

Penyelesaian Masalah Konektivitas di Area Konservasi dengan Algoritme Heuristik

Farida Hanum^{*)}, Nur Wahyuni, Toni Bakhtiar
Departemen Matematika FMIPA IPB
Kampus IPB Darmaga Bogor
faridahanum00@yahoo.com^{*)}

Area konservasi adalah kawasan hutan dengan ciri khas tertentu, baik di daratan maupun di lautan yang berfungsi melestarikan keanekaragaman satwa, tumbuhan dan ekosistemnya. Area konservasi yang dibahas dalam penelitian ini ialah area konservasi di daratan. Area konservasi daratan memiliki beberapa tempat yang terpisah. Tempat-tempat yang terpisah itu dikarenakan adanya bentang alam seperti adanya lahan pertanian, perkebunan, danau, sungai, dan rawa. Di dalam area konservasi juga terdapat satwaliar yang harus dilindungi, dan satwaliar tersebut tersebar di beberapa tempat dalam area konservasi. Dalam penelitian ini akan dibahas suatu cara dalam memilih tempat-tempat di area konservasi, sedemikian rupa sehingga semua spesies terdapat dalam himpunan tempat yang dipilih. Tempat-tempat yang dipilih harus terhubung. Di samping itu, banyaknya tempat yang dipilih haruslah minimum. Tempat-tempat yang dipilih tersebut akan dijadikan sebagai indikator untuk menentukan zona dari suatu area konservasi, misalkan zona pada suatu kawasan taman nasional. Pemilihan tempat di dalam area konservasi seperti ini dapat dinyatakan sebagai masalah konektivitas. Di dalam teori graf, masalah konektivitas dapat dipandang sebagai masalah penentuan kover terhubung yang minimum. Di dalam penelitian ini, masalah konektivitas akan diformulasikan menjadi *integer linear programming* kemudian kover terhubung yang minimum akan ditentukan dengan algoritme heuristik.

Kata Kunci: masalah konektivitas, area konservasi, *integer programming*, algoritme heuristik

1. Latar Belakang

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia, konservasi berarti pemeliharaan dan perlindungan sesuatu secara teratur untuk mencegah kerusakan dan kemusnahan dengan jalan mengawetkan. Kata konservasi juga bermakna pelestarian. Usaha pelestarian alam di Indonesia dinaungi oleh Undang-Undang nomor 5 tahun 1990 tentang Konservasi Sumberdaya Alam Hayati dan Ekosistemnya serta Undang-Undang nomor 41 tahun 1999 tentang Kehutanan (*jo* Undang-Undang nomor 5 tahun 1967 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Kehutanan). Dalam Undang-Undang nomor 5/1990 dikatakan bahwa sumber daya alam hayati adalah unsur-unsur hayati di alam yang terdiri atas sumber daya alam nabati (tumbuhan) dan sumber daya alam hewani

(satwa) yang bersama dengan unsur nonhayati di sekitarnya secara keseluruhan membentuk ekosistem. Konservasi sumber daya alam hayati dan ekosistemnya dilakukan melalui kegiatan: a) perlindungan sistem penyangga kehidupan yang merupakan satu proses alami dari berbagai unsur hayati dan nonhayati yang menjamin kelangsungan kehidupan makhluk, b) pengawetan keanekaragaman jenis tumbuhan dan satwa beserta ekosistemnya, c) pemanfaatan secara lestari sumber daya alami hayati dan ekosistemnya. Perlindungan sistem penyangga kehidupan ditujukan bagi terpeliharanya proses ekologis yang menunjang kelangsungan kehidupan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan mutu kehidupan manusia. Usaha pewujudan tujuan perlindungan yang dilakukan Pemerintah antara lain dengan cara menetapkan wilayah tertentu sebagai wilayah perlindungan sistem penyangga kehidupan.

Pemerintah Indonesia telah menetapkan sejumlah kawasan konservasi atau hutan konservasi, baik daratan maupun daratan yang memiliki perairan. Menurut Undang-Undang nomor 41/1999, hutan konservasi (kawasan konservasi) adalah kawasan hutan dengan ciri khas tertentu, yang mempunyai fungsi pokok pengawetan keanekaragaman tumbuhan dan satwa serta ekosistemnya yang terdiri dari kawasan suaka alam, kawasan pelestarian alam, dan taman buru. Hingga saat ini pemerintah telah menetapkan 535 unit lokasi kawasan konservasi dengan luas total 28,26 juta hektar (DJPDKA 2007).

Dalam penelitian ini, kawasan (area) konservasi yang dibahas adalah kawasan (area) konservasi di daratan dan sumber daya alami hayati yang dipilih adalah satwaliar yang harus dilindungi. Area konservasi daratan memiliki beberapa tempat yang terpisah yang disebabkan adanya bentang alam seperti adanya lahan pertanian, perkebunan, danau, sungai, dan rawa. Di dalam area konservasi, satwaliar tersebut tersebar di beberapa tempat. Dalam penelitian ini akan dibahas suatu cara dalam memilih tempat-tempat di area konservasi, sedemikian rupa sehingga semua spesies satwaliar terdapat dalam himpunan tempat yang dipilih. Tempat-tempat yang dipilih harus berhubungan dan banyaknya tempat yang dipilih haruslah minimum.

2. Rumusan Masalah

Pemilihan tempat di dalam area konservasi seperti ini dapat diformulasikan sebagai masalah konektivitas (keterhubungan) dan masalah penentuan kover. Masalah keterhubungan direpresentasikan dengan suatu graf dan masalah penentuan kover diformulasikan sebagai *set covering problem* dengan bentuk *integer programming*. Masalah konektivitas tersebut diselesaikan dengan metode heuristik yang terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu (i) penentuan kover (dengan menyelesaikan *integer programming*), (ii) penghubungan tempat-tempat dalam kover (dengan menentukan *minimum spanning tree*), (iii) pemangkasan tempat yang tidak diperlukan (dengan memilih tempat yang bisa dibuang tetapi tempat tersisa tetap berupa kover yang terhubung).

3. Tujuan dan Manfaat

Masalah konektivitas yang dibahas dalam penelitian ini memilih sekumpulan tempat yang terhubung sehingga semua spesies (satwaliar) dapat terwakili di tempat yang terpilih. Tujuan dari pemilihan tempat-tempat yang terhubung dalam area konservasi ialah:

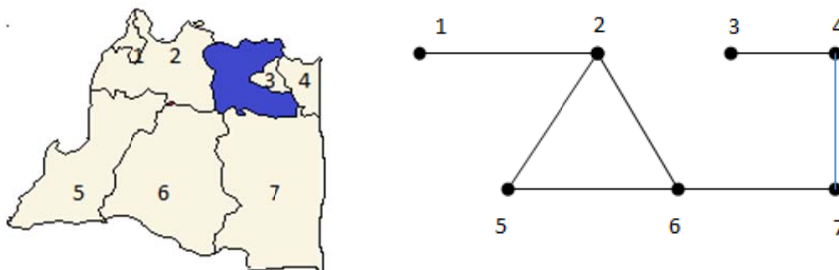
1. menjamin dan menjaga satwa, populasi, dan habitatnya,
2. menjamin keutuhan area konservasi,
3. mengoptimalkan manfaat area konservasi untuk kepentingan penelitian, pendidikan, wisata terbatas, dan kegiatan lainnya yang menunjang budidaya.

Untuk mencapai tujuan tersebut, area konservasi ditata ke dalam zona inti dan zona rimba. Tempat-tempat yang dipilih akan dijadikan sebagai zona inti, sedangkan tempat-tempat yang lainnya dijadikan sebagai zona rimba. Zona inti merupakan zona yang berfungsi untuk perlindungan mutlak dan tidak diperkenankan adanya perubahan apapun oleh kegiatan manusia. Perubahan dan perkembangan yang terjadi di area ini berjalan secara alami tanpa campur tangan manusia, kecuali untuk kegiatan penelitian, pemantauan, perlindungan, dan pengamanan (DJPHKA 2007). Zona rimba adalah zona yang berfungsi sebagai penyangga zona inti dan di dalamnya hanya dapat dilakukan kegiatan sebagaimana pada zona inti, serta dapat dikunjungi oleh masyarakat untuk kegiatan rekreasi terbatas. Di dalam zona rimba dapat dilakukan kegiatan pengelolaan seperti pembinaan habitat dan populasi satwa dan tumbuhan, pembuatan jalan setapak, menara pengawas, pondok jaga, dan sarana wisata.

4. Pembahasan

Teori graf merupakan salah satu cabang matematik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah konektivitas (keterhubungan). Dalam (Chartrand & Oellermann 1993) diberikan beberapa pengertian yang diperlukan dalam pembahasan materi penelitian ini. Berikut diberikan beberapa di antaranya. Graf dilambangkan dengan verteks/simpul dan sisi, dan biasa dituliskan sebagai pasangan terurut $G=(V,E)$ dengan V merupakan himpunan verteks dan E menyatakan himpunan sisi (*edge*). Dalam graf tak berarah, sisi $\{u,v\}$ merupakan pasangan tak terurut yang menghubungkan verteks-verteks u dan v di V . Dua verteks u dan v dikatakan *adjacent* jika terdapat suatu sisi yang menghubungkan kedua verteks tersebut. Suatu graf dikatakan terhubung (*connected*) jika setidaknya ada satu *path* yang menghubungkan setiap pasangan simpul pada graf tersebut. Jika tidak ada, maka graf tersebut dikatakan tidak terhubung (*disconnected*). Suatu *path* adalah barisan verteks yang berbeda sehingga merupakan suatu sisi di graf tersebut. *Path* dengan verteks awal sama dengan verteks akhir dinamakan suatu *cycle*. Graf yang terhubung dan tidak mempunyai *cycle* dinamakan *tree*. Suatu *spanning tree* adalah *tree* yang memuat semua verteks grafnya, sedangkan *minimum spanning tree* adalah *spanning tree* dengan bobot minimum.

Suatu area konservasi (yang berisi banyak tempat) dapat dimodelkan dengan graf. Verteks melambangkan tempat dalam area konservasi, dan sisi melambangkan akses jalan yang menghubungkan tempat-tempat dalam area konservasi. Dua tempat dikatakan *adjacent* jika terdapat akses jalan langsung di antara keduanya. Sebagai ilustrasi, misalkan diberikan denah 7 tempat dalam suatu daerah seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah 7 tempat dan representasi grafnya.

Jika dua tempat saling bertetangga, maka diasumsikan tempat-tempat tersebut adalah *adjacent*. Ini juga berarti di antara dua tempat tersebut terdapat akses jalan langsung di antara keduanya, sehingga denah tempat dan representasi grafnya dapat dilihat pada Gambar 1.

Masalah penentuan himpunan kover (*set covering problem*) merupakan salah satu kelas *integer programming*. Dalam masalah ini, setiap elemen dari suatu himpunan yang diberikan (disebut himpunan ke-1) harus “dikover” oleh sejumlah anggota dari himpunan ke-2. Tujuan dari masalah ini adalah meminimumkan banyaknya elemen dari himpunan ke-2 yang diperlukan untuk mengkover semua elemen dalam himpunan ke-1. Berikut ini akan dibahas pengertian kover.

Misalkan diberikan suatu himpunan $S = \{1, 2, \dots, n\}$. Misalkan juga elemen dari himpunan I merupakan himpunan bagian dari S , yaitu himpunan $I = \{I_1, I_2, \dots, I_K\}$ dengan $I_j \subseteq S, j \in J = \{1, 2, \dots, K\}$. Himpunan I_j dengan $j \in J^* \subseteq J$ adalah **cover** dari S jika $\bigcup_{j \in J^*} I_j = S$ (Garfinkel & Nemhauser 1972). Sebagai contoh, misalkan himpunan $S = \{a, b, c, d, e, f\}$ dan $I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}$ dengan $j \in J = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Misalkan $I_1 = \{a, b\}$, $I_2 = \{a, c\}$, $I_3 = \{b, e\}$, $I_4 = \{d, e, f\}$, $I_5 = \{a, c, f\}$. Kover dari S di antaranya adalah $\{I_1, I_2, I_4\}$, karena $\bigcup_{j \in J^*} I_j = I_1 \cup I_2 \cup I_4 = \{a, b, c, d, e, f\} = S$ untuk $J^* = \{1, 2, 4\}$. Himpunan $\{I_1, I_2, I_3, I_4\}$ juga merupakan kover dari S .

Misalkan diberikan $c_j > 0$ yaitu bobot yang berpadanan dengan setiap I_j , dengan $j \in J$. Bobot total dari suatu kover $\{I_j\}$ untuk $j \in J^*$ adalah $\sum_{j \in J^*} c_j$ dengan J^* adalah himpunan bagian dari J . Masalah *set covering* merupakan suatu masalah menentukan kover dengan bobot minimum yang dapat diformulasikan sebagai *integer programming*. Misalkan didefinisikan variabel biner

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{jika } I_j \text{ anggota dari kover} \\ 0, & \text{jika selainnya,} \end{cases}$$

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{jika } i \text{ elemen dari } I_j \\ 0, & \text{jika selainnya.} \end{cases}$$

Dalam (Wolsey 1998) masalah *set covering* dituliskan sebagai:

Minimumkan $z = \sum_{j=1}^K c_j x_j$ terhadap kendala $\sum_{j=1}^K a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, m,$ dan $x_j = 0$ atau $1, \quad j = 1, \dots, K.$

Metode Penyelesaian

Masalah konektivitas dalam penelitian ini diselesaikan dengan algoritme heuristik. Sebelum menyelesaikan masalahnya, mula-mula area konservasi dibuat representasi grafnya. Metode yang digunakan terdiri atas 3 langkah utama. Langkah 1: **penentuan kover** dengan menyelesaikan *set covering problem* yaitu dengan menyelesaikan *integer programming* (P1) menggunakan *software* LINGO; Langkah 2: **penyambungan kover** yang tidak terhubung dengan *path* terpendek antarverteks, misalkan Q , dalam kover yang tak terhubung (dapat digunakan algoritme Dijkstra); dan Langkah 3: **pemangkasan/penghapusan** bagian kover yang tidak diperlukan. Langkah 3 ini diselesaikan dalam beberapa tahap, yaitu 3a) penentuan verteks-verteks yang *adjacent* hanya dengan 1 (satu) verteks dalam *path* terpendek Q , 3b) periksa satu per satu apakah penghapusan verteks tersebut dapat membuat Q bukan lagi kover yang terhubung. Jika ya, verteks tersebut tidak jadi dihapus; dan tahap 3c) melakukan hal yang sama untuk kover terhubung yang baru.

Aplikasi Permasalahan

Masalah konektivitas yang dibahas pada penelitian ini diaplikasikan dalam pemilihan tempat di area konservasi yang terletak di Provinsi Jambi (I), Riau (II), dan Sumatera Barat (III). Area konservasi pada Gambar 2 dibagi menjadi beberapa wilayah (kabupaten). Data kabupaten beserta satwaliar yang ada di kabupaten tersebut diberikan di Tabel 1, sedangkan daerah penyebaran satwaliar disajikan dalam Tabel 2.



iten di
bi,
n di
l,
n di
atera

Gambar 2 Peta Kabupaten-kabupaten di Jambi (I), Riau (II), dan Sumatera Barat (III).

Tabel 1 Nama-nama kabupaten beserta 10 spesies satwaliar yang ada di Provinsi Jambi, Riau, dan Sumatera Barat

No	Nama Kabupaten	Provinsi	Spesies satwaliar
1	Kerinci	Jambi	rangkong, harimau sumatera, badak sumatera, beruang madu, kucing emas, tapir, elang alap, gajah sumatera.
2	Merangin	Jambi	rangkong, harimau sumatera, badak sumatera, beruang madu, kucing emas, tapir, elang alap, gajah sumatera.
3	Sarolangun	Jambi	harimau sumatera, beruang madu, siamang.
4	Batang Hari	Jambi	harimau sumatera, beruang madu, siamang.
5	Muara Jambi	Jambi	harimau sumatera, badak sumatera, kancil, tapir.
6	Tanjung Jabung Timur	Jambi	rangkong, harimau sumatera, siamang, kancil.
7	Tanjung Jabung Barat	Jambi	harimau sumatera, badak sumatera, kancil, tapir.
8	Bungo	Jambi	rangkong, harimau sumatera, beruang madu, siamang, kancil.
9	Tebo	Jambi	rangkong, siamang, kancil.
10	Kampar	Riau	beruang madu, siamang, kancil, tapir.
11	Kuantan Singingi	Riau	harimau sumatera, beruang madu, siamang, kancil, tapir.

Tabel 1 Nama-nama kabupaten beserta 10 spesies satwaliar yang ada di Provinsi Jambi Riau dan Sumatera Barat (lanjutan)

No	Nama Kabupaten	Provinsi	Spesies satwaliar
12	Indragiri Hilir	Riau	rangkong, siamang, kancil.

13	Indragiri Hulu	Riau	rangkong, harimau sumatera, siamang, kancil, tapir.
14	Pelalawan	Riau	beruang madu, kancil, tapir.
15	Pesisir Selatan	Sumatera Barat	rangkong, harimau sumatera, badak sumatera, beruang madu, kucing emas, tapir, elang alap, gajah sumatera.
16	Solok	Sumatera Barat	rangkong, harimau sumatera, badak sumatera, beruang madu, kucing emas, tapir, elang alap, gajah sumatera.
17	Sawahlunto	Sumatera Barat	rangkong, harimau sumatera, badak sumatera, beruang madu, kucing emas, tapir, gajah sumatera.
18	Agam	Sumatera Barat	rangkong, harimau sumatera, siamang, tapir.
19	Tanah Datar	Sumatera Barat	harimau sumatera, siamang, kancil.
20	Padang Pariaman	Sumatera Barat	harimau sumatera, beruang madu.

Sumber: [DJPHKA 2007].

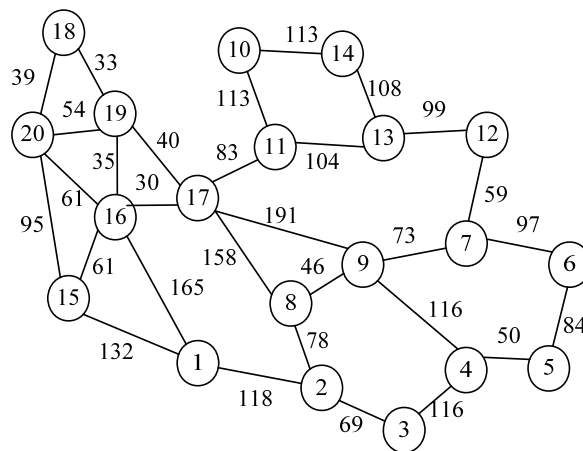
Tabel 2 Penyebaran spesies pada Gambar 2

Spesies	Tempat penyebaran spesies
Rangkong	1,2,6,8,9,12,13,15,16,17,18
Harimau sumatera	1,2,3,4,5,6,7,8,11,13,15,16,17,18,19,20
Badak sumatera	1,2,5,7,15,16,17
Beruang madu	1,2,3,4,8,10,11,14,15,16,17,20
Kucing emas	1,2,15,16,17
Siamang	3,4,6,8,9,10,11,12,13,18,19
Kancil	5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,19
Tapir	1,2,5,7,10,11,13,14,15,16,17,18
Elang alap	1,2,15,16
Gajah sumatera	1,2,15,16,17

Sumber: [DJPHKA 2007].

Penyelesaian Masalah Konektivitas dengan Algoritme Heuristik

Terlebih dahulu ditentukan representasi graf dari area konservasi seperti terlihat pada Gambar 3. Representasi graf dilakukan dengan memisalkan area konservasi pada kabupaten-kabupaten di provinsi Jambi, Riau, dan Sumatera Barat sebagai verteks-verteks di graf G_1 , sedangkan akses/jalan dimisalkan sebagai sisi-sisi graf G_1 yang menghubungkan dua kabupaten dengan bobot pada sisi graf menyatakan jarak (dalam km) di antara 2 kabupaten. Verteks i mewakili area pada kabupaten ke- i , dengan $i=1,2,\dots,20$.



Gambar 3 Representasi graf dari area konservasi pada Gambar 3.

LANGKAH 1 Penentuan Kover

Misalkan V_{is} adalah area pada kabupaten i yang dihuni oleh satwaliar s , dengan $i=1,2,\dots,20$ dan s adalah satwaliar yang dilindungi. Misalkan bobot untuk setiap kabupaten adalah sama, yaitu 1. Didefinisikan variabel biner x_i , yaitu:

$$x_i = \begin{cases} 1 & ; \text{ Jika area konservasi} \\ & \text{ pada kabupaten } i \text{ yang dipilih} \\ 0 & ; \text{ jika area konservasi} \\ & \text{ pada kabupaten } i \text{ yang tidak dipilih} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,20.$$

Fungsi objektifnya adalah meminimumkan banyaknya kabupaten yang terpilih:

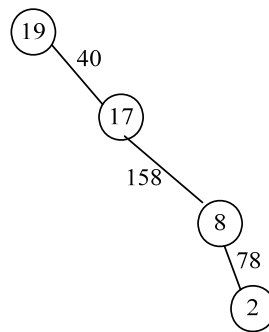
Minimumkan $\sum_{i=1}^{20} x_i$ dengan kendala $\sum_{i \in K} x_i \geq 1, K \subseteq V_{is}, \forall$ satwaliar s .

Kendala ini menyatakan bahwa setiap satwaliar paling sedikit berada pada satu kabupaten. Sebagai contoh: untuk satwaliar elang alap, $K=\{1,2,15,16\}$ sehingga

kendalanya ialah $x_1 + x_2 + x_{15} + x_{16} \geq 1$. Karena ada 10 satwaliar yang dipilih, maka terdapat 10 kendala seperti ini. Dengan LINGO diperoleh solusi: $x_2 = 1$ dan $x_{19} = 1$ dan variabel lainnya bernilai 0. Ini berarti area yang terpilih sebagai kover adalah Kabupaten Merangin dan Kabupaten Tanah Datar. Dari Gambar 3 diketahui bahwa dua kabupaten ini tidak *adjacent*. Jadi kover yang diperoleh adalah kover tak terhubung.

LANGKAH 2 Penyambungan kover tidak terhubung

Dengan algoritme Dijkstra diperoleh *path* terpendek dari verteks 2 ke verteks 19 yaitu $Q=2-8-17-19$ dengan total jarak 276 km. Solusi ini merupakan kover terhubung.



Gambar 4 *Path* terpendek dari simpul 2 ke simpul 19.

LANGKAH 3 Pemangkasan/Penghapusan Verteks

Verteks yang *adjacent* dengan 1 (satu) verteks di *path* terpendek Q ialah verteks 2 dan verteks 19. Hapus sementara salah satu verteks, misalkan verteks 2, sehingga himpunan verteks yang tersisa ialah $\{8, 17, 19\}$ yang bukan kover karena pada himpunan tempat tersebut tidak terdapat satwaliar elang alap; berarti verteks 2 tidak dapat dihapus. Jadi, himpunan verteks yang diperoleh tetap $\{2, 8, 17, 19\}$. Sekarang, hapus sementara verteks 19, sehingga himpunannya menjadi $\{2, 8, 17\}$. Himpunan ini merupakan kover terhubung. Karena $\{2, 8, 17\}$ merupakan kover terhubung, maka verteks 19 dapat dihapus sehingga *path* terpendek Q berubah jadi *path* terpendek $Q_{\text{baru}} = 2-8-17$. Ulangi tahapan tadi, sehingga diperoleh hasil akhir kover terhubungnya adalah $\{2, 8\}$. Ini berarti area konservasi yang dipilih adalah area yang berada di Kabupaten Merangin dan Kabupaten Bungo dengan total jarak 78 km yang akan dijadikan sebagai zona inti, sedangkan area konservasi yang berada di kabupaten lain dapat dijadikan zona rimba.

5. Simpulan dan Saran

Pada penelitian ini dibahas penyelesaian masalah konektivitas, yaitu masalah menentukan suatu kover terhubung minimum, dengan algoritme heuristik yang terdiri atas tiga langkah utama: penentuan kover, penyambungan kover tak terhubung, dan pemangkasan. Masalah konektivitas pada penelitian ini dapat diaplikasikan pada masalah pemilihan tempat di dalam area konservasi di 20 kabupaten di provinsi Jambi, Riau, dan Sumatera Barat untuk melestarikan 10 satwaliar yang dilindungi. Kover terhubung minimum yang dihasilkan meliputi sekumpulan tempat yang terhubung dan semua spesiesnya terdapat pada tempat-tempat yang dipilih. Hasil yang didapat dari algoritme heuristik pada contoh permasalahan diperoleh 2 tempat yang terpilih, yaitu Kabupaten Merangin dan Kabupaten Bungo.

6. Daftar Pustaka

- Cerdeira JO, Gaston KJ, Pinto LS. 2005. Connectivity in priority area selection for conservation. *Environmental Modelling and Assessment* 10:183-192.
- Chartrand G, Oellermann OR. 1993. *Applied and Algorithmic Graph Theory*. New York: McGraw-Hill.
- DJPHKA. 2007. *Kawasan Konservasi Indonesia 2006*. Direktorat Jenderal Perlindungan Hutan dan Konservasi Alam, Departemen Kehutanan Republik Indonesia.
- Wolsey LA. 1998. *Integer Programming*. New York: John Wiley & Son.