

## Bab IV

# Ventilasi Alamiyah pada Rumah Tanaman

Ventilasi alamiyah perlu menjadi salah satu aspek pertimbangan yang penting dalam perancangan struktur rumah tanaman di kawasan yang beriklim tropika basah. Hal ini karena ventilasi alamiyah merupakan metode yang sangat murah untuk menjaga lingkungan di dalam rumah tanaman berada pada tingkat yang baik bagi pertumbuhan tanaman. Selain itu, rancangan struktur rumah tanaman sangat berpengaruh terhadap laju pertukaran udara dari dalam ke luar atau sebaliknya melalui ventilasi alamiyah. Pertukaran udara tersebut menentukan kondisi iklim mikro di dalam rumah tanaman.

Menurut Lindley dan Whitaker (1996) ventilasi alamiyah adalah pertukaran udara di dalam suatu bangunan dengan udara di luarnya tanpa menggunakan kipas atau peralatan mekanik lainnya. Pertukaran udara pada rumah tanaman sangat diperlukan untuk mencegah terlalu tingginya suhu dan kelembaban udara. Selain itu, ventilasi alamiyah juga menjaga tersedianya CO<sub>2</sub> yang sangat penting bagi proses fotosintesis pada daun tanaman.

Ventilasi alamiyah terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara antara posisi di dalam dan di luar bangunan akibat faktor angin dan faktor termal. Faktor angin dan faktor termal diperhitungkan dalam memanfaatkan ventilasi alamiyah sebagai

metode pengendalian lingkungan secara pasif. Besarnya efek angin dan efek termal menentukan laju ventilasi alamiah dalam ukuran pertukaran udara yang melalui bukaan pada suatu rumah tanaman (Kozai dan Sase, 1978). Semakin besar laju ventilasi alamiah pada suatu rumah tanaman maka suhu udara di dalamnya akan semakin mendekati suhu udara di luar. Kalau suhu udara dalam rumah tanaman sudah mendekati suhu udara di luar rumah tanaman maka tidak diperlukan pengendalian lingkungan secara aktif, misalnya ventilasi mekanik.

Ventilasi alamiah mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan ventilasi mekanik. Ventilasi alamiah tidak membutuhkan energi listrik, tidak membutuhkan pemeliharaan, dan tidak mengeluarkan suara berisik dari putaran kipas. Pengendalian laju ventilasi alamiah dapat dilakukan dengan pembukaan dan penutupan lubang ventilasi (Takakura, 1979). Pengaturan ventilasi alamiah agar tetap kontinyu lebih sulit dilakukan karena faktor-faktor yang mempengaruhinya sulit dikendalikan. Faktor-faktor tersebut antara lain adalah perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman serta arah dan kecepatan angin. Parameter rancangan rumah tanaman yang mempunyai pengaruh besar terhadap laju ventilasi alamiah antara lain adalah luas dan posisi bukaan ventilasi dinding dan atap serta panjang, lebar, dan tinggi rumah tanaman.

Rumah tanaman yang menggunakan ventilasi alamiah sangat tergantung kepada faktor termal dan faktor angin agar terjadi pertukaran udara dengan baik. Optimisasi ventilasi alamiah memerlukan pengetahuan yang memadai mengenai hubungan

antara laju dan pola aliran udara pada berbagai struktur rumah tanaman dan kondisi lingkungannya.

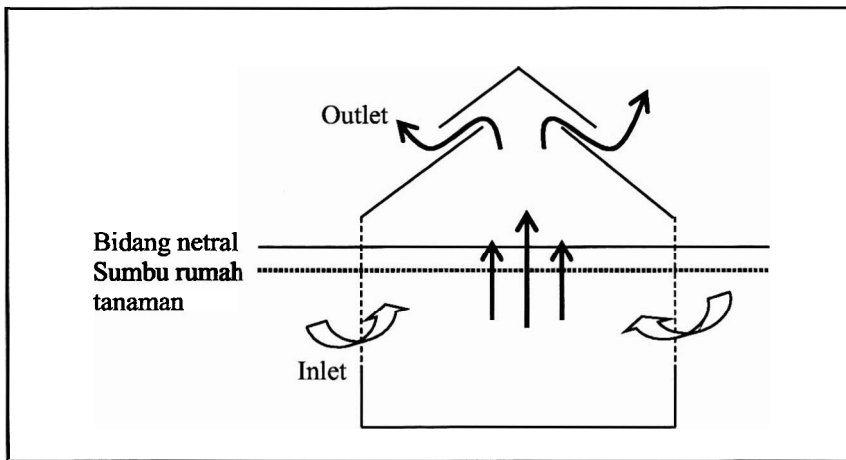
## **4.1. Faktor Penggerak Ventilasi Alamiah**

### **4.1.1. Faktor Termal**

Ventilasi alamiah akibat faktor termal adalah pergerakan udara keluar dari dan/atau masuk ke rumah tanaman yang terjadi karena dipicu oleh adanya efek buoyansi. Efek buoyansi ini disebabkan oleh perbedaan kerapatan udara di dalam dan di luar rumah tanaman. Radiasi gelombang panjang yang terperangkap di dalam rumah tanaman menaikkan suhu udara dan menurunkan kerapatan udara. Suhu udara di dalam rumah tanaman cenderung lebih tinggi daripada suhu udara di luar. Hal ini menimbulkan perbedaan kerapatan udara antara di dalam dan di luar sehingga terjadi perbedaan tekanan udara. Tekanan udara di dalam rumah tanaman menjadi lebih rendah daripada di luar, sehingga udara luar akan masuk ke dalam rumah tanaman melalui bukaan ventilasi dan mendorong udara di dalam rumah tanaman keluar.

Jika terdapat bukaan ventilasi di dinding maka udara akan masuk melalui bukaan ventilasi bagian bawah. Udara dengan kerapatan lebih rendah akan berada di bagian atas, sedangkan udara dengan kerapatan lebih tinggi akan berada di bagian bawah. Selanjutnya udara akan keluar melalui bukaan ventilasi di sebelah atas. Hal ini disebut sebagai *chimney effect*. Dengan demikian, agar ventilasi efek termal dapat berlangsung maka rumah tanaman perlu memiliki bukaan ventilasi di atap (Gambar 4.1).

Pertukaran udara akibat faktor termal ini terjadi ketika kecepatan angin di luar rumah tanaman rendah. Bot (1983) menyatakan bahwa pada kecepatan angin kurang atau sama dengan 1.67 m/s faktor termal berperan dominan. Selanjutnya, Kamaruddin (1999) menyatakan bahwa batas kecepatan angin tersebut adalah 1 m/s.



Gambar 4.1. *Chimney effect* pada rumah tanaman dengan bukaan ventilasi pada dinding dan atap (*ridge*).

Perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman dipengaruhi oleh radiasi matahari global, geometri rumah tanaman, bukaan ventilasi (atap dan dinding), dan jarak antara bukaan ventilasi tersebut secara vertikal (Kamaruddin, 1999). Semakin besar perbedaan suhu dan jarak antar bukaan ventilasi maka semakin besar dorongan bouyansi. Dengan demikian, tinggi rumah tanaman merupakan parameter yang perlu dipertimbangkan dalam desain jika akan membangun rumah tanaman berada di lokasi dimana angin jarang bertiup.

#### 4.1.2. Faktor Angin

Adanya pergerakan angin yang menerpa rumah tanaman menyebabkan perbedaan tekanan udara antara posisi di dalam dan di luar rumah tanaman. Angin menyebabkan zona tekanan tinggi dan tekanan rendah di sekeliling rumah tanaman yang menyebabkan terjadinya aliran udara. Papadakis *et al.* (1996) menyatakan bahwa pada saat kecepatan angin di atas 1.8 m/s efek termal terhadap laju ventilasi dapat diabaikan. Jika kecepatan angin di luar cukup tinggi dan perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman menjadi kecil maka faktor angin dominan dan pengaruh faktor termal dapat diabaikan. Inilah yang dinamakan ventilasi akibat faktor angin.

Efek angin digolongkan menjadi dua komponen, yaitu efek *steady* dan efek turbulen. Efek *steady* terjadi karena pada saat angin bertiup di atas dan di sekeliling rumah tanaman maka pergerakan angin membangkitkan tekanan pada lokasi berbeda yang menghasilkan distribusi tekanan. Distribusi tekanan di sekitar rumah tanaman dinyatakan sebagai distribusi dari koefisien tekanan. Apabila koefisien tekanan bernilai positif maka akan terjadi aliran udara masuk (*inflow*) melalui bukaan ventilasi. Sebaliknya, apabila koefisien tekanan bernilai negatif maka akan terjadi aliran udara keluar dari rumah tanaman (*outflow*). Adapun efek turbulen terjadi karena kecepatan angin tidak bersifat statis melainkan bervariasi secara kontinyu. Hal ini menghasilkan fluktuasi tekanan yang menyebabkan pergerakan udara (Bot, 1983). Laju ventilasi alamiyah karena faktor angin ditentukan oleh kecepatan angin, arah angin, luas area bukaan ventilasi dan

penghalang di sekitar rumah tanaman (Brockett dan Albright, 1987). Jika bukaan ventilasi rumah tanaman ditutup dengan *screen* maka laju ventilasi juga dipengaruhi oleh ukuran *screen*.

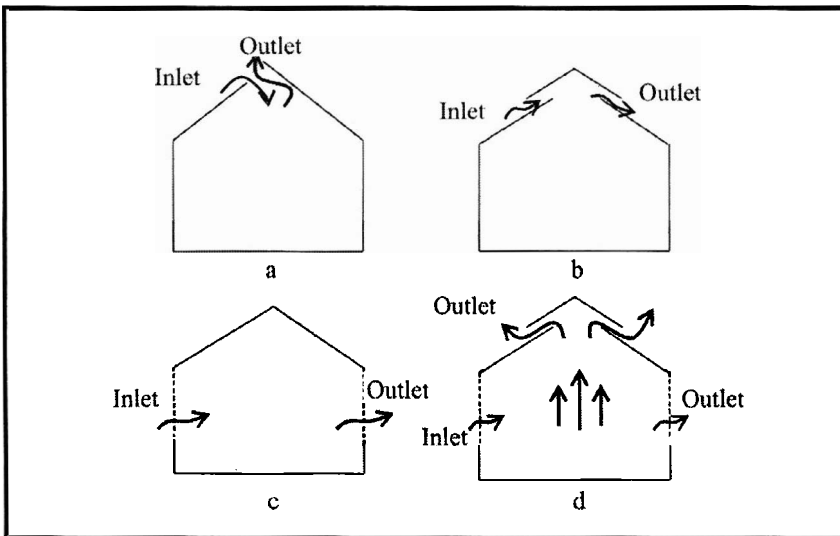
Rumah tanaman dengan ventilasi dinding dan atap lebih efektif dibandingkan dengan ventilasi dinding saja. Hal ini karena antara ventilasi dinding dan atap serta antara dua ventilasi dinding yang berhadapan akan terjadi perbedaan tekanan statis. Perbedaan tekanan statis ini bersama-sama dengan tekanan turbulen menyebabkan terjadinya aliran udara (Papadakis *et al.*, 1996). Menurut Katsoulas *et al.* (2006), konfigurasi bukaan ventilasi yang paling efektif adalah kombinasi bukaan dinding dan atap, diikuti oleh bukaan dinding saja, dan terakhir adalah bukaan atap saja.

Rancangan struktur rumah tanaman sangat menentukan pembentukan perbedaan tekanan yang akan mendorong pergerakan udara melalui bukaan ventilasi yang ada. Jika rumah tanaman dengan atap *standard peak* hanya memiliki bukaan ventilasi di atap (*ridge*) pada satu arah seperti Gambar 4.2a maka udara akan masuk dan keluar melalui bukaan ventilasi yang sama. Bukaan ventilasi tersebut akan menjadi *inlet* sekaligus *outlet* sehingga aliran udara yang masuk dan keluar akan bertabrakan. Selanjutnya, hal ini menyebabkan ventilasi alamiah tidak efektif dalam menurunkan suhu udara di dalam rumah tanaman.

Berbeda halnya jika bukaan ventilasi di atap (*ridge*) membuka ke dua arah (Gambar 4.2b). Zona *inlet* dan *outlet* akan menjadi jelas sehingga udara yang masuk tidak bertabrakan dengan udara yang keluar. Namun, aliran udara pada rumah tanaman seperti Gambar 4.2b tidak meliputi bagian bawah rumah

tanaman karena tidak adanya bukaan ventilasi di posisi tersebut.

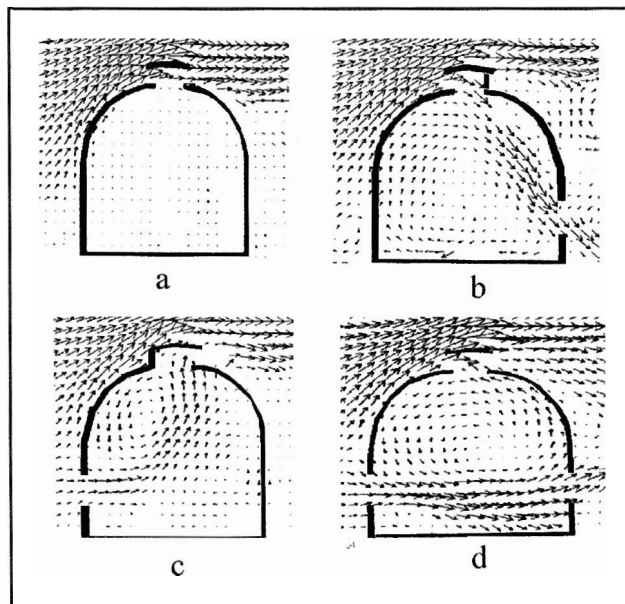
Jika bukaan ventilasi hanya pada sisi-sisi dinding seperti Gambar 4.2c, maka *inlet* dan *outlet* akan menjadi jelas tetapi efek bouyansi kemungkinan tidak terjadi. Rumah tanaman dengan bukaan ventilasi seperti itu hanya mengandalkan ventilasi akibat faktor angin. Pada akhirnya, suhu udara di atas kanopi dekat atap cenderung tinggi.



Gambar 4.2. Bukaan ventilasi pada rumah tanaman bentang tunggal.

Kombinasi bukaan ventilasi atap dan sisi dinding seperti pada Gambar 4.2d merupakan kombinasi yang paling efektif. Pada rumah tanaman dengan kombinasi bukaan ventilasi dinding dan atap, pergerakan udara terjadi secara lebih lancar. Pada saat angin bertiup, bukaan dinding *winward* (yang berhadapan dengan angin) berperan sebagai *inlet* dan bukaan ventilasi di sisi *leeward* serta

atap menjadi *outlet*. Jika angin tidak bertiup maka komponen ventilasi akibat faktor termal menjadi pengganti. Bukaan pada dinding *winward* (yang berhadapan dengan angin) dan bukaan ventilasi di sisi *leeward* berperan sebagai *inlet* sedangkan bukaan di atap menjadi *outlet*.



Gambar 4.3. Pergerakan udara pada berbagai konfigurasi bukaan ventilasi alamiah pada model rumah tanaman bentang tunggal dengan atap *arch* (Kamaruddin *et al.*, 2002b).

Distribusi aliran udara pada rumah tanaman dengan atap *arch* dapat dilihat pada Gambar 4.3(a-d). Konfigurasi bukaan ventilasi pada model rumah tanaman tipe ini telah dianalisis oleh Kamaruddin *et al.* (2002b). Penelitian mereka mengungkapkan adanya pengaruh nyata lokasi bukaan ventilasi terhadap distribusi



aliran udara dan suhu udara di dalam rumah tanaman. Dengan demikian posisi bukaan ventilasi sisi *windward* pada rumah tanaman harus tepat sesuai dengan arah datangnya angin agar bukaan efektif sebagai *inlet* maupun *outlet*.

#### **4.1.3. Ventilasi Akibat Kombinasi Faktor Termal dan Angin**

Pada ventilasi alamiyah, perbedaan tekanan yang menyebabkan pergerakan udara melalui bukaan ventilasi timbul dari dua sumber, yaitu faktor termal karena perbedaan suhu udara di dalam rumah tanaman dan faktor angin karena adanya angin. Jika faktor termal dan faktor angin sama-sama dominan maka keduanya harus diperhitungkan. Inilah yang dimaksud dengan ventilasi alamiyah kombinasi faktor termal dan faktor angin. Menurut Papadakis *et al.* (1996), untuk kecepatan angin lebih rendah dari 1.8 m/s, efek angin meskipun kecil tidak dapat diabaikan. Terutama jika rumah tanaman memiliki kombinasi bukaan ventilasi dinding dan atap seperti pada Gambar 4.2d maupun Gambar 4.3d. Laju ventilasi alamiyah yang terjadi merupakan kombinasi faktor termal dan faktor angin tetapi besarnya bukan hasil penjumlahan kuantitatif laju ventilasi yang diakibatkan oleh masing-masing faktor.

Kittas *et al.* (1996) mengungkapkan bahwa total bukaan ventilasi pada rumah tanaman berbanding lurus dengan laju ventilasi alamiyah. Selanjutnya, perbandingan luas bukaan ventilasi atap terhadap bukaan dinding mempengaruhi laju ventilasi alamiyah akibat faktor termal.

## 4.2. Penentuan Laju Ventilasi Alamiyah

Ventilasi alamiyah merupakan faktor penting dalam mengendalikan iklim mikro di dalam rumah tanaman di daerah tropika basah. Kinerja ventilasi alamiyah pada suatu rumah tanaman tergantung kepada rancangan bukaan ventilasi dan lokasi rumah tanaman tersebut. Kinerja ventilasi alamiyah dinyatakan dalam laju (*rate*) aliran udara volumetrik yang melewati bukaan ventilasi ( $\Phi_{v,v}$ ) dengan satuan  $\text{m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$  luas bukaan ventilasi. Laju ventilasi sering dinyatakan pula sebagai jumlah (*number*) pertukaran massa udara yang terjadi antara rumah tanaman dengan lingkungan sekitar dalam satu jam ( $Q_{air}$ ) dengan satuan  $1/h$ . Laju ventilasi alamiyah menjadi salah satu indikator efektif tidaknya bukaan ventilasi pada suatu rumah tanaman. Hal ini karena laju ventilasi alamiyah memberikan gambaran pertukaran udara yang terjadi pada rumah tanaman tersebut.

Laju ventilasi alamiyah berbanding lurus dengan kecepatan udara di luar rumah tanaman dan perbedaan tekanan udara yang ditimbulkan oleh perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman (Takakura, 1979). Arah angin tidak berpengaruh terhadap laju pertukaran udara pada ventilasi akibat faktor termal dan ventilasi akibat kombinasi faktor termal dan angin (Bot, 1983; Kittas *et al.*, 1996). Pada ventilasi akibat faktor angin, arah angin merupakan salah satu faktor yang berpengaruh (Brockett dan Albright, 1987).

Menurut Lee dan Short (2000) semakin besar kecepatan angin maka laju ventilasi alamiyah akan semakin besar pula. Jumlah pertukaran massa udara tergantung kepada letak ventilasi, luas

bukaan ventilasi, dan jumlah *span*. Pertukaran udara melalui bukaan ventilasi rumah tanaman dipengaruhi oleh variasi tekanan udara di dalam dan di luar rumah tanaman. Ada hubungan yang erat antara kondisi rumah tanaman yang meliputi umur rumah tanaman dan bahan penutupnya. Rumah tanaman yang baru dibangun relatif kedap sehingga pada umumnya mempunyai laju ventilasi yang relatif kecil. Sejalan dengan pertambahan umur rumah tanaman, tingkat kedap rumah tanaman berkurang sehingga laju ventilasinya meningkat.

Laju ventilasi alamiyah yang disarankan untuk rumah tanaman berbeda-beda tergantung kepada konstruksinya. Kriteria laju ventilasi alamiyah pada rumah tanaman diberikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Kriteria laju ventilasi alamiyah pada rumah tanaman (Walker, 1983)

Kondisi Rumah Tanaman	Laju ventilasi (kali/jam)
Konstruksi baru, kaca atau fiberglass	45-90
Konstruksi baru, plastik tipis, 2 lapis	30-60
Konstruksi lama, kaca terawat baik	60-120
Konstruksi lama, kaca tidak terawat	120-240

Laju ventilasi alamiyah pada suatu rumah tanaman dapat diketahui melalui berbagai alternatif metode. Metode yang umum digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Berbagai alternatif metode untuk mengetahui laju ventilasi alamiyah pada suatu bangunan (Kamaruddin, 1999)

No	Metode	Ventilasi Akibat Faktor Termal	Ventilasi Akibat Faktor Angin	Ventilasi Akibat Kombinasi Faktor Termal & Angin
1.	<i>Tracer gas</i>	√	√	√
2.	<i>Direct airspeed measurement</i>	√	√	
3.	<i>Energy balance</i>	√	√	√
4.	<i>Neutral plane</i>	√		
5.	<i>Wind pressure coefficient</i>		√	
6.	<i>Stack and wind</i>			√

#### 4.2.1. Metode *Tracer Gas*

*Tracer gas* merupakan metode yang terbukti cukup akurat untuk mengetahui laju ventilasi alamiyah (Nederhoff *et al.*, 1985; Kamaruddin, 1999), yaitu terutama untuk ventilasi alamiyah karena faktor termal. Metode ini pada umumnya dijadikan patokan untuk hasil pengukuran dengan metode lain. Metode *tracer gas* dibagi dua, yaitu *decay rate* atau *dynamic tracer gas method* dan *equilibrium* atau *static tracer gas method*.

Metode *tracer gas* terdiri dari tahapan-tahapan menginjeksikan gas tertentu yang tidak berbahaya ke dalam rumah tanaman dan mengukur perubahan konsentrasi gas tersebut setelah  $t$  waktu. Laju ventilasi pada rumah tanaman diasumsikan setara dengan laju berkurangnya konsentrasi gas yang diinjeksikan. Gas yang dapat digunakan adalah metan ( $\text{CH}_4$ ), nitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ).  $\text{CO}_2$  dan  $\text{N}_2\text{O}$  adalah gas yang paling sering digunakan. Tetapi,  $\text{N}_2\text{O}$  lebih baik jika

pengukuran dilakukan pada rumah tanaman yang ditanami karena konsentrasinya tidak dipengaruhi oleh fotosintesis dan respirasi tanaman.

Pada *dynamic tracer gas method*, gas diinjeksikan ke dalam secara merata sampai pada konsentrasi tertentu ( $C_i(t)$ ) yang melebihi konsentrasi gas tersebut di luar rumah tanaman ( $C_o$ ). Setelah gas mencapai konsentrasi yang diinginkan, aliran gas dihentikan. Konsentrasi gas yang berkurang atau hilang per satuan waktu  $t$  diukur menggunakan alat ukur sehingga diperoleh *decay rate* (Persamaan (4.1)). Dari nilai *decay rate* ini kemudian nilai laju ventilasi  $Q_{air}$  dihitung. Persamaan (4.3) digunakan untuk mengetahui laju ventilasi alamiyah per volume rumah tanaman pada keadaan tidak ditanami. Metode ini berdasarkan pada asumsi bahwa (i) konsentrasi gas yang diinjeksikan tersebar merata dalam rumah tanaman, serta (ii) aliran gas yang diinjeksikan proporsional dengan aliran udara.

$$V_g \frac{dC_i}{dt} = -\Phi_v (C_i(t) - C_o) \quad (4.1)$$

dimana  $V_g$  adalah volume rumah tanaman ( $m^3$ ),  $dC_i$  adalah perbedaan konsentrasi gas di dalam rumah tanaman pada interval waktu  $dt$  (ppm),  $\Phi_v$  adalah laju ventilasi volumetrik ( $m^3/s$ ),  $C_i(t)$  adalah konsentrasi gas di dalam rumah tanaman pada waktu  $t$  (ppm), dan  $C_o$  adalah konsentrasi gas di luar rumah tanaman (ppm). Integral dari Persamaan (4.1) menghasilkan:

$$\ln \frac{C_i(t_1) - C_o}{C_i(t_0) - C_o} = -\frac{\Phi_v}{V_g} (t_1 - t_0) \quad (4.2)$$

dimana  $C_i(t_0)$  adalah konsentrasi gas di dalam rumah tanaman pada waktu  $t=t_0$ , yaitu pada penginjeksian (ppm),  $C_i(t_1)$  adalah konsentrasi gas di dalam rumah tanaman pada waktu  $t=t_1$  (ppm).

Laju ventilasi alamiyah yang didefinisikan sebagai jumlah pertukaran udara antara posisi di dalam dan di luar rumah tanaman per jam dapat dihitung dengan:

$$Q_{air} = \frac{3600}{(t_1 - t_0)} \ln \left[ \frac{C_i(t_0) - C_o}{C_i(t_1) - C_o} \right] \quad (4.3)$$

dimana  $Q_{air}$  adalah laju ventilasi alamiyah dengan metode *dynamic tracer gas* ( $h^{-1}$ ) dan  $(t_1 - t_0)$  adalah interval waktu pengukuran konsentrasi gas.

Untuk rumah tanaman yang terdapat tanaman di dalamnya, jika menggunakan gas  $CO_2$  maka pengaruh kandungan  $CO_2$  yang berasal dari proses fisiologis tanaman harus dimasukkan kedalam perhitungan laju ventilasi. Untuk menghitung laju ventilasi alamiyah akibat faktor angin, metode *tracer gas* cukup sulit dilakukan karena *decay rate* gas sulit diukur pada kondisi lingkungan dengan kecepatan angin yang tinggi.

#### 4.2.2. Metode *Direct Airspeed Measurement*

Bukaan ventilasi pada rumah tanaman di kawasan yang beriklim tropika basah pada umumnya ditutup dengan *screen*. Pertukaran udara yang terjadi pada bukaan ventilasi rumah tanaman dapat diketahui dengan mengukur kecepatan udara yang melalui setiap bukaan ventilasi ( $v_n$ ). Pengukuran dilakukan menggunakan anemometer dengan memperhitungkan keberadaan

*screen* tersebut atau tidak. Laju aliran udara volumetrik  $\Phi$ , yang melewati bukaan ventilasi ke- $n$  dengan metode *direct airspeed measurement* dihitung dengan Persamaan (4.4) kemudian laju ventilasi alamiyah  $Q_{air}$  dihitung dengan Persamaan (4.5).

$$\Phi_{DAM(n)} = A_n v_n \quad (4.4)$$

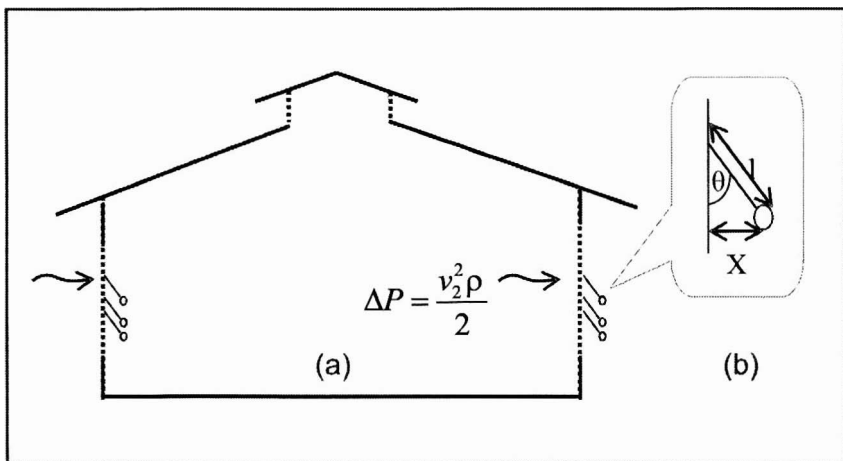
$$Q_{air} = \frac{1}{2A_f} \sum_{i=1}^n \Phi_{DAM(n)} \quad (4.5)$$

dimana  $\Phi_{DAM(n)}$  adalah laju aliran udara volumetrik melalui bukaan ventilasi ke- $n$  ( $m^3/s$ ),  $v_n$  adalah kecepatan udara yang melalui bukaan ventilasi ke- $n$  ( $m/s$ ),  $A_n$  adalah luas bukaan ventilasi ke- $n$  ( $m^2$ ), dan  $A_f$  adalah luas lantai rumah tanaman ( $m^2$ ).

Menurut Kamaruddin (1999), metode *direct airspeed measurement* menggunakan anemometer menghasilkan perhitungan laju ventilasi alamiyah dengan ketepatan yang hampir sama dengan metode *tracer gas*. Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui laju ventilasi alamiyah akibat faktor termal maupun faktor angin.

Karena pengukuran kecepatan aliran udara dilakukan pada setiap bukaan ventilasi untuk memperoleh kecepatan rata-rata pada setiap bukaan maka dibutuhkan banyak anemometer. Jika jumlah anemometer terbatas, pengukuran kecepatan aliran udara pada bukaan ventilasi dapat dilakukan dengan menggunakan bola-bola gabus (*styrofoam*) yang digantung dengan tali pada titik-titik tertentu di setiap bukaan ventilasi (Suhardiyanto *et al.*, 2006b). Pada saat angin berhembus, besarnya simpangan tali diukur

(Gambar 4.4). Besarnya kecepatan aliran udara dihitung dengan persamaan yang diturunkan dari Persamaan Bernoulli sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (4.6) sampai dengan Persamaan (4.13) dengan memasukan data hasil pengukuran simpangan tali tersebut dengan hasil pengukuran menggunakan anemometer (Rahayu, 2001).



Gambar 4.4. Model pengukuran kecepatan aliran udara pada bukaan ventilasi (a) penempatan bola-bola gabus pada *screen* (b) parameter yang diukur.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad (4.6)$$

Karena  $Z_1=Z_2$  dan  $v_1=0$  maka,

$$\Delta P = \frac{v_2^2 \rho}{2} \quad (4.7)$$

Besarnya gaya yang bekerja pada tali adalah:

$$\sum F = ma \quad (4.8)$$



$$mg \sin\theta + F_{\text{angin}} = m \frac{d^2(l\theta)}{dt^2} \quad (4.10)$$

Dari Persamaan Bernoulli diperoleh:

$$F_{\text{angin}} = \frac{v_2^2 \rho}{2} 2\pi r^2 \quad (4.10)$$

Kondisi diasumsikan bersifat *steady state* sehingga  $m \frac{d^2(l\theta)}{dt^2} = 0$  maka

$$-mg \sin\theta + \frac{v_2^2 \rho}{2} 2\pi r^2 = 0 \quad (4.11)$$

$$-mg \frac{x}{l} = -v_2^2 \rho \pi r^2 \quad (4.12)$$

Dari persamaan di atas diperoleh kecepatan aliran udara melewati bukaan ventilasi sebesar

$$v = \sqrt{\frac{mg \frac{x}{l}}{\pi r^2 \rho}} \quad (4.13)$$

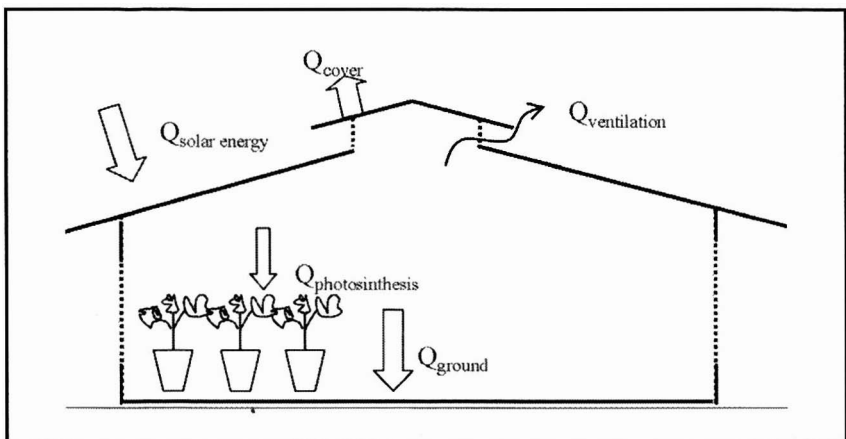
dimana  $v$  adalah kecepatan aliran udara melalui bukaan ventilasi (m/s),  $m$  adalah massa bola gabus (kg),  $g$  adalah percepatan gravitasi (9.8 m/s<sup>2</sup>),  $x$  adalah simpangan tali (m),  $l$  adalah panjang tali (m),  $r$  adalah jari-jari bola gabus (m), dan  $\rho$  adalah kerapatan udara di dalam rumah tanaman (kg/m<sup>3</sup>).

Meskipun dapat dijadikan alternatif, metode pengukuran kecepatan aliran udara menggunakan bola-bola gabus pada setiap bukaan ventilasi cukup sulit dilakukan. Hal ini karena pengukuran

simpangan tali sulit dilakukan secara bersamaan di semua titik pengukuran saat angin bertiup melalui bukaan ventilasi. Selain itu terdapat ketergantungan yang tinggi terhadap akurasi dalam membaca angka pengukur panjang.

#### 4.2.3. Metode *Energy Balance*

Metode *energy balance* merupakan metode yang banyak digunakan untuk memprediksi laju ventilasi alamiyah (Fernandez dan Bailey, 1992; Boulard dan Baille, 1995). Beberapa metode *energy balance* telah dikembangkan untuk memprediksi laju ventilasi alamiyah pada rumah tanaman di kawasan yang beriklim tropika basah menggunakan prinsip keseimbangan energi di dalam rumah tanaman (Kamaruddin, 1999; Harmanto, 2006). Metode *energy balance* dapat digunakan untuk perhitungan laju ventilasi alamiyah akibat faktor termal, faktor angin, maupun kombinasi faktor termal dan faktor angin.



Gambar 4.5. Fluks panas yang terjadi pada rumah tanaman di kawasan yang beriklim tropika basah.

Prinsip metode *energy balance* adalah memprediksi laju pertukaran udara menggunakan keseimbangan panas dan keseimbangan uap air dalam rumah tanaman yang diasumsikan sebagai *solar collector*. Gambar 4.5 memperlihatkan fluks panas yang terjadi pada rumah tanaman dengan bukaan ventilasi dinding dan atap. Sumber panas yang paling utama adalah dari radiasi matahari karena di kawasan yang beriklim tropika basah rumah tanaman tidak menggunakan *heater*.

Pada dasarnya, ventilasi memindahkan panas dari dalam ke luar rumah tanaman melalui aliran udara dan sekaligus mencegah terlalu tingginya suhu udara pada saat radiasi matahari tinggi. Jika *heater* tidak digunakan maka panas yang keluar akibat ventilasi sama dengan panas dari radiasi matahari dikurangi panas yang keluar melalui atap, panas yang digunakan dalam proses fotosintesis, dan panas yang disimpan lantai. Persamaan keseimbangan panas pada rumah tanaman dengan bukaan ventilasi di atap dan dinding adalah:

$$Q_{vent} = Q_s - Q_c - Q_p - Q_f \quad (4.14)$$

dimana  $Q_{vent}$  adalah panas yang dipindahkan oleh proses ventilasi (W),  $Q_s$  adalah radiasi matahari yang diserap oleh rumah tanaman (W),  $Q_c$  panas yang keluar melalui atap rumah tanaman,  $Q_p$  adalah panas yang digunakan untuk fotosintesis, nilainya dapat diabaikan karena hanya 2-3% dari total radiasi matahari (W), dan  $Q_f$  adalah aliran panas ke dalam lantai (W). Dengan demikian, Persamaan (4.14) menjadi:

$$Q_{vent} = Q_s - Q_c - Q_f \quad (4.15)$$

Panas yang keluar akibat ventilasi terdiri dari panas sensibel dan panas laten, dihitung dengan Persamaan (4.16).

$$Q_{vent} = \frac{\Phi_v}{A_f} \rho C_p (T_i - T_o) + \frac{\Phi_v}{A_f} \rho L (W_i - W_o) \quad (4.16)$$

dimana  $\rho$  adalah massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_p$  adalah panas jenis udara ( $\text{J/kgK}$ ),  $L$  adalah panas laten penguapan air ( $\text{J/kg}$ ),  $W_i$  adalah kelembaban mutlak udara di dalam rumah tanaman ( $\text{kg/kg}$ ), dan  $W_o$  adalah kelembaban mutlak udara di luar rumah tanaman ( $\text{kg/kg}$ ).

Radiasi matahari yang diserap oleh rumah tanaman,  $Q_s$  tergantung kepada radiasi matahari global dan transmisivitas bahan penutup atap. Dengan demikian, radiasi matahari netto pada rumah tanaman dapat dihitung dengan Persamaan (4.17).

$$Q_s = \alpha_c I_o = I_i - I_r \quad (4.17)$$

dimana,  $\alpha_c$  adalah koefisien absorptivitas bahan penutup rumah tanaman,  $I_o$  adalah radiasi matahari global di luar rumah tanaman ( $\text{W/m}^2$ ),  $I_i$  adalah radiasi matahari yang masuk ke dalam rumah tanaman ( $\text{W/m}^2$ ), dan  $I_r$  adalah radiasi matahari yang dipantulkan oleh tanaman ( $\text{W/m}^2$ ).

Panas yang keluar melalui atap rumah tanaman adalah:

$$Q_c = U \frac{A_c}{A_f} (T_i - T_o) \quad (4.18)$$

dimana  $U$  adalah transmisivitas panas bahan penutup rumah tanaman ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) yang dihitung dengan Persamaan (4.19) (Jolliet, 1991),  $A_c$  adalah luas permukaan atap rumah tanaman ( $\text{m}^2$ ),  $T_i$  adalah suhu udara di dalam rumah tanaman ( $^{\circ}\text{C}$ ), dan  $T_o$  adalah suhu udara di luar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$U = K_o + K_s + K_s q_s \quad (4.19)$$

$$K_o = \frac{1}{A_f} \left( \frac{G_{c-i} G_{c-o}}{G_{c-i} + G_{c-o} + G_{c-sky}} \right) \quad (4.20)$$

$$K_s = \frac{1}{A_f} \left( \frac{G_{c-i} G_{c-sky}}{G_{c-i} + G_{c-o} + G_{c-sky}} \right) \quad (4.21)$$

$$q_s = \frac{T_o - T_{sky}}{T_i - T_o} \quad (4.22)$$

dimana  $K_o$  adalah pertukaran panas dengan udara di luar rumah tanaman ( $W/m^2K$ ),  $K$  adalah pertukaran panas dengan langit ( $W/m^2K$ ),  $q_s$  adalah koefisien karena pengaruh suatu suhu pada posisi di angkasa atau suhu langit,  $G_{c-i}$  adalah *thermal coupling coefficient* antara penutup dan udara di dalam rumah tanaman ( $W/K$ ),  $G_{c-o}$  adalah *thermal coupling coefficient* antara atap dan udara luar ( $W/K$ ),  $G_{c-sky}$  adalah *thermal coupling coefficient* antara atap dan langit ( $W/K$ ), dan  $T_{sky}$  adalah suhu langit ( $K$ ).

Faktor  $G$  diperoleh dari Jolliet (1991), sedangkan suhu langit diperoleh dari radiasi gelombang panjang atmosfer yang diasumsikan sebagai unit emisivitas. Fluks radiasi gelombang panjang diperoleh dari selisih antara fluks radiasi total yang diukur dengan pyrrometer dengan radiasi matahari yang diukur dengan pyranometer. Suhu langit dapat juga didekati dengan Persamaan (4.23).

$$T_{sky} = 0.0552 T_{out}^{1.5} \quad (4.23)$$

$$Q_f = \dot{m} C p_f (T_f - T_s) \quad (4.24)$$

dimana  $\dot{m}$  adalah massa per unit luasan rumah tanaman ( $\text{kg/m}^2$ ),  $C p_f$  adalah panas jenis lantai ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ),  $T_f$  adalah suhu permukaan lantai ( $^\circ\text{C}$ ), dan  $T_s$  adalah suhu tanah pada kedalaman tertentu yang ditentukan ( $^\circ\text{C}$ ).

Fernandez dan Bailey (1992) serta Boulard dan Baille (1995) telah mengkombinasikan persamaan-persamaan di atas dan memberikan hasil akhir laju ventilasi alamiyah dengan metode *energy balance*, sebagaimana disajikan oleh Kamaruddin (1999) untuk laju ventilasi alamiyah volumetrik, sebagai berikut :

$$\Phi_{EB} = \frac{A_f}{\rho} \frac{\left[ (\alpha_c I_o) - \left( U \frac{A_c}{A_f} (T_i - T_o) \right) - \left( \dot{m} C p_f (T_f - T_s) \right) \right]}{[C p (T_i - T_o) + L (W_i - W_o)]} \quad (4.25)$$

Dan laju pertukaran udara per jam, sebagai berikut :

$$Q_{air} = \frac{3600 \Phi_{EB}}{V_g} \quad (4.26)$$

#### 4.2.4. Metode *Neutral Plane*

Metode perhitungan laju ventilasi alamiyah akibat faktor termal dengan pendekatan *neutral plane* telah banyak dikembangkan diantaranya adalah oleh Bruce (1978) dan Kamaruddin (1999) dan Suhardiyanto *et al.* (2006b). Jika massa jenis udara dalam rumah tanaman lebih kecil daripada massa jenis udara di luar rumah tanaman dan kecepatan udara di luar rendah maka pertukaran udara akan didominasi oleh faktor termal. Udara masuk ke dalam rumah tanaman melalui bukaan ventilasi yang

terletak di bagian bawah dan keluar melalui bukaan ventilasi yang terletak di bagian atas.

Bagian dari bukaan ventilasi yang menjadi tempat masuknya udara (*inlet*) maupun keluarnya udara (*outlet*) tergantung kepada ketinggian posisi bukaan ventilasi. Pada ketinggian tertentu di dalam rumah tanaman terdapat suatu bidang dimana tidak terjadi aliran udara karena tekanan statik di dalam dan di luar adalah sama besar (Brockert dan Albright, 1987). Bidang ini dinamakan *neutral plane* bidang tekanan netral yang berada pada ketinggian  $h$ . Bruce (1978) menyatakan bahwa posisi bidang tekanan netral memberikan gambaran posisi bukaan ventilasi yang berfungsi sebagai *inlet* dan *outlet*.

Dalam perhitungan laju ventilasi karena efek termal, perlu diketahui posisi bidang tekanan netral pada rumah tanaman. Pada bidang tekanan netral yaitu pada ketinggian dari lantai, tekanan udara akibat faktor termal mempunyai nilai yang sama antara posisi di dalam dan luar rumah tanaman, sebagai berikut;

$$P_i(\bar{h}) = P_o(\bar{h}) = \bar{P} \quad (4.27)$$

dimana  $P_i$  dan  $P_o$  masing-masing adalah tekanan udara di dalam dan di luar rumah tanaman (Pa), dan  $\bar{P}$  adalah tekanan udara pada bidang tekanan netral (Pa).

Kecepatan aliran udara pada ketinggian  $h$  di dalam rumah tanaman pada saat tidak ada angin yang bertiup dinyatakan oleh Persamaan (4.28) (Bruce, 1978).

$$v = \frac{|\bar{h} - h|}{\bar{h} - h} \left[ 2g \frac{\Delta\rho}{\rho} |\bar{h} - h| \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.28)$$

dimana  $|\bar{h} - h|$  adalah nilai mutlak dari  $\bar{h} - h$ .

Ketinggian bidang tekanan netral dapat dihitung dengan Persamaan (4.29) (Bruce, 1978).

$$\sum_{j=1}^n \int_{A_j} \frac{|\bar{h} - h|^{\frac{3}{2}}}{\bar{h} - h} dA = 0 \quad (4.29)$$

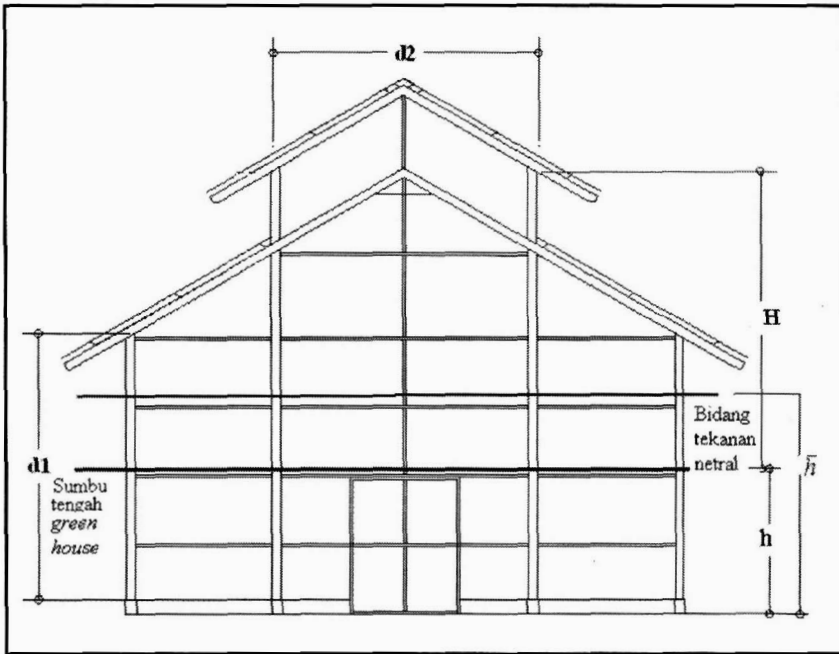
dimana  $n$  adalah jumlah bukaan ventilasi,  $A_j$  adalah luas bukaan ventilasi ( $m^2$ ),  $h$  adalah tinggi bukaan ventilasi dari lantai ke sumbu tengah (m), dan  $\bar{h}$  adalah tinggi bidang tekanan netral dari lantai (m).

Untuk model bangunan rumah tanaman *single-span* seperti dalam Gambar 4.6, Persamaan (4.29) dapat ditulis menjadi:

$$kL_1 \left[ \left( \bar{h} + \frac{d_1}{2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left| \frac{d_1}{2} - \bar{h} \right|^{\frac{3}{2}} \right] + kL_3 \left[ \left( \bar{h} + \frac{d_3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left| \frac{d_3}{2} - \bar{h} \right|^{\frac{3}{2}} \right] - \frac{3}{2} L_2 d_2 |H - \bar{h}|^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (4.30)$$

dimana  $d_1$ ,  $d_3$  adalah lebar bukaan ventilasi dinding (m),  $d_2$  adalah lebar ventilasi atap horizontal (m),  $k$  adalah persentase luasan efektif *screen*,  $L$  adalah panjang bukaan ventilasi (m), dan  $H$  adalah tinggi ventilasi atap dari sumbu tengah ventilasi dinding (m). Notasi untuk dimensi rumah tanaman pada pengukuran laju ventilasi alamiyah dengan metode *neutral plane* diberikan pada Gambar 4.6.





Gambar 4.6. Notasi dimensi rumah tanaman pada pengukuan laju ventilasi alamiah dengan metode *neutral plane*.

Untuk mempermudah perhitungan, Persamaan (4.30) diselesaikan secara iterasi dengan program komputer sebagaimana telah dikembangkan oleh Suhardiyanto *et al.* (2006b). Iterasi dilakukan dengan memasukkan sembarang nilai dugaan  $h$  awal hingga diperoleh  $h$  baru dengan persamaan:

$$\bar{h}_{baru} = \bar{h}_{awal} - \frac{y(\bar{h})}{y'(\bar{h})} \quad (4.31)$$

Iterasi dilakukan terus-menerus dan dihentikan bila memenuhi syarat sebagai berikut:

$$\frac{\bar{h}_{baru} - \bar{h}_{awal}}{\bar{h}_{baru}} < 0.0001 \quad (4.32)$$

Jika  $\bar{h}$  sudah diketahui dan tidak ada angin yang bertiup masuk melalui bukaan ventilasi maka laju ventilasi alamiah akibat faktor termal dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$C_d \int_A v dA = 0 \quad (4.33)$$

dimana  $C_d$  adalah *coefficient of discharge*, merupakan konstanta tanpa dimensi, yang dapat diketahui dari literatur.

Dengan menganggap udara sebagai *perfect gas* dan menggabungkan Persamaan (5.28), (5.29), dan (5.33) maka didapat persamaan laju ventilasi volumetrik dengan metode *neutral plane* adalah sebagai berikut:

$$\Phi_{NP} = C_d \left[ 2g \frac{\Delta T}{T_o} \right]^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^n \int_{A_i} \frac{|\bar{h} - h|^{\frac{3}{2}}}{\bar{h} - h} dA \quad (4.34)$$

Posisi bidang tekanan netral dapat juga diketahui dengan menggunakan *smoke generator*, akan tetapi sulit untuk diamati.

#### 4.2.5. Metode *Wind Pressure Coefficient*

Metode *wind pressure coefficient* digunakan untuk menghitung laju ventilasi alamiah akibat faktor angin. Metode ini dikembangkan oleh Bruce (1974, 1975, 1977), sebagaimana diuraikan oleh Albright (1990). Kamaruddin (1999) menggunakan metode ini untuk perhitungan laju ventilasi alamiah pada *adapted greenhouse* di kawasan yang beriklim tropika. Perhitungan laju ventilasi alamiah dengan metode *wind pressure coefficient* dilakukan dengan menggunakan nilai koefisien tekanan internal ( $C_{pi}$ ). Berdasarkan Persamaan Bernoulli, kecepatan angin yang

melalui bukaan ventilasi ke- $n$  ( $v_n$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$v_n = v \frac{(C_{po} - C_{pi})}{\sqrt{|(C_{po} - C_{pi})|}} \quad (4.35)$$

dimana  $C_{po}$  dan  $C_{pi}$  masing-masing adalah koefisien tekanan angin di luar dan di dalam rumah tanaman. Jika  $v_n$  bernilai positif maka berarti angin bertiup masuk melalui bukaan ventilasi, sedangkan jika  $v_n$  bernilai negatif maka berarti udara keluar dari bukaan ventilasi.

Laju ventilasi alamiyah volumetrik dengan metode *wind pressure coefficient* dapat dihitung dengan persamaan

$$\Phi_{WP} = \frac{1}{2A_g} \sum_{i=1}^n A_n v_n \quad (4.36)$$

dimana  $A_g$  adalah luas lantai rumah tanaman ( $m^2$ ) dan  $A_n$  luas bukaan ventilasi ( $m^2$ ). Koefisien tekanan ( $C_p$ ) menunjukkan sebaran tekanan pada setiap bukaan ventilasi untuk arah angin yang tegak lurus dengan bukaan. Nilai  $C_p$  untuk laju ventilasi alamiyah disajikan pada Tabel 4.3.

Koefisien tekanan bervariasi sesuai dengan posisi masing-masing bukaan ventilasi pada rumah tanaman dan terhadap arah datangnya angin. Bukaan yang terkena tekanan angin mempunyai nilai positif, sedangkan yang berada pada posisi sebaliknya mempunyai nilai negatif. Koefisien tekanan yang diajukan oleh Kozai dan Sase (1978) ini banyak digunakan dalam penentuan laju ventilasi alamiyah.

Tabel 4.3. Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) akibat faktor angin (Kozai dan sase, 1978)

Bukaan ventilasi	Koefisien tekanan ( $C_p$ )
Ventilasi dinding pada sisi <i>windward</i>	0.6
Ventilasi dinding pada sisi <i>leeward</i>	-0.6
Ventilasi atap pada sisi <i>windward</i> pada <i>windward</i> span	-0.12
Ventilasi atap pada sisi <i>leeward</i> pada <i>windward</i> span	-0.7
Ventilasi atap pada sisi <i>windward</i> pada <i>intermediate</i> span	0.3
Ventilasi atap pada sisi <i>leeward</i> pada <i>intermediate</i> span	-0.7
Ventilasi atap pada sisi <i>windward</i> pada <i>leeward</i> span	0.3
Ventilasi atap pada sisi <i>leeward</i> pada <i>leeward</i> span	-0.6

#### 4.1.1. Metode *Stack and Wind*

Untuk keadaan ketika faktor termal dan faktor angin cukup besar maka nilai laju ventilasi alamiyah harus memperhitungkan kedua faktor tersebut. Perhitungan laju ventilasi alamiyah kombinasi faktor termal dan angin dapat menggunakan metode *stack and wind*. Menurut Zhang *et al.* (1989) dan Albright (1990), besarnya laju ventilasi alamiyah netto bukan merupakan penjumlahan kuantitatif dari laju ventilasi kedua faktor tersebut. Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Phi_{TW} = \sqrt{(\Phi_{NP}^2 + \Phi_{WP}^2)} \quad (4.37)$$

dimana  $\Phi_{TW}$  adalah laju ventilasi alamiyah kombinasi termal dan angin ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\Phi_{NP}$  adalah laju ventilasi alamiyah akibat faktor termal

dengan metode *neutral plane* ( $m^3/s$ ) dan  $\Phi_{WP}$  adalah laju ventilasi alamiah akibat faktor angin dengan metode *wind pressure coefficient* ( $m^3/s$ ). Dengan memasukkan Persamaan (4.34) dan (4.36) ke dalam Persamaan (4.37) maka diperoleh hasil akhir persamaan untuk laju ventilasi alamiah dengan metode *stack and wind* (Kamaruddin, 1999) sebagai berikut;

$$\Phi_{SW} = \left[ \left[ \left( \frac{4}{3A_g} c_d LX \right) \left( 2g \frac{\Delta T}{T_o} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 + \left[ c_d \frac{A_T}{2A_g} v_w \frac{(C_{po} - C_{pi})}{\sqrt{|C_{po} - C_{pi}|}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.38)$$

dimana  $c_d$  adalah *coefficient of discharge*,  $A_g$  adalah luas lantai ( $m^2$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ),  $\Delta T$  adalah perbedaan suhu di dalam dan di luar rumah tanaman (K),  $T_o$  adalah suhu di luar rumah tanaman (K),  $L$  adalah panjang bukaan ventilasi alamiah (m),  $X$  ditentukan dari integral tinggi bukaan ventilasi dinding (m),  $A_T$  adalah luas bukaan ventilasi total yang berfungsi sebagai *inlet* ( $m^2$ ),  $v_w$  adalah laju udara yang tegak lurus dengan bukaan ventilasi pada bagian atap (m/s),  $C_{po}$  adalah koefisien tekanan udara di luar, dan  $C_{pi}$  adalah koefisien tekanan udara di dalam rumah tanaman.

### 4.3. Analisis Laju Ventilasi Alamiah

Rumah tanaman yang dirancang dengan baik untuk kawasan yang beriklim tropika mempunyai ciri antara lain pertukaran udara di dalamnya berlangsung secara lancar. Hal ini dapat menjaga suhu udara di dalam rumah tanaman tidak terlalu tinggi (Suhardiyanto *et al.*, 2006b). Analisis terhadap laju

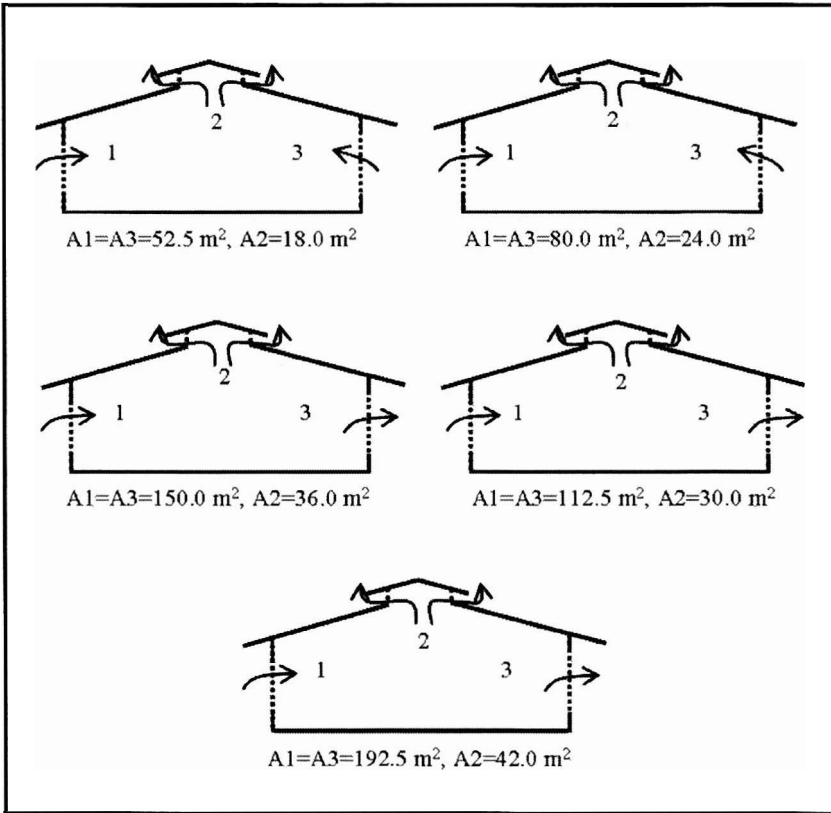
pertukaran udara yang terjadi pada *existing greenhouse* dapat memberikan informasi faktor pemicu terjadinya pertukaran udara (faktor termal, faktor angin, atau kombinasi faktor termal dan faktor angin), fungsi bukaan ventilasi (sebagai *inlet* maupun *outlet*), serta parameter rumah tanaman yang memberi pengaruh langsung maupun tidak langsung terhadap laju ventilasi alamiyah. Bahkan, berdasarkan analisis laju ventilasi alamiyah dapat dilakukan simulasi komputer untuk rumah tanaman yang belum dibangun.

Simulasi berbagai skenario perancangan rumah tanaman dapat dilakukan, sebagaimana dilaporkan oleh Suhardiyanto *et al.* (2006b). Simulasi dilakukan untuk memprediksi laju ventilasi alamiyah pada rancangan rumah tanaman menggunakan data kondisi lingkungan sebagai parameter input. Selanjutnya, output dari simulasi tersebut dapat digunakan untuk rekomendasi perancangan rumah tanaman.

#### **4.3.1. Rumah Tanaman Bentang Tunggal**

Analisis laju ventilasi alamiyah pada rumah tanaman berbentuk *standard peak* dengan atap bersusun dua dan berbentang tunggal di kawasan yang beriklim tropika basah telah dilakukan diantaranya oleh Ardhayanti (1999) dan Suhardiyanto *et al.* (2006b). Ardhayanti (1999) melakukan simulasi komputer untuk mengetahui hubungan luas bukaan ventilasi terhadap besarnya laju ventilasi alamiyah. Perhitungan laju ventilasi alamiyah menggunakan metode *wind pressure coefficient*. Gambar 4.7 memperlihatkan hasil simulasi berupa arah aliran udara pada

masing-masing bukaan untuk berbagai luas bukaan ventilasi rumah tanaman bentang tunggal pada saat kecepatan udara di luar rumah tanaman 3 m/s.



Keterangan:

A: luas bukaan ventilasi ( $\text{m}^2$ )

Kecepatan angin di luar rumah tanaman= 3 m/s

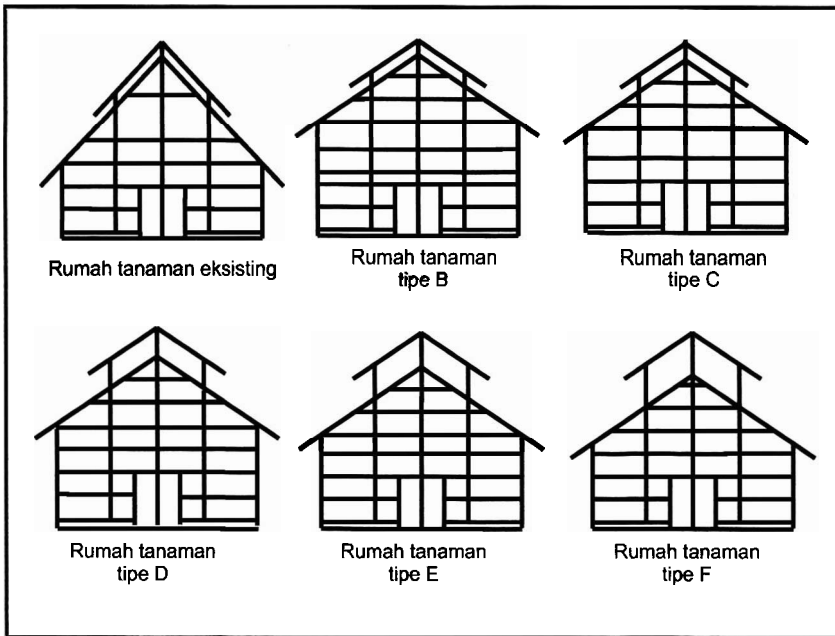
Gambar 4.7. Arah aliran udara pada masing-masing bukaan untuk berbagai luas bukaan ventilasi (Ardhayanti, 1999).

Kombinasi bukaan ventilasi di dinding dan atap serta kecepatan angin memiliki hubungan yang linear positif dengan laju ventilasi. Laju ventilasi akan meningkat dengan bertambah luasnya bukaan ventilasi. Makin besar luasan ventilasi makin besar laju ventilasi sehingga volume udara yang dipertukarkan antara di dalam dan di luar setiap detiknya semakin besar. Agar laju ventilasi alamiyah semakin besar maka semua sisi rumah tanaman perlu diupayakan untuk dapat berfungsi sebagai bukaan ventilasi.

Kemampuan pertukaran udara antara posisi di dalam dan di luar rumah tanaman tergantung kepada rancangan dan ukuran rumah tanaman. Luas bukaan ventilasi tidak berpengaruh langsung terhadap kecepatan aliran udara yang melewati bukaan ventilasi, tetapi berpengaruh terhadap nilai  $C_{pi}$ . Hal inilah yang berpengaruh terhadap kecepatan aliran udara yang melalui bukaan ventilasi (Ardhayanti, 1999).

Suhardiyanto *et al.* (2006b) melakukan analisis dan simulasi bidang tekanan netral dan laju ventilasi alamiyah untuk modifikasi *standard peak greenhouse* tipe curam yang suhu udaranya sangat tinggi. Berbagai alternatif rancangan rumah tanaman (Gambar 4.8) dievaluasi. Laju ventilasi alamiyah pada rancangan-rancangan tersebut dihitung. Hasil simulasi berbagai tipe rumah tanaman tersebut dibandingkan untuk mencari alternatif terbaik bagi rancangan *standard peak greenhouse* berdasarkan laju ventilasi alamiyah dan biaya yang diperlukan untuk memodifikasi atau membangun rumah tanaman baru.





Gambar 4.8. Tampak depan dari berbagai alternatif rancangan modifikasi rumah tanaman yang menjadi bahan analisis (Suhardiyanto et al., 2006b).

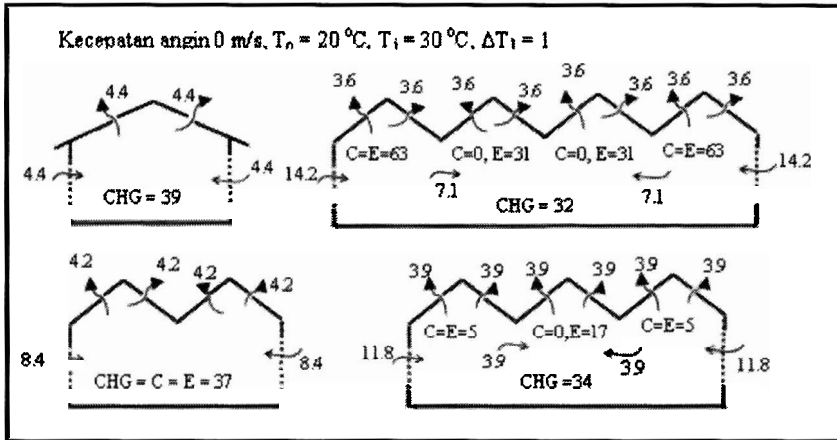
Perhitungan bidang tekanan netral dan laju ventilasi alamiah dilakukan menggunakan program komputer yang dikembangkan dengan *Visual Basic 6.0*. Perhitungan laju ventilasi alamiah menggunakan metode *neutral plane*. Berdasarkan hasil analisis, ketika kecepatan angin kurang dari 2 m/s maka laju ventilasi alamiah cenderung lebih dipengaruhi oleh perbedaan suhu udara di dalam dan di luar. Dari lima alternatif rancangan, dengan tinggi rumah tanaman yang sama, rancangan tipe B memiliki nilai laju ventilasi alamiah yang terbesar dibandingkan tipe lain (Suhardiyanto *et al.*, 2006b).

#### **4.3.2. Rumah Tanaman Bentang Banyak**

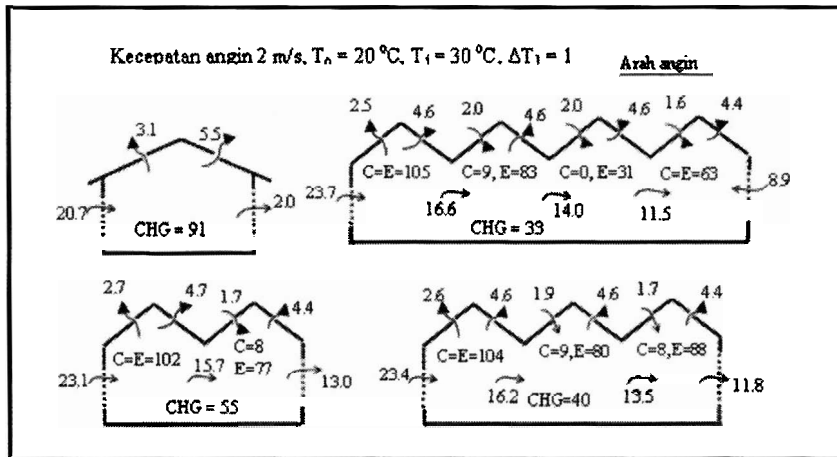
Kozai dan Sase (1978) menyatakan bahwa ketika kecepatan angin kurang dari 2 m/s, jumlah pertukaran udara tergantung perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman. Apabila kecepatan angin lebih dari 2 m/s, jumlah pergantian udara berbanding lurus dengan kecepatan angin dan tergantung kepada jumlah bentang (*span*) serta hampir tidak tergantung perbedaan suhu di dalam dan di luar rumah tanaman.

Sebagai contoh, pada waktu kecepatan angin kurang dari 2 m/s dan perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman sebesar 5 °C, 10 °C, dan 15 °C maka akan terjadi pertukaran udara masing-masing sebanyak 25, 35, dan 45 kali per jam. Hal ini tidak terpengaruh oleh jumlah rumah tanaman. Pada waktu kecepatan angin 3 m/s, pada rumah tanaman bentang tunggal, bentang dua, bentang tiga, dan bentang empat maka akan terjadi pertukaran udara masing-masing sebanyak 100, 80, 60, dan 45 kali per jam. Hal ini tidak tergantung perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman (Kozai dan Sase, 1978). Gambar 4.9, 4.10, dan 4.11 menunjukkan laju aliran udara yang melewati bukaan ventilasi dan jumlah pertukaran udara pada rumah tanaman bentang banyak pada berbagai kecepatan angin. Bukaan ventilasi dinding dapat berperan sebagai inlet maupun outlet, sedangkan bukaan ventilasi atap pada umumnya berperan sebagai outlet

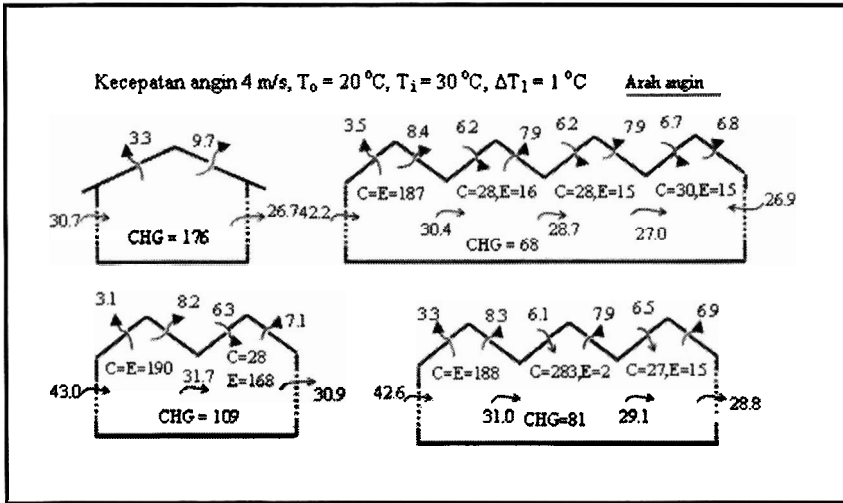
## Ventilasi Alamiyah Pada Rumah Tanaman



Gambar 4.9. Laju aliran udara (kg/s) yang melewati bukaan ventilasi dan jumlah pertukaran udara dalam rumah tanaman pada masing - masing bentang dan semua bagiannya pada waktu  $v = 0 \text{ m/s}$  (Kozai dan Sase, 1978).



Gambar 4.10. Laju aliran udara (kg/s) yang melewati bukaan ventilasi dan jumlah pertukaran udara dalam rumah tanaman pada masing-masing bentang dan semua bagiannya pada waktu  $v = 2 \text{ m/s}$  (Kozai dan Sase, 1978).



Gambar 4.11. Laju aliran udara (kg/s) yang melewati bukaan ventilasi dan jumlah pertukaran udara dalam rumah tanaman pada masing-masing bentang dan semua bagiannya pada waktu  $v = 4\text{ m/s}$  (Kozai dan Sase, 1978).

Ventilasi alamiah sebagai akibat faktor termal terjadi jika rumah tanaman memiliki bukaan ventilasi di dinding dan atap serta adanya perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman. Tetapi pada rumah tanaman *multi-span* yang luas dengan hanya bukaan ventilasi di atap, kemungkinan terjadi ventilasi akibat faktor termal sangat kecil (Bot, 1983; Papadakis *et al.*, 1996).