

Konsekuensi Biologis Pemanasan Global dengan Penekanan Terhadap Interaksi Serangga-Tumbuhan

Shahabuddin

**Prodi Agroteknologi, Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako Kampus Bumi Tadulako Tondo Palu, Sulawesi Tengah 94118
E.mail: shahabsaleh@gmail.com**

ABSTRACT

Global warming that caused by increasing of CO₂ in atmosphere effects many aspect on organism lives, including insects-plants interactions. The effect of CO₂ increased will more complex when interact with another environment factors such as Nitrogen increased and atmosphere temperature increased. Global warming effects on physiology, phenology, distribution, adaptation, and interaction among species. Increasing of CO₂ gases in atmosphere potentially to rise attack of herbivory insects and effects on their natural enemy. Eventhough, the effect is very species spesific and specific system on insects-plants interactions. It is needed holistic understanding to build the strategy for herbivory insects controlled. In the other side, CO₂ increasing is a ecological issue that caused and effects to human life. It is need proactive attitude and communication to handle this problem together.

Key words: Global warming, CO₂ increased, herbivory, insects-plants interaction

PENDAHULUAN

Sejak revolusi industri, jumlah CO₂ di atmosfer dan di laut meningkat lebih dari 30%, dari sekitar 275 part per million (ppm) pada awal tahun 1700 menjadi 365 ppm pada saat ini dan diprediksi bisa mencapai 450-600 ppm pada tahun 2100 (Pidwirny, 2004). Selanjutnya dikemukakan bahwa sumber utama gas CO₂ diatmosfir bumi berkaitan dengan aktifitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan penutupan lahan alami pada padang rumput, hutan kayu, dan ekosistem hutan.

Di Indonesia, jumlah emisi CO₂ terbesar disebabkan oleh deforestasi dan konversi lahan (74%), diikuti konsumsi energi (23%) dan proses industri (3%). Dari hasil inventarisasi

gas-gas rumah kaca di Indonesia diketahui bahwa pada tahun 1994 emisi total CO₂ adalah 748,607 Gg sedangkan penyerapan CO₂ oleh hutan kurang lebih sebanyak 364,726 Gg, dengan demikian sejak tahun 1994 tingkat emisi CO₂ di Indonesia sudah lebih tinggi dari tingkat penyerapannya sehingga Indonesia sudah menjadi net emitter, sekitar 383,881 Gg sejak tahun 1994. Hasil perhitungan sebelumnya, pada tahun 1990, Indonesia masih sebagai net sink atau tingkat penyerapan lebih tinggi dari tingkat emisi. Berapapun kecilnya Indonesia sudah memberikan kontribusi bagi meningkatnya konsentrasi gas-gas rumah kaca secara global di atmosfer (Sugandy *et al.*, 1999)

Dalam skala waktu yang pendek antara 100-1000 tahun, peningkatan CO₂ di atmosfer dapat mempengaruhi berbagai berbagai atribut abiotik di bumi seperti : (1)

temperatur (suhu rata-rata lebih tinggi yang dapat mempercepat efek rumah kaca); (2) pola curah hujan; (3) kadar keasaman curah hujan; (4) tingkat permukaan samudera (permukaan laut lebih tinggi akan mengenai area yang rendah); dan (5) daerah iklim (pergeseran zona yang akan mendorong kearah perubahan komposisi ekosistem dan distribusi tanaman dan hewan). Selain itu, peningkatan CO₂ diramalkan dapat menyebabkan perubahan pada pengembalian material organik dan mengurangi kelembaban tanah. Perubahan seperti ini akan mempengaruhi biodiversitas melalui perubahan laju fotosintesis, komposisi jenis tanaman, dan kemampuan kompetisi tanaman (Coviella & Trumble, 1999).

Semua efek akibat peningkatan CO₂ dan interaksinya dengan faktor lingkungan lainnya akan dapat mengubah interaksi antara herbivora dengan tanaman (Lincoln et al. 1986; Schoonhoven et al., 1998; Speight et al., 1999). Peningkatan kadar CO₂ pada awalnya berpengaruh terhadap tanaman, dampak berikutnya pada serangga herbivora dan efek kumulatif terjadi pada parasit dan serangga predator.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Terhadap Tumbuhan

Karena karbon merupakan komponen utama dalam fotosintesis, maka peningkatan kadar CO₂ atmosfer akan mempengaruhi proses fotosintesis dan ini akan mempengaruhi fenotip tumbuhan. Sebagai contoh, peningkatan CO₂ menyebabkan terjadinya peningkatan biomassa tumbuhan (Stacey et al., 2002). Selanjutnya, peningkatan biomassa tumbuhan pada kondisi peningkatan CO₂ dapat menurunkan sekitar 15-25 % kadar

nitrogen pada jaringan tumbuhan sehingga meningkatkan nisbah C:N serta alokasi karbon untuk sintesis pembentukan senyawa metabolit sekunder (Schoonhoven et al., 1998; Agrell et al., 2000; Stacey et al., 2002).

Karena pada kondisi peningkatan CO₂, terjadi penurunan konsentrasi nitrogen akibat peningkatan nisbah C:N pada jaringan tumbuhan, maka akan terjadi penurunan efikasi pertahanan tumbuhan yang berdasarkan pada kandungan nitrogen. Coviella et al. (2000) misalnya melaporkan bahwa tanaman kapas transgenik yang ditanam pada kadar CO₂ yang tinggi mengalami penurunan konsentrasi toksin protein Bt. Dilaporkan juga bahwa peningkatan konsumsi oleh larva *Spodoptera* sebagai kompensasi tingginya nisbah C:N meningkatkan pemaparan Bt terhadap serangga dan menyebabkan kematian yang lebih tinggi. Meskipun demikian masih terlalu dini untuk menyimpulkan bahwa penggunaan tanaman transgenik Bt akan lebih bisa diterima pada kondisi peningkatan CO₂.

Efek lanjut dari rendahnya nisbah C:N adalah terjadinya peningkatan kerusakan daun tumbuhan (defoliation) akibat meningkatnya konsumsi daun oleh serangga herbivor (Lincoln et al. 1986, William et al., 1994). Serangga mandibulate dan larva Lepidoptera umumnya mengkonsumsi daun lebih banyak pada tanaman yang tumbuh dalam lingkungan yang kadar CO₂nya tinggi (Hunter, 2001). Demikian juga dengan terjadi peningkatan luas kerusakan daun oleh penggorok daun (leaf-mining insects) (Stiling et al. 2003). Meskipun demikian, perlu dikemukakan bahwa meningkatnya laju konsumsi daun perkapita oleh serangga pada kondisi CO₂ yang tinggi tidak selalu berarti bahwa kerusakan pada tanaman lebih tinggi secara keseluruhan. Hal ini diakibatkan oleh terjadinya peningkatan biomassa tumbuhan pada kondisi peningkatan CO₂, sehingga

secara keseluruhan mampu mengkompensasi peningkatan defoliiasi (Stacey *et al.* 2002).

Meskipun demikian tidak semua jenis tumbuhan memberikan respons yang sama terhadap peningkatan kadar CO₂. Johns *et al.* (2003) melaporkan bahwa dalam eksperimen jangka panjang konsumsi daun oleh imago serangga mobil seperti *Octotoma championi* and *O. scabripennis* pada tumbuhan *L. camara* tidak meningkat secara signifikan. Hamilton, *et al.* (2004) melaporkan bahwa tidak ada pengaruh peningkatan CO₂ pada tiga jenis tumbuhan pada kondisi lapangan (ekosistem hutan). Hamilton, *et al.* (2001) juga melaporkan fenomena yang tidak mendukung *hipotesis keseimbangan karbon-nutrien* yaitu bahwa akan terjadi peningkatan metabolit sekunder pada kondisi peningkatan CO₂. Hal ini terjadi juga pada *Plantago lanceolata* yang kadar glikosidanya tidak terpengaruh oleh peningkatan kadar CO₂ (Hunter, 2001).

Hal lain adalah adanya perbedaan respons terhadap kenaikan kadar CO₂ antara tanaman yang menggunakan siklus Calvin untuk fiksasi CO₂ dalam fotosintesis (tanaman C3) dan tanaman dengan jalur Hatch-Slack untuk fotosintesis (tanaman C4). Hasil survey dari 770 percobaan, menunjukkan terjadi peningkatan hasil masing-masing 14% dan 34% untuk tanaman C4 dan C3, yang tumbuh dalam kondisi CO₂ meningkat di atmosfer (Coviella & Trumble 1999).

Tanggapan yang berbeda dari tanaman C3 dan C4 terhadap peningkatan CO₂ akan menyebabkan adanya perbedaan respons serangga herbivora terhadap kedua jenis tanaman tersebut. Tanaman C3 dipengaruhi secara positif oleh peningkatan CO₂ dan dipengaruhi secara negatif oleh respon serangga, sedangkan tanaman C4

kurang terpengaruh oleh kadar CO₂ yang tinggi sehingga akan kurang dipengaruhi oleh perubahan perilaku makan serangga (Coviella & Trumble 1999).

Pengaruh Terhadap Serangga Herbivora

Pengaruh peningkatan CO₂ terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh serangga hama tergantung pada kinerja serangga pada level individu dan populasi. Jika mengkonsumsi daun lebih banyak memungkinkan serangga untuk mengkompensasi secara penuh, maka kerusakan daun (defoliiasi) akan meningkat sedangkan serangga tetap bugar.

Beberapa studi melaporkan ketidakmampuan serangga mengkompensasi penurunan kualitas tumbuhan akibat peningkatan CO₂. Sebagai contoh kupu-kupu buckeye pada tumbuhan *Plantago lanceolata* mengalami peningkatan mortalitas dan waktu perkembangan jika makan pada tumbuhan pada kondisi peningkatan CO₂ (Hunter 2001). Peningkatan mortalitas akibat defisiensi nutrisi karena penurunan kadar nitrogen pada kondisi peningkatan CO₂ juga dialami oleh tiga jenis leafminer (*Stigmella*, *Cameraria* dan *Stilbosis*) (Stiling *et al.*, 2003).

Meskipun demikian beberapa jenis serangga dapat mengkompensasi dengan baik penurunan kualitas nutrisi daun. Larva sawfly dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen sebagai respons terhadap penurunan kadar CO₂ tanaman loblolly pine akibat peningkatan CO₂ (Williams *et al.*, 1994). Selain itu beberapa jenis serangga mampu meningkatkan sintesis enzim detoksifikasi yang distimulasi oleh peningkatan kadar metabolit sekunder pada daun (Lindroth *et al.*, 1993).

Terlepas dari kemampuan beberapa jenis serangga mengkompensasi efek peningkatan CO₂, penurunan laju pertumbuhan atau peningkatan konsumsi daun oleh serangga herbivora akan

menyebabkan peningkatan mortalitas serangga pada tingkat populasi. Hal ini terjadi karena penurunan waktu perkembangan serangga meningkatkan peluang mereka untuk ditemukan oleh serangga predator atau parasitoid atau lebih lama terekspose pada faktor lingkungan yang bisa mematikan. Selain itu peningkatan konsumsi daun akibat rendahnya kualitas nutrisi daun meningkatkan peluang untuk menelan bakteri atau virus patogen yang dapat menurunkan fekunditas atau mematakannya (Coviella *et al.*, 1999; Stiling *et al.*, 2002).

Sebaliknya, kepadatan populasi nampaknya juga mempengaruhi respons serangga terhadap peningkatan CO₂. Meskipun fekunditas individual Aphids generalis *Myzus persicae* dan yang spesialis *Brevicoryne brassicae* meningkat jika dipelihara pada tumbuhan yang ditumbuhkan pada kadar CO₂ tinggi tetapi hal ini tidak terjadi jika Aphids tersebut dipelihara dalam koloni. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan perubahan kualitas tumbuhan akan mempengaruhi interaksi intraspesies Aphid. Selain itu karena terjadi perbedaan nisbah *M. persicae* dan *B. brassicae* pada tumbuhan dalam kondisi peningkatan CO₂ juga menunjukkan adanya pengaruh peningkatan CO₂ terhadap hasil kompetisi diantara serangga herbivor (Stacey *et al.*, 2002).

Meskipun pengaruh peningkatan CO₂ atmosfer terhadap komunitas serangga tanah belum banyak dilaporkan namun diprediksi mereka juga akan terpengaruh baik secara langsung akibat pemanasan tanah maupun secara tidak langsung melalui konsumsi serasah yang kadar nitrogennya relatif rendah. Couëteaux & Bolger (2000) misalnya telah menulis review tentang hal ini.

Pengaruh Langsung Peningkatan CO₂ pada Serangga

Tidak satupun dari studi yang telah diuji yang menyatakan bahwa peningkatan CO₂, pada tingkat 700 sampai 1100 ppm, mempunyai efek langsung pada pertumbuhan dan perkembangan serangga, jika efek melalui tanaman inang dikesampingkan. Bagaimanapun juga kemampuan untuk menemukan tanaman inang pada beberapa herbivora dapat terpengaruh. Beberapa serangga menggunakan konsentrasi CO₂ dalam hitungan menit untuk menemukan inang. Palpus labial *Helicoverpa migera* (Hubner) misalnya bisa mendeteksi fluktuasi kepadatan CO₂ yang sangat kecil yaitu 0,14% atau 0,5 ppm. *Diabrotica virgifera virgifera* menggunakan konsentrasi CO₂ dalam tanah untuk menemukan dan menyerang akar jagung (Coveila & Trumble 1999). Seberapa besar penemuan tanaman inang mungkin dipengaruhi oleh perubahan CO₂ di atmosfer, dan bagaimana kesiapan serangga beradaptasi terhadap perubahan ini, masih memerlukan kajian lebih lanjut. Bagaimanapun kadar CO₂ yang tinggi telah lama digunakan dalam pengendalian hama gudang.

Variasi Respons Serangga

Nampaknya efek peningkatan CO₂ terhadap serangga herbivora tergantung pada jenis tumbuhan dan jenis serangga uji. Selain itu efek CO₂ dapat berbeda pada setiap musim mengikuti umur daun dan serangganya. Umumnya nisbah C:N meningkat mengikuti umur daun dan efek negatif peningkatan CO₂ lebih nyata pada instar awal yang memakan daun muda. Larva yang lebih tua lebih mampu mengkompensasi kualitas daun dibandingkan dengan yang muda (Hunter 2001).

Jadi peningkatan CO₂ tidak selamanya berefek negatif terhadap serangga sebagai respons atas perubahan fenotip tumbuhan. Paling tidak kinerja

beberapa serangga penghisap cairan floem meningkat ketika memakan tanaman yang tumbuh pada kadar CO₂ tinggi (Bezemer & Jones, 1998). Sementara itu klon yang sama dari Aphid *Aulacorthum solani* memberikan respons yang berbeda terhadap peningkatan CO₂ pada dua tanaman yang berbeda. Pada tanaman kacang rata-rata produksi nimpha Aphid meningkat 16 %, sedangkan laju perkembangannya tidak terpengaruh. Sebaliknya Aphid pada tanaman Tansy laju perkembangannya lebih cepat dan laju reproduksinya tidak berubah. Namun demikian secara umum kedua klon Aphid tersebut merespons secara positif pada kondisi CO₂ yang meningkat (Awmack *et al.*, 1997).

Dari beberapa studi tersebut terlihat bahwa masih diperlukan informasi yang lebih banyak untuk memprediksi efek peningkatan CO₂ terhadap dinamika populasi hama penting. Misalnya, bagaimana efek peningkatan CO₂ terhadap kompetisi antar-spesies diantara serangga herbivora, apakah hama tertentu akan lebih meningkat populasinya karena serangga saingannya lebih rentan terhadap peningkatan CO₂.

Pengaruh Terhadap Musuh Alami

Perubahan kinerja serangga herbivora akibat peningkatan CO₂ pada gilirannya akan mempengaruhi juga tingkat trofik yang lebih tinggi yaitu serangga predator dan parasitoid yang menjadi musuh alami mereka (Coviella & Trumble 1999) misalnya melaporkan bahwa variasi berat parasitoid *Brachymeria intermedia* (Ness) (Hymenoptera: Chalcididae) dan *Coccigomimus turionellae* (L.) (Hymenoptera: Ichneumonidae) akibat perbedaan kualitas pakan (diet) berpengaruh terhadap kinerja parasitoid mereka. Dapat dipastikan bahwa

perbedaan diet yang memperpanjang waktu perkembangan, meningkatkan laju konsumsi dan menurunkan laju pertumbuhan akan meningkatkan kerentanan terhadap musuh alami (Roth & Lindroth 1995). Sebaliknya kualitas nutrisi yang rendah dari inang justru dapat menurunkan kebugaran parasitoid (Coviella & Trumble 1999).

Kekurangan nutrisi dapat mengurangi pertahanan serangga herbivora melawan endoparasitoid. Nutrisi yang buruk juga akan mengurangi ukuran serangga herbivora dan hal ini akan berpengaruh pada parasitoid. Umumnya parasitoid akan meletakkan sedikit telur pada inang yang kecil dan meletakkan lebih banyak telur dan lebih *female biased* pada inang yang lebih besar (Coviella & Trumble 1999). Selanjutnya, respons terhadap alarm feromon pada beberapa aphid mengalami penurunan pada kondisi peningkatan CO₂ (Awmack *et al.* 1997), dan dapat menyebabkan mereka lebih peka terhadap serangan musuh alami.

Sebagai tambahan, tingkat serangan tergantung pada bagaimana tingkat kemudahan inang ditemukan oleh musuh alami. Perubahan dalam metabolisme sekunder tanaman akibat peningkatan CO₂ akan mempengaruhi pemanfaatan sinyal semiochemical seperti *sinomones* atau *kairomones* oleh musuh alami, dengan demikian akan mengganggu atau mempengaruhi kemampuan musuh alami untuk menemukan inangnya. Jadi, sukses reproduktif parasitoid dan efektivitasnya sebagai agen pengendali hayati dapat terpengaruh (Coviella & Trumble 1999).

Prediksi peningkatan efektifitas musuh alami pada kondisi peningkatan CO₂ banyak didukung oleh studi eksperimental. Stiling *et al.* (1999, 2003) misalnya melaporkan peningkatan tingkat parasitisasi leaf miner pada tumbuhan yang tumbuh pada kadar CO₂ yang tinggi dimana lebih dari 50 % kematian larva lebih disebabkan oleh pengaruh parasitoid.

Sementara itu populasi predator dan parasitoid juga dilaporkan cukup menekan populasi Aphid pada kondisi peningkatan CO₂ dan O₃ walaupun kedua faktor ini tidak mempengaruhi waktu terjadinya kelimpahan tertinggi (peak abundance) Aphid dan musuh alamnya (Awmack *et al.*, 2004).

Meskipun demikian studi lain melaporkan bahwa tingkat parasitisasi *Cotesia melanosca* pada larva ngengat gypsy pada kadar CO₂ yang tinggi tidak berbeda dengan pada kadar CO₂ normal (Rooth & Lindroth, 1995). Stacey *et al.* (2002) juga melaporkan bahwa serangga herbivora (Aphid) tidak terpengaruh oleh perubahan kualitas tumbuhan pada kondisi peningkatan CO₂ yang diindikasikan oleh tidak adanya perubahan jumlah Aphid yang dikonsumsi oleh *H. convergens* (Coccinellidae) dan yang diparasit oleh *Diaeretiella rapae*. Bahkan studi terbaru oleh Hamilton *et al.*, (2004) melaporkan hal yang sebaliknya.

Adapun pengaruh peningkatan CO₂ terhadap interaksi serangga-patogen belum banyak dilaporkan. Tetapi paling tidak dilaporkan bahwa kerentanan larva ngengat Gypsy terhadap virus NVP tidak terpengaruh oleh perubahan kandungan senyawa fenol daun yang dimediasi oleh peningkatan CO₂ (Hunter, 2001).

Kompleksitas Ekologis dan Efek Interaksi

Studi tentang efek peningkatan CO₂ terhadap tumbuhan dan serangga herbivor lebih banyak dihasilkan dari penelitian skala laboratorium dimana tidak ada faktor pembatas bagi tumbuhan seperti ketersediaan nutrisi dan cahaya, interaksi biotik yang terbatas, pilihan makanan bagi serangga terbatas dan fluktuasi lingkungan yang tidak menentu dihilangkan. Jadi mereka bebas dari

kompleksitas ekologis. Pada kenyataannya efek peningkatan CO₂ terhadap fenotip tumbuhan dan respons serangga, dimediasi oleh ketersediaan sumberdaya bagi tumbuhan seperti air, cahaya, nutrisi serta dimodifikasi oleh iklim dan variabilitas biotik.

Studi McDonald *et al.* (1999) melaporkan bahwa terjadi penurunan kinerja yang drastis (penurunan daya bertahan hidup 62 %, penurunan laju pertumbuhan dan berat pupa) pada serangga ngengat tussock yang diberi daun tanaman aspen yang tumbuh pada kondisi intensitas cahaya dan kadar CO₂ yang tinggi. Kedua faktor ini nampaknya memicu peningkatan glikosida phenol. Hal yang sama dilaporkan oleh Agrell *et al.* (2002) bahwa tingkat perubahan fenotip tumbuhan pada kondisi peningkatan CO₂ dan efeknya terhadap serangga tergantung pada ketersediaan cahaya.

Sementara itu perlu diwaspadai juga efek interaksi antara peningkatan CO₂ dengan peningkatan deposit nitrogen akibat peningkatan penggunaan pupuk. Deposisi nitrogen dapat mengurangi efek peningkatan CO₂ terhadap kinerja serangga. Deposit nitrogen dapat mengurangi senyawa karbohidrat, tanin, dan total fenol dan meningkatkan konsentrasi glukosa dan nitrogen pada tumbuhan spruce needles (Haettenschwiler & Schafellner, 1999).

Efek interaksi antara peningkatan CO₂ dan nitrogen terhadap populasi Aphids pada beberapa jenis tumbuhan telah dilaporkan oleh banyak peneliti. Dari 39 studi yang telah dilakukan secara independen, 9 studi melaporkan peningkatan populasi secara signifikan, 5 studi yang melaporkan hasil yang sebaliknya dan 25 studi yang melaporkan tidak ada efek yang signifikan terhadap populasi Aphid (Newman *et al.*, 2003). Selanjutnya dia memprediksi bahwa efek peningkatan CO₂ terhadap populasi Aphid tergantung pada kebutuhan nitrogen,

kecukupan nitrogen pada tanah dan kepekaan jenis Aphid terhadap peningkatan kepadatan populasi mereka, sebagaimana diketahui bahwa pada kepadatan populasi yang tinggi umumnya Aphids menghasilkan banyak keturunan yang bersayap. Pada tanah yang kaya nitrogen, jenis yang kebutuhan nitrogennya lebih rendah dan kurang peka pada kepadatan populasi akan menghasilkan populasi yang lebih besar.

Adapun pengaruh interaksi antara peningkatan kadar CO₂ dan suhu relatif masih sedikit. Dari studi yang telah ada kecenderungan bahwa gabungan penurunan kualitas nutrisi akibat peningkatan CO₂ dan peningkatan suhu yang menyebabkan pemanasan global dapat mereduksi secara signifikan kualitas tumbuhan bagi serangga herbivor. Namun demikian adanya interaksi yang kompleks antara suhu, kualitas tumbuhan dan kinerja serangga membuat prediksi terhadap masalah hama pada masa yang akan datang menjadi semakin sulit (Hunter, 1999). Misalnya, interaksi antara suhu yang tinggi dengan peningkatan CO₂ atmosfer tidak menyebabkan penurunan laju pertumbuhan serangga (Hunter, 2001).

Studi terbaru tentang efek interaksi antara peningkatan CO₂ dan temperatur terhadap interaksi tritrofik rerumputan, Aphid dan parasitoidnya melaporkan bahwa meskipun populasi parasitoid berpengaruh terhadap dinamika populasi Aphid, namun pengaruhnya tidak sangat signifikan (Hoover & Newman, 2004). Berdasarkan model yang dikembangkannya diprediksi bahwa respons populasi Aphid dan parasitoidnya terhadap peningkatan CO₂ dan temperatur tidak jauh berbeda pada kondisi CO₂ normal dibandingkan efek kedua faktor tersebut terhadap Aphid pada skala individu. Hasil yang

mirip juga dilaporkan oleh Awmack *et al.* (2004) bahwa kinerja Aphid secara individual tidak dapat memprediksi respons populasi Aphid terhadap peningkatan CO₂ atau O₃, karena fekunditas individual tidak dapat memprediksi laju pertumbuhan populasi yang sangat mungkin disebabkan oleh perubahan dalam kemampuan kompetisi intraspesies atau kemampuan Aphid untuk menginduksi sumber-sumber makanan.

Dalam jangka panjang, karena waktu generasi yang pendek dan potensi turnover genetik yang cepat pada banyak spesies serangga, maka peningkatan CO₂ dalam jangka panjang, akan menjadi pendorong proses evolusi yang kuat yang mempengaruhi evolusi serangga herbivora dan musuh alaminya. Berdasarkan teori koevolusi komunitas (Schonhoven *et al.* 1998), serangga herbivora diduga akan semakin mengembangkan kemampuan untuk mengkompensasi efek tidak langsung peningkatan CO₂ seperti dengan meningkatkan efisiensi pemanfaatan nutrisi yang kurang berkualitas, atau memperpendek masa perkembangannya. Sebaliknya musuh alamipun akan melakukan adaptasi sebagai respons terhadap perubahan kinerja inangnya.

SIMPULAN

Berbagai hasil studi tentang efek peningkatan CO₂ atmosfer terhadap interaksi serangga-tumbuhan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Ada kecenderungan penurunan konsentrasi nitrogen, peningkatan karbohidrat dan metabolit sekunder fenol pada jaringan tumbuhan pada banyak studi di tingkat individu
2. Ada variasi respons diantara serangga herbivora :
 - Kelompok pengigit-pengunyah (leaf-chewing insects) cenderung untuk meningkatkan konsumsi daun sebagai kompensasi terhadap rendahnya kualitas nutrisi dan

masih bisa mempertahankan berat pupanya.

- Kelompok serangga pengorok daun (leaf mining insects) hanya dapat mengkompensasi secara tidak penuh dengan meningkatkan konsumsi daun tetapi tetap mengalami penurunan berat pupa.
 - Serangga pengisap cairan tanaman (phloem-feeding dan whole-cell-feeding insects) merespons secara positif peningkatan CO₂ atmosfer, dengan meningkatnya kepadatan populasi dan menurunkan waktu perkembangan.
3. Serangga herbivor cenderung lebih rentan terhadap predasi dan parasitisasi baik karena lebih panjangnya masa perkembangan larva maupun karena rendahnya kualitas nutrisi serangga herbivor. Meskipun demikian daya bertahan hidup beberapa jenis parasitoid relatif rendah karena kualitas nutrisi inangnya yang kurang bagus. Namun demikian implikasi dari akibat yang ditimbulkan oleh peningkatan CO₂ terhadap interaksi Serangga-Tumbuhan dalam pengendalian hama ini masih terlalu dini untuk disimpulkan. Studi pada tingkat populasi dan komunitas tentang efek peningkatan CO₂ terhadap herbivori (Bezemer et al., 1999; Hamilton et al., 2001, 2004; Awmack et al., 2004) memperlihatkan hasil yang tidak mendukung sepenuhnya studi pada tingkat individual (Stiling et al., 1999, 2003). Selain itu dimasa yang akan datang efek peningkatan CO₂ atmosfer terhadap interaksi serangga tumbuhan semakin kompleks karena adanya efek interaksi dengan perubahan kondisi faktor lingkungan lainnya seperti

peningkatan suhu bumi, peningkatan deposit nitrogen dan ketersediaan air. Semua ini tentunya semakin membuat kita untuk lebih hati-hati (sulit?) dalam memprediksi bagaimana prospek pengendalian hama dengan menggunakan musuh alami dimasa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrell, J., McDonald, E.P. & Lindroth, R.L. 2000. Effects of CO₂ and light on tree phytochemistry and insect performance. *Oikos*, 88: 259-272.
- Awmack, C.S., Harrington, R. and Leather, S.R. 1997. Host plant effects on the performance of the aphid *Aulacorthum solani* (Kalt.) (Homoptera: Aphididae) at ambient and elevated CO₂. (Abstracts) *Global Change Biology*, 3:545.
- Awmack, C.S., Harrington, R and Richard L. 2004. Aphid individual performance may not predict population responses to elevated CO₂ or O₃ (Abstract). *Global Change Biology* 10 (8):1414
- Bezemer, T.M and Jones, T.H. 1998. Plant-insect herbivore interactions in elevated atmospheric CO₂ : quantitative analyses and guild effects. *Oikos*, 82. 212-222.
- Coviella, C.E., D. J. W. Morgan, J. T. Trumble. 2000. Interactions of Elevated CO₂ and Nitrogen Fertilization: Effects on production of *Bacillus thuringiensis* toxins in transgenic plants *Environ. Entomol.* 29 (4) : 781-787
- Coviella, C.E., and J. T. Trumble. 1999. Effects of Elevated Atmospheric Carbon Dioxide on Insect -Plant Interactions, Review : *Conservation Biology* 13 (4): 700-712

- Coûteaux M.M., and Bolger, T., 2000. Interactions between atmospheric CO₂ enrichment and soil fauna. *Plant and Soil* 224: 123–134, 2000.
- Hamilton J.G, Zangerl A.R, DeLucia E.H., Berenbaum M.R. 2001. The carbon nutrient balance hypothesis: its rise and fall. *Ecol.Lett* 4:86–95
- Hamilton, J.G., A.R. Zangerl, M.R. Berenbaum, J. Pippen, M. Aldea, E.H. DeLucia. 2004. Insect herbivory in an intact forest understory under experimental CO₂ enrichment. *Oecologia* 138: 566–573
- Haettenschwiler and Schafellner. 1999. Opposing effects of elevated CO₂ and N deposition on *Lymantria monacha* larvae feeding on spruce trees. *Oecologia*, 118:210-217
- Hoover J. K. and J.A. Newman. 2004. Tritrophic interactions in the context of climate change: a model of grasses, cereal Aphids and their parasitoids (Abstract). *Global Change Biology* 10 (7): 1197.
- Hunter, M.D.2001. Effects of elevated atmospheric dioxide on insect-plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology* 3 : 153-159
- Johns, C.V., Beaumont L.J., and Hughes, L. 2003. Effects of elevated CO₂ and temperature on development and consumption rates of *Octotoma championi* and *O. scabripennis* feeding on *Lantana camara*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* (Abstracts). 108 (3):169
- Lincoln, D.E., Couvet, D. & Sionit, N. 1986. Response of an insect herbivore to host plants grown in carbon dioxide enriched atmospheres. (Abstracts) *Oecologia* 69:556
- Lindroth, R.L., Kinney, K.K. & Platz, C.L. 1993. Responses of deciduous trees to elevated atmospheric CO₂: productivity, phytochemistry, and insect performance. *Ecology* 74 : 763-777.
- McDonald, E.P., Agrell, J., Lindroth, R.L. 1999. CO₂ and light effects on deciduous trees : growth, foliar chemistry, and insect performance. *Oecologia*, 119:389-399.
- Newman J. A. , D. J. Gibson, A. J. Parsons and J. H. M. Thornley. 2003. How predictable are aphid population responses to elevated CO₂ ? *Journal of Animal Ecology* 72 : 556–566
- Pidwirny, M. 2004. The carbon Cycle. *Physical Geography.net*. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9r.html>
- Roth, S.K. & Lindroth, R.L. 1995. Elevated atmospheric CO₂ effects on phytochemistry, insect performance and insect parasitoid interactions. (Abstract). *Global Change Biology*, 1:173
- Schoonhoven, L M., T. Jermy, J.J.A. van Loon. 1998. *Insect-Plant Biology, From physiology to evolution*. Chapman & Hall, London pp.112-113
- Stiling, P., Rossi, A.M., Hungate, B., Dijkstra, P., Hinkle, C.R., Knott, W.M. & Drake, B. 1999. Decreased leaf-miner abundance in elevated CO₂: reduced leaf quality and increased parasitoid attack. *Ecological Applications*, 9: 240-244.
- Stiling, P., D.C. Moon, M.D. Hunter, J. Colson, A.M. Rossi, G.J. Hymus, B.G.

- Drake.2002.Elevated atmospheric CO2 lowers herbivore abundance, but increases leaf abscission rates. *Global Change Biology (Abstracts)*, 8 (7):658
- Stiling, P., D.C. Moon, M.D. Hunter, J. Colson, A.M. Rossi, G.J. Hymus, B.G. Drake. 2003. Elevated CO2 lowers relative and absolute herbivore density across all species of a scrub-oak forest. *Oecologia* 134:82–87
- Sugandhy, A., A. Bey., Gunardi., R. Boer., H. Pawitan., S. Wigenasantana., A. Hidayat & P. Utomo (editors)., 1999. *Indonesia : The First National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. State Ministry for Environment. Jakarta.
- Speight, M.R., Hunter, M.D., Watt, A.D., 1999. *Ecology of Insects, Concepts and Applications*. Blackwell Science, Ltd. Pp 169 - 217.
- Stacey, D.A. and M.D. E. Fellowes. 2002. Influence of elevated CO2 on interspecific interactions at higher trophic levels *Global Change Biology (Abstracts)* 8 (7) 668
- Williams, R.S., Lincoln, D.E. & Thomas, R.B. 1994. Loblolly pine grown under elevated CO2 affects early instar pine sawfly performance. *Oecologia*, 98, 64-71.