

Aplikasi Graf Dalam Siklus Karbon

Innani Yudho'afi (13511054)
Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia
13511054@std.stei.itb.ac.id

Abstrak— Makalah ini membahas tentang graf, siklus karbon, serta aplikasi graf untuk representasi siklus karbon. Aplikasi graf di kehidupan dan teknologi sangatlah banyak. Contohnya, dengan teori graf, kita dapat menentukan lintasan terpendek yang ingin kita tempuh pada suatu graf. Siklus karbon di alam sangatlah rumit, agar mudah dipahami dan dianalisa, siklus karbon dapat direpresentasikan menggunakan graf.

Kata Kunci— Teori graf, siklus karbon, reservoir.

I. TEORI GRAF

Graf adalah struktur diskrit yang terdiri dari beberapa simpul dan beberapa sisi yang menghubungkan simpul-simpul tersebut. Berikut adalah definisi graf : “Sebuah graf $G = (V,E)$ terdiri dari V , sebuah himpunan tidak kosong dari simpul dan E , sebuah himpunan sisi. Setiap sisi mempunyai satu atau dua simpul yang dihubungkan, disebut titik akhir. Sebuah sisi dikatakan terhubung titik akhirnya.”

Himpunan simpul V dari graf G bisa tak terhingga banyaknya. Sebuah graf dengan tak berhingga himpunan simpul atau tak berhingga jumlah himpunan sisi disebut graf tak berhingga, dan sebaliknya, sebuah graf dengan sejumlah berhingga simpul dan berhingga himpunan sisi, disebut graf berhingga.

Sebuah graf yang setiap sisinya menghubungkan dua simpul berbeda dan tidak ada dua sisi yang menghubungkan pasangan simpul yang sama disebut graf sederhana. Dalam graf sederhana, setiap sisi terhubung ke sebuah pasangan simpul yang tidak terurut, dan tidak ada sisi lain yang terhubung ke simpul ini. Akibatnya, ketika terdapat sebuah sisi dari graf sederhana terhubung ke $\{u,v\}$, kita dapat katakan, bahwa $\{u,v\}$ tersebut adalah sebuah sisi pada graf.

Graf yang memiliki lebih dari satu sisi yang menghubungkan simpul yang sama disebut multigraf (graf ganda). Ketika terdapat m sisi berbeda terhubung ke pasangan simpul tak terurut yang sama $\{u,v\}$, kita dapat katakan bahwa $\{u,v\}$ merupakan sisi dari m keberagaman. Oleh karena itu, kita dapat berpikir himpunan sisi ini sebagai m tiruan berbeda dari sebuah sisi $\{u,v\}$.

Sisi yang menghubungkan simpul ke simpul itu sendiri disebut loop, dan terkadang kita dapat memiliki lebih dari satu loop di suatu simpul. Graf dapat mengandung loop, dan lebih dari satu sisi menghubungkan pasangan simpul

yang sama ke dirinya sendiri, biasanya disebut pseudograf (graf semu).

Semua graf yang dibahas di atas adalah graf tak berarah. Sisi-sisi pada graf tersebut tidak mempunyai arah. Selain graf tak berarah, terdapat graf berarah, yang setiap sisinya ada arahnya. Definisi graf berarah : “Sebuah graf berarah (digraf) (V,E) terdiri dari himpunan tidak kosong dari beberapa simpul V dan himpunan dari sisi berarah (busur) E . Setiap sisi berarah terhubung dengan sebuah pasangan simpul terurut. Sisi berarah terhubung dengan pasangan terurut (u,v) berarti dimulai di u dan berakhir di v .”

Graf berarah bisa jadi merupakan graf berarah sederhana atau graf berarah ganda. Jika sebuah graf berarah tidak memiliki loop dan tidak mempunyai sisi berarah ganda, disebut graf berarah sederhana. Karena sebuah graf berarah sederhana memiliki paling banyak satu sisi terhubung ke setiap pasangan simpul terurut (u,v) , kita sebut (u,v) sebuah sisi jika terdapat sebuah sisi terhubung ke sisi itu pada graf. Graf berarah ganda adalah graf yang mempunyai lebih dari satu sisi berarah dari satu simpul ke simpul lain. Ketika terdapat sisi berarah sebanyak m , setiap sisi terhubung ke sebuah pasangan simpul terurut (u,v) , kita sebut (u,v) adalah sebuah sisi dari m keberagaman. Terdapat juga graf campuran, yaitu graf yang mengandung sisi tak berarah dan sisi berarah.

Tabel I Jenis Graf

Jenis	Sisi	Sisi ganda	Loop
Graf sederhana	Tak berarah	Tidak	Tidak
Graf ganda	Tak berarah	Ya	Tidak
Graf semu	Tak berarah	Ya	Ya
Graf berarah sederhana	Berarah	Tidak	Tidak
Graf berarah ganda	Berarah	Ya	Ya
Graf campuran	Berarah dan tak berarah	Ya	Ya

Berikut adalah beberapa terminologi graf :

1. Ketetanggaan
Dua buah simpul u dan v dikatakan bertetangga jika keduanya terhubung langsung oleh suatu sisi pada graf.
2. Bersisian

Suatu sisi (u,v) pada graf dikatakan bersisian dengan simpul u dan simpul v . Sisi tersebut menghubungkan simpul u dan simpul v .

3. Simpul terpercil

Simpul terpercil adalah yang tidak memiliki sisi yang bersisian dengannya, dengan kata lain, simpul tersebut tidak terhubung dengan simpul lain.

4. Graf kosong

Sebuah graf disebut graf kosong jika tidak terdapat sisi pada graf tersebut, hanya terdapat simpul.

5. Derajat

Suatu simpul memiliki derajat, yaitu jumlah sisi yang bersisian dengannya. Derajat simpul mempunyai notasi $d(v)$. Jika $d(v)$ suatu simpul sama dengan nol, maka dapat disimpulkan bahwa simpul tersebut merupakan simpul terpercil. Jika $d(v)=1$, maka simpul merupakan simpul anting-anting.

Pada graf berarah, terdapat dua derajat simpul, yaitu derajat masuk, $d_{in}(v)$, dan derajat keluar $d_{out}(v)$. Derajat masuk adalah jumlah busur yang masuk ke simpul v , sedangkan derajat keluar merupakan jumlah busur yang keluar dari simpul v . Derajat simpul dari graf berarah, $d(v)$ adalah $d_{in}(v)$ ditambah $d_{out}(v)$.

Teorema 1 (teorema jabat tangan) : Misalkan $G = (V,E)$ merupakan graf tak berarah dengan m sisi. Maka

$$2m = \sum_{v \in V} \deg(v)$$

Teorema 2 : untuk sembarang graf G , banyaknya simpul berderajat ganjil selalu genap.

6. Lintasan (path)

Lintasan dengan panjang n dari simpul awal v_0 ke simpul akhir v_n pada graf G adalah barisan berselang-seling simpul-sisi yang berbentuk $v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n$ sedemikian sehingga $e_1 = (v_0, v_1), e_2 = (v_1, v_2), \dots, e_n = (v_{n-1}, v_n)$ adalah sisi-sisi pada graf G . Panjang lintasan adalah jumlah sisi yang dilalui lintasan tersebut.

7. Sirkuit

Sirkuit adalah lintasan yang simpul awal dan simpul akhir adalah suatu simpul yang sama. Panjang sirkuit adalah jumlah sisi yang dilalui sirkuit tersebut.

8. Terhubung

Dua buah simpul u dan v dikatakan terhubung jika terdapat lintasan yang menghubungkan u dan v . Graf G disebut graf terhubung jika untuk setiap pasang simpul v_i dan v_j pada himpunan V terdapat lintasan yang menghubungkan v_i dan v_j . Jika tidak, graf G dikatakan graf tak terhubung. Graf berarah G dikatakan terhubung jika graf tak berarahnya merupakan graf terhubung, dan sebaliknya.

Dua simpul u dan v pada graf berarah G disebut terhubung kuat jika terdapat lintasan berarah tertentu yang menghubungkan u ke v dan terdapat lintasan berarah dari v menuju u . Jika simpul u dan v tidak

terhubung kuat, tetapi terhubung, maka u dan v dikatakan terhubung lemah. Graf berarah G terhubung kuat jika semua pasangan simpul di G terhubung kuat. Jika tidak, tetapi G terhubung pada graf tak berarahnya, maka G dikatakan terhubung lemah.

9. Upagraf (subgraf) dan komplemennya

Upagraf dari graf $G = (V,E)$ adalah sebuah graf $H = (W,F)$, dimana W adalah himpunan bagian dari V dan F adalah himpunan bagian dari E . Komplemen dari upagraf H terhadap graf G adalah $I = (X,J)$ sedemikian sehingga $J = E - F$ dan X merupakan himpunan simpul yang anggota J bersisian dengan simpul tersebut.

10. Upagraf rentang

Sebuah graf F dikatakan upagraf rentang dari graf G jika himpunan simpul pada graf F sama dengan himpunan simpul pada graf G , dan himpunan sisi graf F lebih sedikit dari graf G .

11. Cut-Set

Pada sebuah graf terhubung G , cutset dari G adalah himpunan sisi yang bila dibuang dari G menyebabkan graf G menjadi tidak terhubung.

12. Graf Berbobot

Graf berbobot adalah graf yang setiap sisinya mengandung sebuah nilai (bobot) tertentu.

Beberapa graf khusus :

1. Graf Lengkap

Graf lengkap adalah graf sederhana yang setiap simpulnya bertetangga dengan semua simpul lainnya, atau setiap simpulnya mempunyai sisi yang menghubungkannya ke semua simpul lainnya. Graf lengkap dengan n buah simpul dilambangkan dengan K_n . Jumlah sisi graf lengkap dengan n buah simpul adalah $n(n-1)/2$.

2. Graf Lingkaran

Graf lingkaran adalah graf sederhana yang setiap simpulnya mempunyai derajat 2 dan saling terhubung. Graf lingkaran dengan n simpul dilambangkan dengan C_n .

3. Graf Teratur

Graf teratur adalah graf yang setiap simpulnya mempunyai derajat yang sama. Jumlah sisi pada graf teratur adalah $nr/2$ dengan n adalah jumlah simpul graf dan r adalah derajat simpul.

4. Graf Bipartit

Graf bipartit adalah graf yang himpunan simpulnya dapat dikelompokkan menjadi dua himpunan bagian, sedemikian sehingga setiap sisi pada graf menghubungkan simpul dari dua himpunan bagian yang berbeda.

Dua buah graf, G dan F , dikatakan isomorfik jika dua graf tersebut sama tetapi secara geometri berbeda, yaitu terdapat korespondensi satu-satu antara simpul di kedua graf dan sisi di kedua graf sedemikian sehingga hubungan kebersisian tetap terjaga. Sebuah graf dapat digambarkan dalam banyak cara yang berbeda.

Sebuah graf dikatakan graf planar jika graf tersebut

dapat digambarkan pada suatu bidang datar dengan tidak ada sisi yang saling berpotongan. Jika tidak, maka graf tersebut merupakan graf tak planar.

Lintasan Euler adalah lintasan yang melalui setiap sisi di dalam graf tepat satu kali. Sirkuit Euler adalah sirkuit yang melewati setiap sisi pada graf tepat satu kali. Graf yang mempunyai sirkuit Euler disebut graf Euler dan graf yang mempunyai lintasan Euler disebut graf semi-Euler.

Teorema 1 : sebuah graf ganda terhubung dengan paling sedikit dua simpul mempunyai sebuah sirkuit Euler jika dan hanya jika setiap simpul mempunyai derajat genap.

Teorema 2 : sebuah graf ganda terhubung mempunyai sebuah lintasan Euler tetapi bukan sirkuit Euler jika dan hanya jika graf tersebut mempunyai tepat dua simpul berderajat ganjil.

Lintasan Hamilton adalah lintasan yang melalui setiap simpul pada suatu graf tepat satu kali. Sirkuit Hamilton adalah sirkuit yang melalui setiap simpul pada graf tepat satu kali. Graf yang mempunyai sirkuit Hamilton disebut graf Hamilton, dan graf yang hanya memiliki lintasan Hamilton disebut graf semi-Hamilton.

Teorema 3 : Jika G adalah sebuah graf sederhana dengan n buah simpul dengan $n \geq 3$ sedemikian sehingga derajat dari setiap simpul pada G paling sedikit $n/2$, maka G mempunyai sirkuit Hamilton.

Teorema 4 : Jika G adalah sebuah graf sederhana dengan n buah simpul dengan $n \geq 3$ sedemikian sehingga $\deg(u) + \deg(v) \geq n$ untuk setiap pasangan simpul tak bertetangga u dan v di G , maka G mempunyai sirkuit Hamilton.

II. SIKLUS KARBON

Siklus biogeokimia adalah proses perubahan suatu materi dari satu bentuk ke bentuk lainnya yang melibatkan makhluk hidup, air, tanah, udara, dan batuan. Siklus biogeokimia terdiri dari siklus karbon, siklus oksigen, siklus air, siklus nitrogen, siklus belerang, dan siklus fosfor.

Siklus karbon adalah siklus biogeokimia dimana karbon berpindah-pindah dari biosfer, geosfer, hidrosfer, dan atmosfer Bumi. Karbon tersimpan di reservoir (tempat penampungan) yang ada di biosfer, geosfer, hidrosfer, atau atmosfer Bumi. Terdapat empat reservoir utama karbon, yaitu atmosfer, biosfer terestrial, lautan, dan sedimen.

Pergerakan karbon dan pertukaran karbon dari satu reservoir ke reservoir lain terjadi karena proses-proses kimia, fisika, geologi, dan biologi yang bermacam-macam. Laut merupakan kolam aktif karbon terbesar, namun laut mengalami pertukaran karbon yang lambat dengan atmosfer.

Sebagian besar karbon yang berada di atmosfer berupa gas karbon dioksida (CO_2). Meskipun jumlah gas ini relatif sangat kecil jika dibandingkan dengan seluruh gas yang ada di atmosfer (hanya sekitar 0.04%), namun gas ini memiliki peran yang sangat penting. Gas-gas lain yang mengandung karbon di atmosfer adalah gas metan dan

klorofluorokarbon atau CFC (merupakan gas buatan). Gas karbon dioksida dan gas metan merupakan gas rumah kaca yang konsentrasinya di atmosfer sudah sangat tinggi dan menyebabkan pemanasan global.

Karbon diambil dari atmosfer dengan beberapa cara, antara lain :

- Fotosintesis yang dilakukan tumbuhan. Pada siang hari, ketika matahari bersinar, tumbuhan melakukan fotosintesis, tumbuhan mengambil karbon dioksida dari luar untuk diubah menjadi karbohidrat dan mengeluarkan oksigen ke udara sebagai hasil akhir fotosintesis. Proses ini akan lebih banyak menyerap karbon dari atmosfer pada daerah hutan dengan tumbuhan muda atau hutan dengan pertumbuhan yang cepat.
- Pada permukaan laut ke arah kutub, air laut akan menjadi lebih dingin dan CO_2 akan lebih mudah larut di air dingin. Selanjutnya CO_2 yang larut dalam air tersebut akan terbawa oleh siklus termohalin.
- Di laut bagian atas, pada daerah dengan produktivitas tinggi karena sinar matahari dapat masuk, organisme membentuk jaringan yang mengandung karbon, beberapa organisme juga membentuk cangkang karbonat dan bagian tubuh lainnya yang keras. Proses ini akan menyebabkan aliran karbon ke bawah.
- Pelapukan batuan silikat. Proses ini mengembalikan karbon ke dalam reservoir yang siap untuk mengirimkan karbon kembali ke atmosfer. Pelapukan batuan karbonat tidak memiliki efek terhadap CO_2 di atmosfer karena ion bikarbonat yang terbentuk larut dalam air laut, yang selanjutnya digunakan untuk membuat karbonat laut dengan reaksi bolak-balik.

Karbon dapat juga kembali ke atmosfer dengan berbagai cara pula, antara lain :

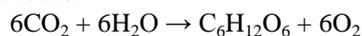
- Melalui respirasi (pernapasan) makhluk hidup, binatang dan tumbuhan. Proses respirasi merupakan reaksi eksotermik, dalam proses ini terjadi penguraian karbohidrat menjadi karbon dioksida dan air.
- Pembusukan makhluk hidup, misalnya tumbuhan dan binatang. Jamur dan bakteri mengurai tubuh tumbuhan dan binatang yang telah mati, mengubah senyawa karbon menjadi karbon dioksida jika oksigen tersedia, atau mengubahnya menjadi metana jika tidak tersedia oksigen.
- Pembakaran material organik, proses ini akan mengoksidasi karbon yang terkandung dalam material, menghasilkan karbon dioksida. Pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, berbagai macam produk hasil industri perminyakan, dan gas alam akan melepas karbon yang telah tersimpan selama jutaan tahun di geosfer ke udara. Pembakaran bahan bakar fosil ini menyebabkan jumlah karbon di atmosfer

meningkat secara drastis.

- Produksi semen. Dalam produksi semen, gamping atau kalium oksida dihasilkan dengan cara memanaskan batu kapur atau batu gamping, sehingga menghasilkan banyak karbon dioksida ke udara atau atmosfer.
- Di permukaan laut, air menjadi lebih hangat, hal ini menyebabkan karbon dioksida yang terlarut di air dilepas kembali ke atmosfer.
- Erupsi vulkanik atau ledakan gunung berapi akan melepaskan gas ke atmosfer. Gas-gas antara lain uap air, karbon dioksida, dan belerang. Jumlah karbon dioksida yang dilepas ke atmosfer secara kasar hampir sama dengan jumlah karbon dioksida yang hilang dari atmosfer akibat pelapukan silikat. Kedua proses kimia ini yang saling berkebalikan ini akan memberikan hasil penjumlahan yang sama dengan nol dan tidak berpengaruh terhadap jumlah karbon dioksida di atmosfer dalam skala waktu yang kurang dari 100.000 tahun.

Sekitar 1900 gigaton karbon ada di dalam biosfer. Karbon adalah bagian yang penting dalam kehidupan di Bumi. Ia memiliki peran yang penting dalam struktur, biokimia, dan nutrisi pada semua sel makhluk hidup. Dan kehidupan memiliki peranan yang penting dalam siklus karbon:

- *Autotroph* adalah organisme yang menghasilkan senyawa organik sendiri dengan menggunakan karbon dioksida yang berasal dari udara dan air di sekitar tempat mereka hidup. Untuk menghasilkan senyawa organik tersebut mereka membutuhkan sumber energi dari luar. Hampir sebagian besar *autotroph* menggunakan radiasi matahari untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut, dan proses produksi ini disebut sebagai fotosintesis. Sebagian kecil *autotroph* memanfaatkan sumber energi kimia, dan disebut kemosintesis. *Autotroph* yang terpenting dalam siklus karbon adalah pohon-pohonan di hutan dan daratan dan fitoplankton di laut. Fotosintesis memiliki reaksi



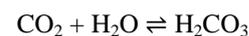
- Karbon dipindahkan di dalam biosfer sebagai makanan heterotrophi pada organisme lain atau bagiannya (seperti buah-buahan). Termasuk di dalamnya pemanfaatan material organik yang mati (detritus) oleh jamur dan bakteri untuk fermentasi atau penguraian.
- Sebagian besar karbon meninggalkan biosfer melalui pernapasan atau respirasi. Ketika tersedia oksigen, respirasi aerobik terjadi, yang melepaskan karbon dioksida ke udara atau air di sekitarnya dengan reaksi $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$. Pada keadaan tanpa oksigen, respirasi anaerobik lah yang terjadi, yang melepaskan metana ke lingkungan sekitarnya yang akhirnya berpindah ke atmosfer

atau hidrosfer.

- Pembakaran biomassa (seperti kebakaran hutan, kayu yang digunakan untuk tungku pemanas atau kayu bakar, dll.) dapat juga memindahkan karbon ke atmosfer dalam jumlah yang banyak.
- Karbon juga dapat berpindah dari biosfer ketika bahan organik yang mati menyatu dengan geosfer (seperti gambut). Cangkang binatang dari kalsium karbonat yang menjadi batu gamping melalui proses sedimentasi.
- Sisanya, yaitu siklus karbon di laut dalam, masih dipelajari. Sebagai contoh, penemuan terbaru bahwa rumah larva cacing (biasa dikenal sebagai "sinkers") dibuat dalam jumlah besar yang mana mampu membawa banyak karbon ke laut dalam seperti yang terdeteksi oleh perangkap sedimen. Karena ukuran dan komposisinya, rumah ini jarang terbawa dalam perangkap sedimen, sehingga sebagian besar analisis biokimia melakukan kesalahan dengan mengabaikannya.

Penyimpanan karbon di biosfer dipengaruhi oleh sejumlah proses dalam skala waktu yang berbeda: sementara produktivitas primer netto mengikuti siklus harian dan musiman, karbon dapat disimpan hingga beberapa ratus tahun dalam pohon dan hingga ribuan tahun dalam tanah. Perubahan jangka panjang pada kolam karbon (misalnya melalui *de-* atau *afforestation*) atau melalui perubahan temperatur yang berhubungan dengan respirasi tanah) akan secara langsung memengaruhi pemanasan global.

Laut mengandung sekitar 36.000 gigaton karbon, dimana sebagian besar dalam bentuk ion bikarbonat. Karbon anorganik, yaitu senyawa karbon tanpa ikatan karbon-karbon atau karbon-hidrogen, adalah penting dalam reaksinya di dalam air. Pertukaran karbon ini menjadi penting dalam mengontrol pH di laut dan juga dapat berubah sebagai sumber (*source*) atau lubang (*sink*) karbon. Karbon siap untuk saling dipertukarkan antara atmosfer dan lautan. Pada daerah *upwelling*, karbon dilepaskan ke atmosfer. Sebaliknya, pada daerah *downwelling* karbon (CO_2) berpindah dari atmosfer ke lautan. Pada saat CO_2 memasuki lautan, asam karbonat terbentuk:

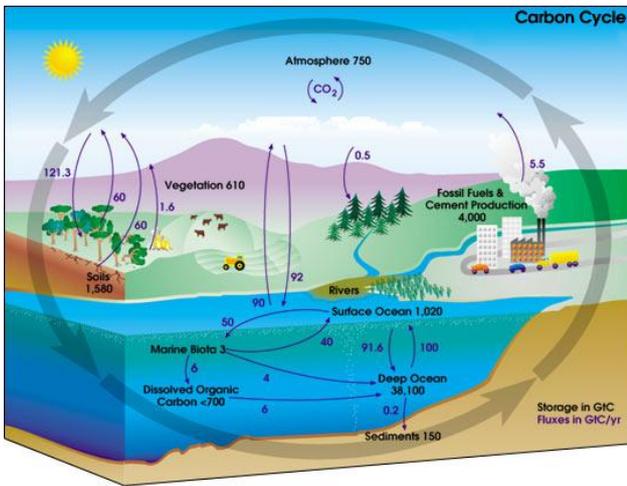


Reaksi ini memiliki sifat dua arah, mencapai sebuah kesetimbangan kimia. Reaksi lainnya yang penting dalam mengontrol nilai pH lautan adalah pelepasan ion hidrogen dan bikarbonat. Reaksi ini mengontrol perubahan yang besar pada pH:



III. REPRESENTASI SIKLUS KARBON DENGAN GRAF

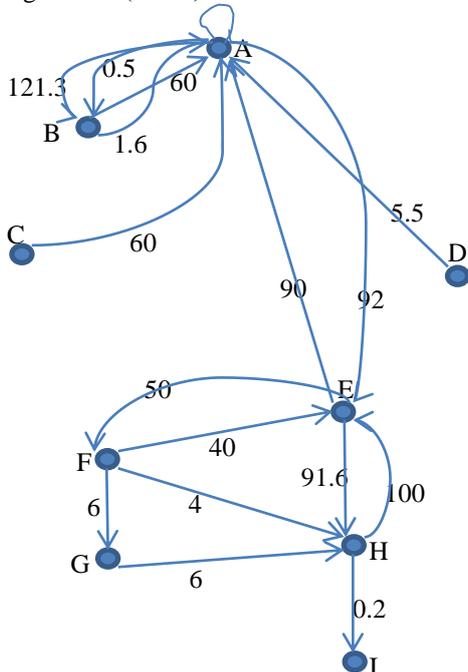
Siklus Karbon jika digambarkan dengan diagram, seperti gambar di bawah ini.



Gambar 1 - Siklus Karbon

Diagram dari siklus karbon. Angka dengan warna hitam menyatakan berapa banyak karbon tersimpan dalam berbagai reservoir, dalam milyar ton ("GtC" berarti Giga Ton Karbon). Angka dengan warna biru menyatakan berapa banyak karbon berpindah antar reservoir setiap tahun. Sedimen, sebagaimana yang diberikan dalam diagram, tidak termasuk ~70 juta GtC batuan karbonat dan kerogen.

Siklus karbon pada gambar di atas direpresentasikan dengan graf ganda berarah berbobot. Reservoir karbon sebagai simpul-simpul pada graf, sedangkan anak panah sebagai sisi graf. Terdapat sembilan simpul dan 17 sisi pada graf tersebut, salah satunya berupa loop. Setiap sisi pada graf mengandung nilai (bobot) tertentu yang menandakan jumlah karbon (dalam GtC) yang berpindah antar reservoir setiap tahun. Simpul (titik) awal sisi berarah merupakan reservoir asal karbon dan simpul akhir sisi merupakan tempat tujuan perpindahan karbon. Karbon berpindah dari simpul awal sisi berarah ke simpul akhir dengan jumlah karbon yang berpindah sesuai dengan nilai (bobot) sisi.



Gambar 2 - graf siklus karbon

- A : atmosphere
- B : vegetation
- C : soils
- D : fossil fuels and cement product
- E : rivers and ocean surface
- F : marine biota
- G : dissolved organic carbon
- H : deep ocean
- I : sediments

Graf di atas merupakan graf terhubung dan planar. Pada graf di atas tidak terdapat sirkuit Euler karena tidak setiap simpulnya memiliki derajat genap, sehingga tidak ada sirkuit yang dapat dibuat yang melalui setiap sisi pada graf tepat satu kali. Graf tersebut juga tidak memiliki lintasan Euler. Graf siklus karbon di atas juga tidak memiliki lintasan Hamilton maupun sirkuit Hamilton.

Perpindahan karbon dengan jumlah terbesar, dapat dilihat dari bobot sisi pada graf, adalah perpindahan karbon dari atmosfer ke vegetasi tumbuhan, yaitu sebesar 121.3 GtC per tahun. Sedangkan perpindahan karbon dengan jumlah terkecil adalah perpindahan karbon dari reservoir *deep ocean* ke reservoir *sediment*, yaitu sebesar 0.2 GtC per tahun.

IV. KESIMPULAN

Siklus karbon dan siklus lain di alam, seperti siklus nitrogen, siklus air, siklus fosfor, dan sebagainya dapat direpresentasikan dengan graf berarah. Reservoir pada siklus direpresentasikan sebagai simpul-simpul pada graf, dan arah perpindahan materi direpresentasikan sebagai graf berarah. Graf hasil representasi siklus belum tentu mengandung sirkuit Euler ataupun sirkuit Hamilton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kenneth H. Rosen, "Discrete Mathematics and Its Applications", 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2012, ch 10.
- [2] Munir, Rinaldi. "Diktat Kuliah IF2091 Struktur Diskrit". Program Studi Teknik Informatika, 2008.
- [3] Janzen, H. H. (2004). Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. In *Agriculture, ecosystems and environment*, 104, 399–417.
- [4] Houghton, R. A. (2005). The contemporary carbon cycle. Pages 473-513 in W. H. Schlesinger, editor. *Biogeochemistry*. Elsevier Science.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 18 Desember 2012

Innani Yudho'afi (13511054)