelas. Berikut ini data ilustratif yang digunakan dalam makalah ini.

**Tabel 1. Data ilustratif untuk biaya penebangan hutan dan jumlah persediaan**

	Biaya Penebangan (Jutaan Rupiah)			
	Hutan 1	Hutan 2	Hutan 3	Hutan 4
<b>Kelompok kerja 1</b>	5	4,5	4,7	4,4
<b>Kelompok kerja 2</b>	4,5	5,5	4,7	4,8
<b>Jumlah Persediaan (Ton)</b>	1400	1200	1000	1200

Tabel 2 memberikan data ilustratif untuk biaya pengiriman hasil penebangan hutan dan jumlah permintaan industri.

**Tabel 2. Biaya pengiriman hasil penebangan hutan dan jumlah permintaan**

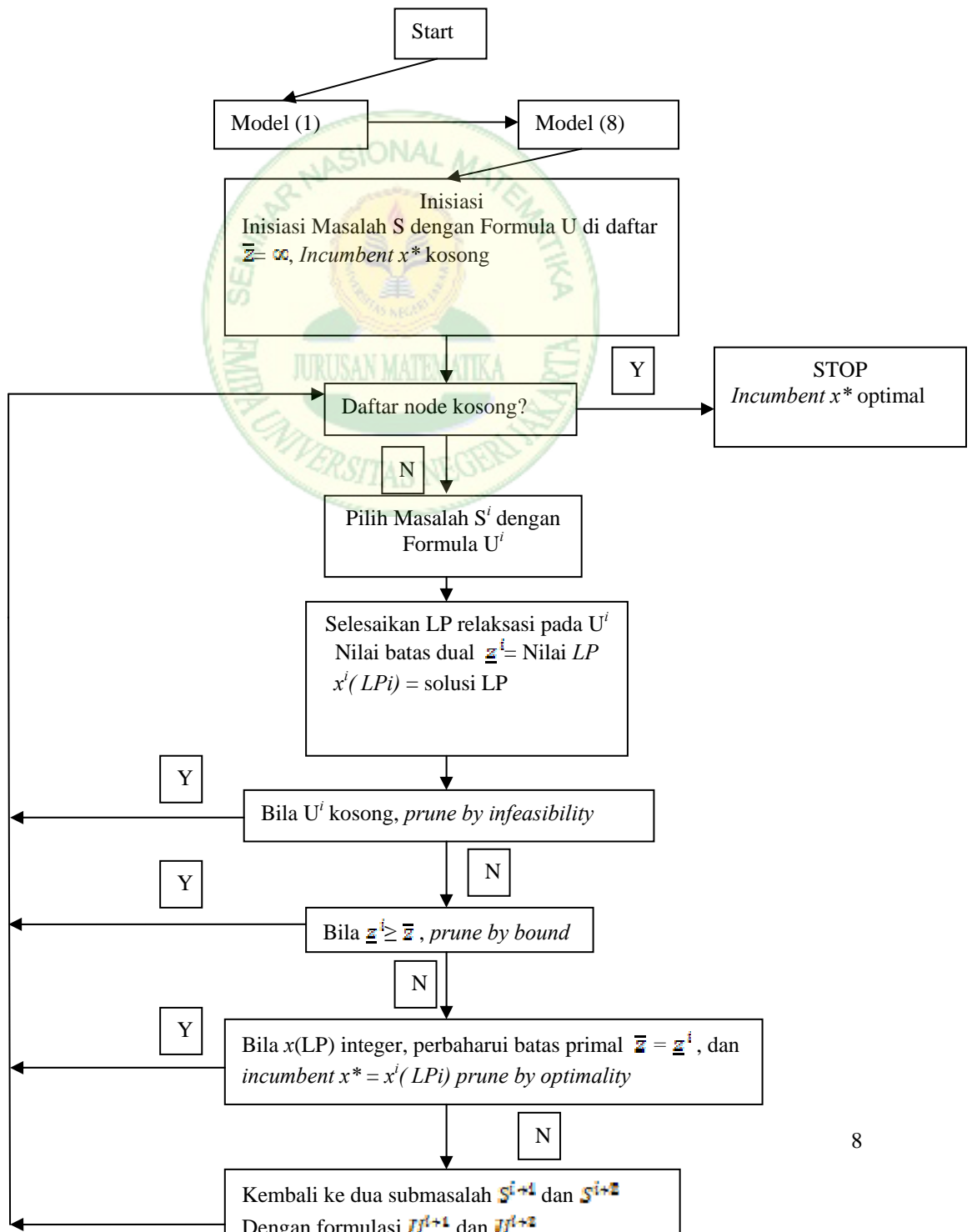
	Biaya Penebangan (ratusan ribu rupiah)				
	Hutan 1	Hutan 2	Hutan 3	Hutan 4	
<b>Industri 1</b>	200	250	350	200	1500
<b>Industri 2</b>	300	250	230	400	1400

### 4.2 Analisa Hasil Perhitungan

Untuk memberikan gambaran akan kompleksitas perhitungan dengan menggunakan skema BB, perhatikan bahwa masalah optimisasi MPTP dengan contoh ilustratif ini, memiliki 26 variabel keputusan dengan 12 persamaan kendala. Untuk ukuran masalah kecil ini, diperlukan 14 iterasi. Dengan menggunakan bantuan Matlab untuk mengimplementasikan skema BB pada data ilustratif ini, maka diperoleh hasil seperti yang dapat digambarkan dalam Gambar 3.

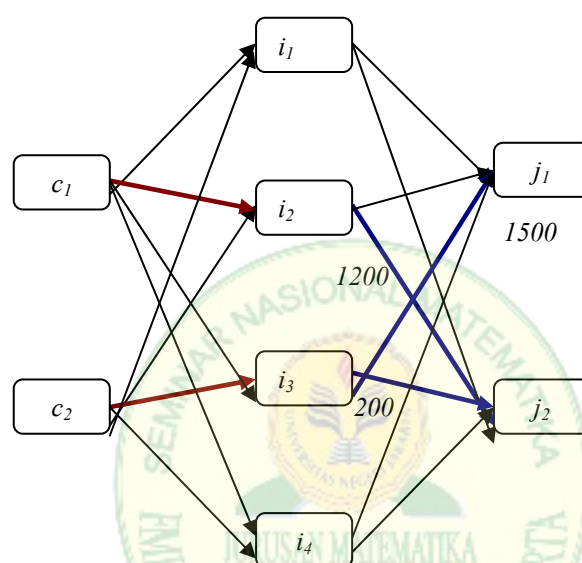
Gambar 3 menunjukkan bahwa daerah penebangan hutan 2 dapat ditebang oleh kelompok kerja 1 dan daerah penebangan hutan 3 dapat ditebang oleh kelompok kerja 2. Berdasarkan asumsi pada fungsi persamaan kendala keadaan ini menunjukkan bahwa hanya ada satu kelompok kerja yang bekerja untuk menebang daerah penebangan hutan. Hasil ini juga menunjukkan bahwa dalam satu periode, hutan 2 dan hutan 3 hanya ditebang satu kali.

Selanjutnya, hasil perhitungan memperlihatkan bahwa jumlah persediaan hasil penebangan di daerah hutan 2, dikirimkan ke daerah industri 2 sebanyak 1200 ton. Sementara itu, daerah penebangan hutan 3 mengirimkan 1500 ton ke daerah industri 1 dan 200 ton ke daerah industri 1. Ini menunjukkan bahwa jumlah permintaan daerah industri 1 dan 2 telah terpenuhi oleh kedua daerah penebangan hutan. Namun demikian, jika kita perhatikan data jumlah persediaan pada setiap hutan, dari Tabel 1, terlihat bahwa jumlah persediaan yang dapat disediakan oleh hutan 3, hanyalah sebanyak 1000 ton. Sementara itu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa jumlah hasil penebangan hutan yang dikirimkan ke daerah industri 1 dan 2 berjumlah 1700 ton. Ini menunjukkan adanya kekurangan persediaan yang diijinkan pada daerah hasil penebangan. Hasil ini dapat dikaji lebih lanjut dengan menggunakan Teori Pengendalian Persediaan yang mengijinkan adanya kekurangan.





Gambar 2. Diagram Alir Skema Branch and Bound untuk Model Optimisasi MPTP



Gambar 3. Solusi optimal model optimisasi MPTP dengan Skema BB untuk data ilustratif

## 5. Kesimpulan dan topik penelitian lanjut

Keterkaitan antara CDM dan teknologi optimisasi di bidang perhutanan tidak dapat dipisahkan. Hal ini terkait dengan efisiensi biaya yang harus dikeluarkan dalam melaksanakan proses CDM itu sendiri. Dalam makalah ini telah dibahas suatu model optimisasi MPTP yang berkaitan dengan meminimumkan biaya penebangan hutan dan biaya pengiriman kayu. Dalam hal ini ekuivalen dengan konsep maksimisasi keuntungan yang diusulkan oleh Guttierrez et al. Dalam makalah ini digunakan teknik penyelesaian masalah MIP yaitu dengan skema *branch and bound*, telah ditunjukkan bahwa modul optimisasi berbasis CDM dapat dikembangkan berdasarkan skema ini. Uji model dan validasi sebaiknya dilakukan dengan menggunakan data real dari lapangan. Sebagai topik lanjutan, penelitian difokuskan untuk menangani penaksiran parameter data dalam kaitannya menaksir biaya penebangan dan biaya transportasi. Lebih lanjut, kedua parameter ini dapat diasumsikan taktentu, sehingga model optimisasi ini dapat dikembangkan dengan menggunakan konsep pemodelan robust disain dengan menggunakan teknik optimisasi konik [Chaerani2006]. Hal ini diharapkan dapat dikembangkannya masalah manajemen CDM ini menjadi salah satu khazanah masalah yang dapat diselesaikan menggunakan teknologi optimisasi yang berdasar pada konveksitas dari masalah sehingga diperoleh solusi robust optimal global.

## Ucapan terimakasih

Penelitian ini didanai sebagian oleh Dana Hibah Penelitian Fundamental DIKTI 2009 dan Dana Penelitian Peneliti Muda DIPA UNPAD 2009.

### Daftar Pustaka

1. Ansari, N., Hou, E., Computational Intelligence for Optimization. Kluwer Academic Publishers, Norwell. 1997.
2. D. Chaerani, Modelling Robust Design Problems via Conic Optimization, TU Delft PhD thesis, ISBN 90-8559-232-1, Optima Grafische Communicatie, Rotterdam, The Netherlands, 2006.
3. Fouskakis, D., Draper, D., Stochastic optimization: a review. *Int. Stat. Rev.* 70 (3), 315–349. 2002.
4. Garcia, J., Deckmyn, G., Moons, E., Proost, S., Ceulemans, R., Muys, B., An integrated decision support framework for the prediction and evaluation of efficiency, environmental impact and total social cost of domestic and international forestry projects for greenhouse gas mitigation: description and case studies. *For. Ecol. Manage.* 207, 245–262. 2005.
5. IUCN, The World Conservation Union, [http://www.iucn.org/themes/carbon/knowcdm/dc\\_opps.htm](http://www.iucn.org/themes/carbon/knowcdm/dc_opps.htm) (online). 2006.
6. Ji, Z., Junfeng, L., China: CDM opportunities and benefits. In: Austin, D., Faeth, P. (Eds.), *Financing Sustainable Development with the Clean Development Mechanism*. World Resources Institute, Washington DC. 2000.
7. Kalyanmoy Deb. *Optimization for Engineering Design: Algorithm and Examples*. Prentice-Hall of India Private Limited. New Delhi. 1996
8. UNFCCC, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/L.7/Add.1. 1997.
9. UNFCCC, Report of the Conference of the Parties on its Ninth Session, held at Milan from 1 to 12 December 2003. FCCC/CP/2003/6/Add.2. 2003
10. UNFCCC, Report of the Conference of the Parties on its Seventh Session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. FCCC/CP/2001/13/Add.2. 2002.
11. V.H. Gutierrez et al. Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. *Forest Ecology and Management* 226 (2006) 341–350. 2006.

