

ANALISIS SUDUT DATANG RADIASI MATAHARI UNTUK PENGEMBANGAN MODEL PINDAH PANAS PADA RUMAH KACA DI DAERAH TROPIKA

Analysis of Incident Angle of Solar Radiation for the Development of Heat Transfer Model for Greenhouses in Tropical Region

Herry Suhardiyanto¹, Yudi Chadirin², Titin Nuryawati³, Yayu Romdhonah⁴

ABSTRACT

A heat transfer model has been developed for a naturally ventilated greenhouse under the tropical climatic conditions. In the tropical region, greenhouses are characterized by high exposure in solar radiation and air exchange through natural ventilation. Therefore in this research, incident angle of solar radiation on the greenhouse roof surface has been considered as an important factor to improve the accuracy in calculating the radiation received by the greenhouse. The heat transfer model consists of four layers represent the cover, inside air, floor surface and soil layers of the greenhouse. The model was applied to a naturally ventilated standard-peak greenhouse. A computer program was developed to predict the temperature of the inside air. Incident angle of direct solar radiation on roof surface and outside microclimate parameters data were used as the input values. Heat transfer equations were solved by using the Runge-Kutta Method while the angle of direct solar radiation with the roof surface was calculated by using the principles of geometry. Results show that the model performed well in predicting the temperature of the inside air as compared to that of the measured value.

Keywords : *greenhouse modeling, temperature prediction, incident angle of solar radiation*

Diterima: 4 Januari 2007; Disetujui: 26 Februari 2007

PENDAHULUAN

Penggunaan rumah kaca di negara beriklim tropika seperti Indonesia lebih ditujukan untuk melindungi tanaman dari hujan dan hama. Tetapi, banyak rumah

kaca dibangun menggunakan rancangan yang sama dengan rancangan rumah kaca di daerah subtropika. Akibatnya, suhu udara di dalam rumah kaca sering kali sangat tinggi. Ketika merancang rumah kaca, penentuan bahan atap

¹ Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680, herryuhardiyanto@ipb.ac.id

² Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680, yudi@ipb.ac.id

³ Alumnus Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680, ti2n_nuryawati@yahoo.com

⁴ Alumnus Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, dona_tep@yahoo.com

arah serta sudut kemiringannya perlu memperhatikan besarnya radiasi matahari yang masuk ke dalamnya. Atap rumah kaca di daerah tropika perlu dilengkapi dengan *open ridge* sehingga udara panas dapat keluar dari rumah kaca secara leluasa melalui puncak atap. Dinding rumah kaca ditutup *screen* untuk memungkinkan terjadinya ventilasi alamiah sekaligus mencegah masuknya hama ke dalamnya.

Di daerah subtropika, arah bangunan rumah kaca pada umumnya adalah utara-selatan. Sementara itu, arah bangunan rumah kaca di daerah tropika seperti Indonesia pada umumnya tidak teratur. Kemiringan atap rumah kaca di Indonesia seringkali hanya dipertimbangkan dari segi konstruksi saja tanpa pertimbangan segi optik. Suatu perhitungan yang akurat diperlukan untuk memprediksi jumlah radiasi matahari yang masuk dan diserap oleh struktur rumah kaca. Dalam hubungan ini, sudut datang radiasi matahari yang bervariasi sepanjang hari sangat berpengaruh terhadap suhu udara di dalam rumah kaca.

Model pindah panas untuk rumah kaca sudah banyak dikembangkan pada kondisi iklim subtropika (Takakura et al., 1971, Bot, 1983, dan Avissar et al., 1982). Model pindah panas tersebut seringkali memasukkan faktor pemanasan dengan menggunakan berbagai alat pemanas yang tidak lazim di daerah tropika tetapi tidak memasukkan pengaruh sudut datang radiasi matahari dan komponen ventilasi alamiah yang justru dominan untuk rumah kaca di daerah tropika. Kinerja model pindah panas dalam memprediksi suhu udara di dalam rumah kaca akan makin baik jika model tersebut memperhitungkan sudut zenith, *azimuth*, deklinasi matahari, orientasi bangunan, dan sifat optik atap. Karena itu, suatu model pindah panas yang memperhitungkan sudut datang radiasi matahari sangat diperlukan. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis

perpindahan panas di dalam rumah kaca dengan memperhitungkan sudut datang radiasi matahari dan laju ventilasi alamiah, membuat program komputer untuk memprediksi suhu udara di dalam rumah kaca, dan melakukan validasi model pindah panas tersebut.

METODE

Perhitungan Radiasi Matahari Berdasarkan Sudut Datang

Besarnya radiasi matahari yang diterima oleh bidang horisontal di suatu lokasi pada tanggal tertentu dari sistem kalender berbasis matahari dipengaruhi oleh kedudukan lokasi tersebut menurut garis lintang dan ketinggian. Prediksi besarnya radiasi matahari yang masuk ke dalam rumah kaca dapat dilakukan secara lebih teliti dengan mempertimbangkan arah kemiringan atap rumah kaca dan sudut datang radiasi matahari pada atap tersebut. Perubahan posisi matahari menentukan sudut datang tersebut dan besarnya radiasi matahari yang diterima suatu bidang horisontal di permukaan bumi. Sudut datang radiasi matahari pada permukaan atap rumah kaca tergantung pada arah dan kemiringan atap tersebut serta posisi matahari. Posisi matahari di suatu tempat dengan *latitude* tertentu dapat diketahui dengan persamaan:

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos h + \sin \phi \sin \delta \quad (1)$$

dimana α adalah *azimuth* atau ketinggian matahari ($^{\circ}$), ϕ adalah *latitude* atau garis lintang ($^{\circ}$), δ adalah deklinasi matahari ($^{\circ}$), h adalah sudut jam matahari ($^{\circ}$). Deklinasi matahari merupakan sudut yang dibentuk oleh matahari dengan bidang equator yang pada setiap saat dapat diperkirakan menggunakan persamaan sebagai berikut (Jansen, 1995):

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2)$$

dimana n adalah bilangan hari (*Julian day*) dari tahun yang bersangkutan. Sudut jam matahari adalah 15° per jam, negatif pada pagi hari, sama dengan nol pada siang hari dan positif pada sore hari. Sudut jam matahari untuk Waktu Indonesia Barat (WIB) dengan lokasi pada *longitude* tertentu adalah:

$$h = \left[(WIB - 12) + \left(\frac{L_g - 105}{15} + EQT \right) \right] \times 15 \quad (3)$$

dimana L_g adalah *longitude* atau garis bujur ($^\circ$) dan EQT adalah *equation of time*. EQT merupakan persamaan waktu yang besarnya adalah (Caruthers et al., 1990):

$$EQT = 5.0323 - 100.976 \sin(t) + 595.275 \sin(2t) + 3.6858 \sin(3t) - 12.47 \sin(4t) - 430.847 \cos(t) + 12.5024 \cos(2t) + 18.25 \cos(3t) \quad (4)$$

dimana $t = (279.134 + 0.985647 n)$.

Sudut datang radiasi matahari dapat dihitung dari nilai kosinusnya. Nilai kosinus sudut datang radiasi matahari pada sebuah atap bangunan dapat diperkirakan dengan persamaan (5) dan

(6) (Esmay and Dixon, 1983). Pada Gambar 1 disajikan skema kosinus sudut datang radiasi matahari arah timur (K_T) dan barat (K_B) pada atap dari sebuah bangunan dengan arah bubungan utara-selatan. Nilai kosinus sudut datang radiasi matahari untuk atap yang menghadap timur dan barat dapat dihitung dengan persamaan (5).

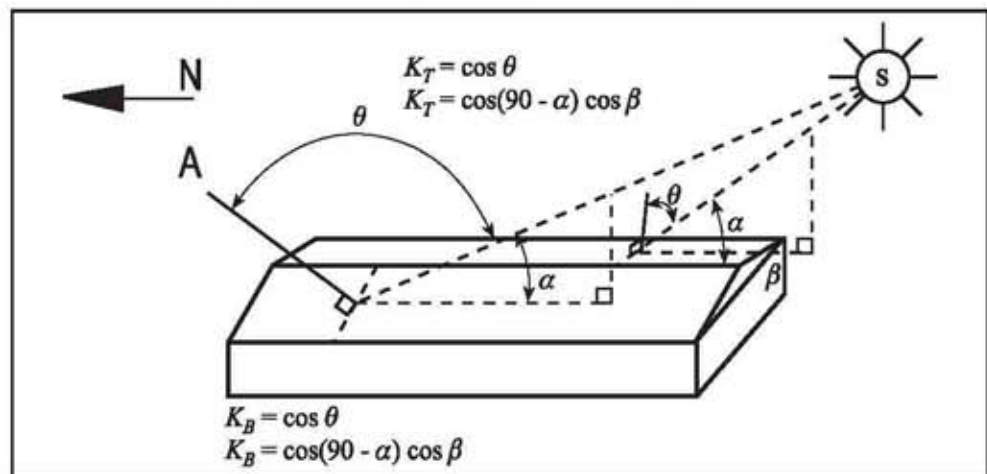
$$K_T = K_B = \cos(90 - \alpha) \cos \beta \quad (5)$$

dimana K_T adalah kosinus sudut datang radiasi matahari untuk atap yang menghadap timur, K_B adalah kosinus sudut datang radiasi matahari untuk atap yang menghadap barat dan β adalah sudut kemiringan atap ($^\circ$).

Salah satu bentuk atap rumah kaca yang umum di Indonesia adalah *standard peak*. Kosinus sudut datang radiasi matahari untuk atap rumah kaca tipe *standard peak* adalah merupakan angka rata-rata K_T dan K_B :

$$K = (K_T + K_B) / 2 \quad (6)$$

dimana K adalah kosinus sudut datang radiasi matahari pada atap rumah kaca tipe *standard peak*.

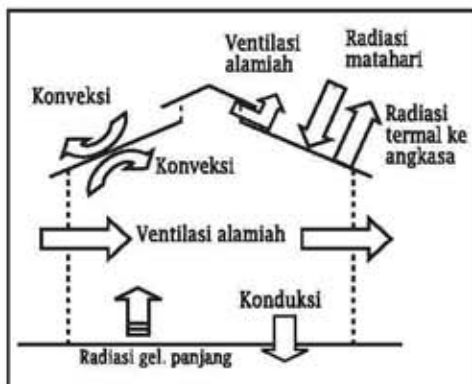


Gambar 1. Skema sudut datang radiasi matahari arah timur (K_T) dan barat (K_B) pada atap dari sebuah bangunan dengan arah bubungan utara-selatan (Esmay and Dixon, 1983).

Pengembangan Model Pindah Panas untuk Rumah Kaca

Dalam pengembangan model pindah panas untuk rumah kaca digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Sistem dapat dibagi kedalam 4 elemen vertikal yaitu atap rumah kaca, udara di dalam rumah kaca, permukaan lantai, dan lapisan tanah.
2. Semua elemen vertikal rumah kaca tersebut homogen secara horizontal dan vertikal kecuali lapisan tanah yang dibagi menjadi dua subelemen yang homogen secara horizontal.
3. Massa udara dalam rumah kaca tidak diperhitungkan.
4. Kondisi batas lingkungan termal sistem rumah kaca adalah suhu udara luar, kecepatan angin, radiasi matahari dan suhu tanah terdalam yang masih dapat ditentukan.
5. Koefisien pindah panas konveksi pada permukaan lantai (h_l) dan karena pengaruh aliran udara melalui ventilasi (h_v) tidak berubah selama simulasi.
6. Aliran udara di dalam rumah kaca terjadi dengan seragam dan dalam arah horizontal.
7. Transmisivitas, absorptivitas dan reflektivitas atap rumah kaca dianggap tidak berubah dengan perubahan sudut datang radiasi matahari



Gambar 2. Skema perpindahan panas pada empat elemen model pindah panas yang dikembangkan dalam penelitian.

Perpindahan panas di dalam rumah kaca merupakan proses yang rumit sehingga tidak mudah untuk membangun sebuah model pindah panas yang meliputi seluruh peristiwa pindah panas tersebut. Untuk menyederhanakan model pindah panas maka sistem pindah panas pada rumah kaca dibagi menjadi empat lapisan subsistem secara vertikal yaitu atap, udara dalam, permukaan lantai, dan lapisan tanah. Proses-proses pindah panas yang terjadi dan diperhitungkan dalam model pindah panas pada penelitian ini disajikan dalam Gambar 2.

Pindah panas yang terjadi pada keempat elemen dalam sistem panas untuk rumah kaca tersebut dapat dianalisis dengan persamaan keseimbangan panas pada setiap elemen per satuan luas sebagai berikut:

$$c_o \times w \times dT_c / dt = ((I_o \times \alpha_s \times K) + \sigma \times \alpha_i \times ((T_c + 273)^4 - T_{sky}^4) - h_l \times r \times (T_c - T_{in}) - h_w \times r \times (T_c - T_{out})) \quad (7)$$

dimana c_o adalah panas jenis volumetrik bahan penutup ($\text{kJ/m}^3 \text{K}$), w adalah ketebalan lapisan bahan penutup (m), T_c adalah suhu atap rumah kaca ($^{\circ}\text{C}$), I_o adalah radiasi global matahari pada bidang horisontal (W/m^2), α_s adalah absorptivitas bahan penutup rumah kaca terhadap gelombang pendek, K adalah kosinus sudut datang radiasi matahari, σ adalah konstanta Stefan Boltzman ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$), α_i adalah absorptivitas bahan penutup rumah kaca terhadap gelombang panjang, T_{sky} adalah angka pendekatan suhu langit (K), h_l adalah koefisien pindah panas konveksi dari atap bagian dalam ke udara dalam ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$), r adalah rasio luas atap terhadap luas lantai, T_{in} adalah suhu udara dalam rumah kaca ($^{\circ}\text{C}$), h_w adalah koefisien pindah panas konveksi di atap bagian luar karena pengaruh angin ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$) dan T_{out}

adalah suhu udara di luar rumah kaca (°C).

Koefisien pindah panas konveksi karena pengaruh angin (h_w) pada permukaan datar dihitung dengan persamaan (Duffie and Beckmann, 1980):

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad (8)$$

dimana v adalah kecepatan angin (m/s).

2. Keseimbangan panas pada udara dalam

$$c_a \times l \times dT_{in}/dt = h_i \times r \times (T_c - T_{in}) + h_f \times (T_f - T_{in}) + h_s \times (T_{out} - T_{in}) + Q_{in} \times \tau \times I_o \times K \quad (9)$$

dimana c_a adalah panas jenis volumetrik udara ($\text{kJ/m}^3 \text{K}$), l adalah tinggi rata-rata rumah kaca (m), h_f adalah koefisien pindah panas konveksi dari permukaan lantai ke udara dalam ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), T_f adalah suhu permukaan lantai ($^\circ\text{C}$), h_s adalah koefisien pindah panas konveksi karena pengaruh aliran udara melalui ventilasi ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), Q_{in} adalah panas sensibel yang diserap tanaman dalam rumah kaca, τ adalah transmisivitas bahan penutup rumah kaca.

3. Keseimbangan panas pada permukaan lantai

$$c_f \times z_0 \times dT_f/dt = \alpha_f \times I_o \times \tau \times K - 2 \times k_f \times (T_f - T_{z1}) / (z_0 - z_1) - h_f \times (T_f - T_{in}) - \sigma \times \epsilon \times (T_f + 273)^4 - (T_c + 273)^4 \quad (10)$$

dimana c_f adalah panas jenis volumetrik lantai ($\text{kJ/m}^3 \text{K}$), z_0 adalah ketebalan lapisan tanah yang mewakili suhu permukaan tanah (m), α_f adalah absorptivitas panas lantai, k_f adalah konduktivitas panas lantai (W/m K), T_{z1} adalah suhu lapisan tanah pada kedalaman 0.0315 m ($^\circ\text{C}$), z_1 adalah

ketebalan lapisan tanah yang mewakili lapisan pertama (m), ϵ adalah emisivitas panas lantai.

4. Keseimbangan panas pada lapisan tanah

$$c_f \times z_1 \times dT_{z1}/dt = 2 \times k_s \times (T_f - T_{z1}) / (z_0 - z_1) + 2 \times k_s \times (T_d - z_1) / z_1 \quad (11)$$

dimana k_s adalah konduktivitas panas pada tanah ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$) dan T_d adalah suhu tanah dibawah lapisan tanah yang dianggap konstan ($^\circ\text{C}$).

Pembuatan Program Komputer dan Validasinya

Analisis sudut datang radiasi matahari dilakukan untuk mengetahui besarnya radiasi matahari langsung yang diserap dan ditransmisikan oleh atap rumah kaca. Selanjutnya, suhu atap rumah kaca, suhu udara dalam rumah kaca, suhu permukaan lantai dan suhu dalam tanah dihitung dari kondisi batas suhu udara di luar rumah kaca dan suhu di bawah lapisan tanah dengan menggunakan prinsip keseimbangan panas sebagaimana disajikan dalam persamaan (7) sampai dengan (11). Sebuah program komputer dengan bahasa Q-BASIC dibuat untuk memecahkan persamaan-persamaan tersebut. *Input* program adalah karakteristik elemen-elemen rumah kaca dan data cuaca hasil pengukuran di sekitar rumah kaca, sedangkan *output*nya adalah hasil pendugaan suhu udara di dalam rumah kaca.

Parameter yang diukur di lapangan adalah meliputi kondisi cuaca di sekitar rumah kaca yaitu kecepatan angin, arah angin, suhu udara, tekanan udara, curah hujan dan radiasi matahari, sedangkan di dalam rumah kaca terdiri dari suhu atap, suhu udara dalam rumah kaca, suhu permukaan lantai, suhu batas lantai dan tanah dan suhu lapisan tanah pada kedalaman 0.315 m. Pengambilan data dilakukan mulai pukul 06:00 WIB sampai

dengan pukul 18:00 WIB dan dicatat tiap 10 menit. Validasi program komputer dilakukan dengan menggunakan analisis regresi pada hubungan linear antara suhu hasil simulasi dengan hasil pengukuran.

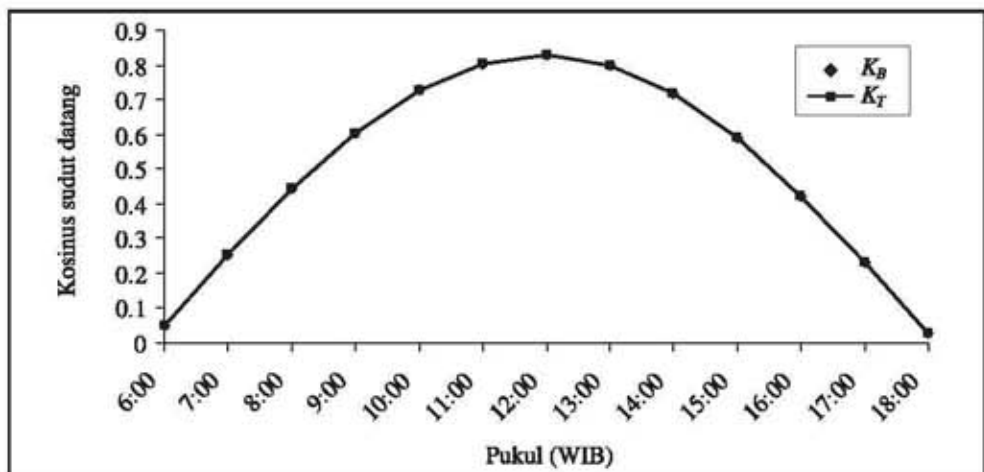
Tempat dan Waktu Percobaan

Percobaan dilakukan di rumah kaca *University Farm*, Institut Pertanian Bogor (IPB) di Cikabayan, Kampus IPB Darmaga, Bogor. Lokasi percobaan terletak pada 6.33 LS dan 106.42 BT. Rumah kaca yang digunakan adalah rumah kaca *single-span tipe standard peak* dengan ukuran panjang 20 m, lebar 7.5 m dan tinggi bubungan 7.3 m. Luas lantai 150 m² dan luas atap 88.4 m². Konstruksi rumah kaca terdiri dari tiang utama terbuat dari baja WF (*Wide Flange*), atap dari kaca setebal 8 mm, dinding dari *screen* dengan ukuran lubang 1 mm² dan lantai terbuat dari *paving block*. Rumah kaca dibangun dengan orientasi Utara-Selatan, dengan kemiringan atap 30°. Tidak terdapat tanaman di dalam rumah kaca. Pengambilan data di lapangan dilakukan selama 2 minggu pada bulan Juni sampai Juli 2006 untuk kondisi cuaca cerah, berawan dan hujan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sudut Datang Radiasi Matahari pada Atap Rumah Kaca

Nilai kosinus sudut datang radiasi matahari pada bidang atap rumah kaca yang menghadap ke timur (K_T) sama dengan pada bidang atap yang menghadap barat (K_B). Nilai K_T dan K_B pada pukul 06:00 WIB adalah 0.049 dan terus meningkat mencapai puncaknya pada nilai 0.828 pada pukul 12:00 WIB. Setelah pukul 12:00 WIB, nilai K_T dan K_B turun secara bertahap sampai mencapai nilai 0.027 pada sore hari. Gambar 3 menunjukkan nilai kosinus sudut datang radiasi matahari pada atap rumah kaca. Nilai kosinus sudut datang radiasi matahari (K) berubah sejalan dengan berubahnya *altitude* (α) atau ketinggian matahari. Semakin besar nilai ketinggian matahari maka nilai K juga semakin besar, dan ketika α mencapai maksimum, K juga mencapai maksimum. Nilai α dan K terus naik sampai tengah hari dan setelah itu turun sampai sore hari.



Gambar 3. Kosinus sudut datang radiasi matahari arah timur (K_T) dan barat (K_B) pada bidang atap rumah kaca dengan arah bubungan utara selatan tanggal 21 Juni 2006.

Validasi Model Pindah Panas dalam Rumah Kaca

Karakteristik rumah kaca yang meliputi dimensi rumah kaca, karakteristik bahan atap, kemiringan atap, sifat fisik udara di dalam rumah kaca dan karakteristik lantai dijadikan *input* dalam validasi model pindah panas dalam rumah kaca. Data yang digunakan dalam validasi model adalah hasil pengukuran tanggal 21 Juni, 22 Juni dan 23 Juni 2006 yang dipilih mewakili kondisi cuaca berawan atau berawan dan hujan dengan radiasi total harian secara berturut-turut sebesar 5.028 Wh/m², 4.616 Wh/m² dan 4.692 Wh/m². Hasil pengukuran tanggal 24 Juni, 26 Juni dan 30 Juni 2006 dipilih untuk mewakili kondisi cuaca cerah dengan nilai radiasi total harian berturut-turut sebesar 5.677 Wh/m², 5.394 Wh/m² dan 5.529 Wh/m².

Perhitungan untuk menduga suhu udara di dalam rumah kaca dilakukan dengan menggunakan metode Runge-Kutta. Metode ini mempunyai kelebihan yaitu lebih mudah dibandingkan dengan metode yang lain seperti metode Deret Taylor, Euler dan Heun. Hal ini karena dalam metode Runge-Kutta tidak dibutuhkan perhitungan turunan fungsi. Metode ini juga dapat mencapai derajat ketelitian yang lebih tinggi dengan evaluasi pada titik terpilih dalam setiap langkah, tidak seperti pada metode Euler dimana galat setiap langkah semakin menumpuk dengan bertambahnya langkah. Dalam penelitian ini, hasil yang diperoleh dari penyelesaian persamaan dengan metode Runge-Kutta ternyata cukup baik, sebagaimana dapat dilihat dari persamaan regresi yang dihasilkan.

Perhitungan dimulai dengan data untuk pukul 6:00 WIB setiap hari. Data suhu atap, udara dalam, permukaan lantai dan suhu tanah pada kedalaman z_1 hasil pengukuran sebelum pukul 6:00 WIB dijadikan *input* dalam perhitungan tersebut. Laju ventilasi alami yang terjadi dalam rumah kaca sangat berpengaruh terhadap keseimbangan panas dalam

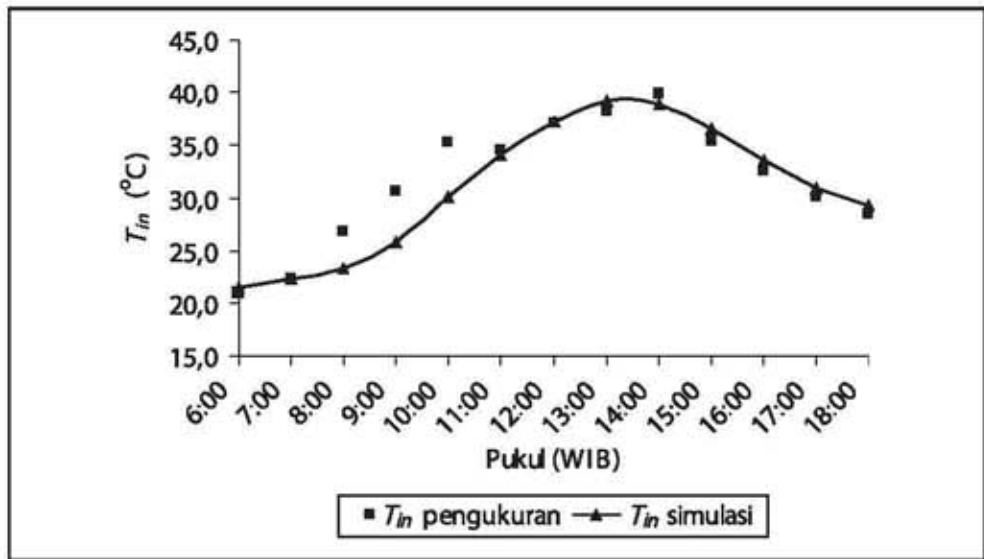
Tabel 1. Nilai konstanta yang digunakan dalam simulasi pendugaan suhu udara di dalam rumah kaca.

Simbol	Nilai
α_1	0.92 (Esmay and Dixon, 1983)
α_2	0.925 (Esmay and Dixon, 1983)
α_f	0.65 (Duffie and Beckmann, 1980)
c_w	1 kJ/m ³ K (Hukseflux Thermal Sensors, 2006)
c_o	2184 kJ/m ³ K (Hukseflux Thermal Sensors, 2006)
c_r	1940 kJ/m ³ K (Hukseflux Thermal Sensors, 2006)
ε	0.9 (Hukseflux Thermal Sensors, 2006)
h_f	7 W/m ² C
h_v	3 W/m ² C
k_f	1.28 W/m K (Hukseflux Thermal Sensors, 2006)
k_s	0.34 W/m °C (Papadakis et al., 1989)
l	5.673 m
ϕ	6.33 LS
L_g	106.42 BT
Q_{at}	0.33
T_L	31.5 °C
T_{co}	18.8 °C
T_{fo}	24.4 °C
T_{in0}	20.6 °C
T_{z10}	27.9 °C
w	0.008 m
z_0	0.065 m
z_1	0.315 m
σ	5.67×10^8 W/m ² K ⁴
τ	0.6 (Giacomelli et al., 2006)

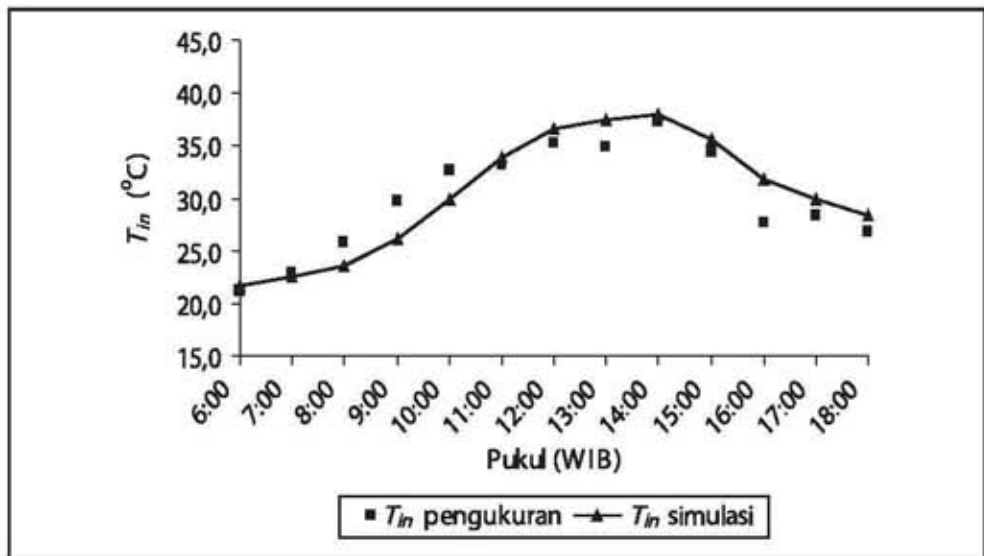
rumah kaca yang pada akhirnya berpengaruh terhadap suhu udara di dalam rumah kaca. Laju ventilasi berpengaruh pada koefisien pindah panas konveksi yang disebabkan oleh adanya ventilasi (h_v). Semakin besar laju ventilasi maka semakin besar nilai h_v dan semakin besar pindah panas yang terjadi. Besarnya laju ventilasi alami dipengaruhi oleh kecepatan angin, besarnya bukaan dan perbedaan suhu di dalam dan di luar rumah kaca. Nilai konstanta yang

digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran. Perbandingan suhu hasil simulasi dengan hasil pengukuran disajikan pada Gambar 4, 5, dan 6.

Perbedaan rata-rata suhu harian antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran pada tanggal 21 Juni, 23 Juni dan 24 Juni 2006 masing-masing adalah 1.7 °C, 1.4 °C, dan 1.7 °C. Pengujian keakuratan hasil simulasi dilakukan dengan analisis regresi yang



Gambar 4. Perbandingan suhu udara dalam rumah kaca hasil simulasi dengan hasil pengukuran pada cuaca berawan (21 Juni 2006).

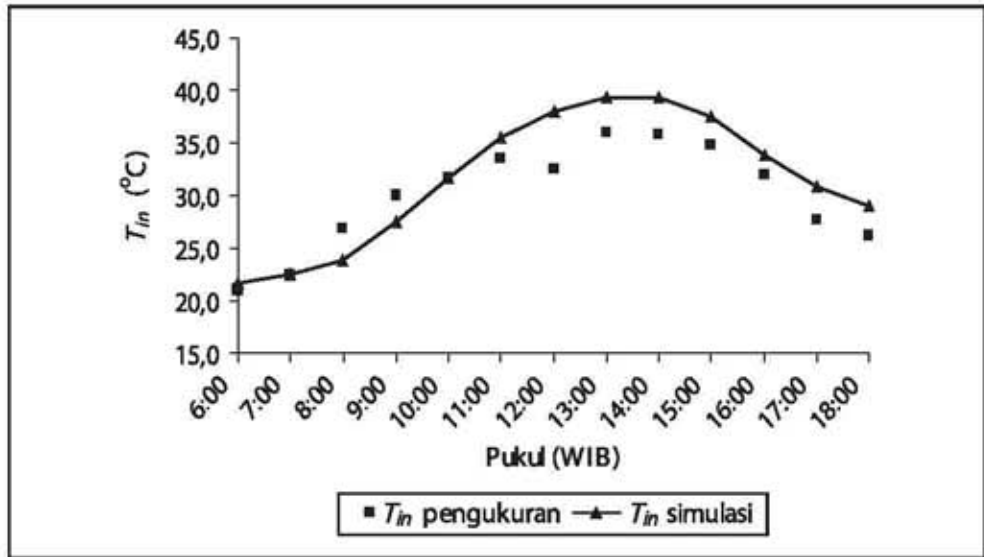


Gambar 5. Perbandingan suhu udara dalam rumah kaca hasil simulasi dengan hasil pengukuran pada cuaca berawan dan hujan (23 Juni 2006).

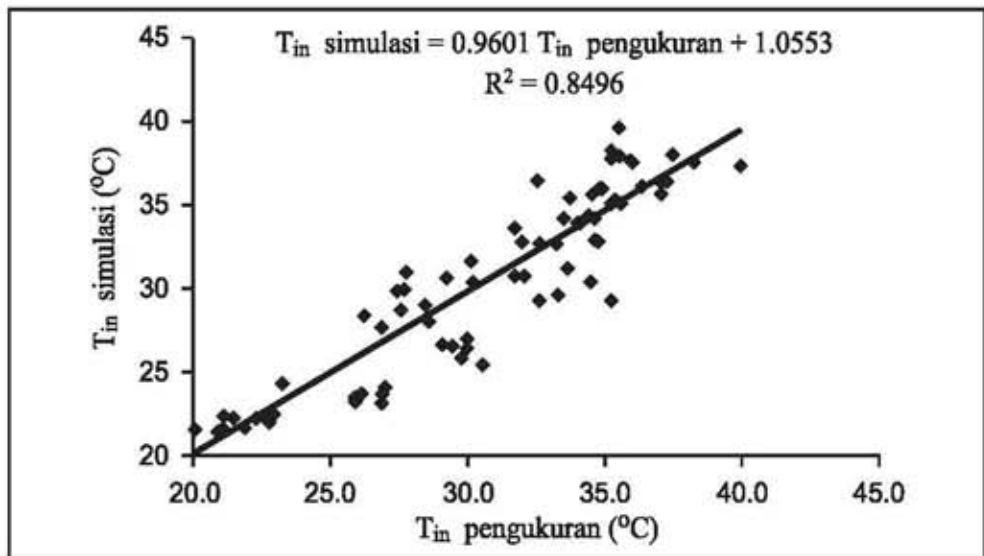
terbentuk pada hubungan linear antara suhu hasil pengukuran dan hasil simulasi. Gambar 7 menunjukkan hubungan antara suhu udara hasil simulasi dengan hasil pengukuran. Persamaan regresi yang terbentuk adalah $Y = 0.9601 X + 1.0553$, sedangkan koefisien regresinya adalah

sebesar 0.8496. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi cukup akurat karena gradiennya mendekati satu dan *intersep*-nya mendekati nol.

Asumsi yang digunakan dalam model pindah panas ternyata cukup baik karena perbedaan rata-rata suhu udara harian



Gambar 6. Perbandingan suhu udara dalam rumah kaca hasil simulasi dengan hasil pengukuran pada cuaca cerah (24 Juni 2006).



Gambar 7. Hubungan linear antara suhu udara dalam rumah kaca hasil simulasi dengan hasil pengukuran.

hasil pendugaan menggunakan model dan data hasil pengukuran tidak terlalu besar, yaitu kurang dari 2 °C. Penggunaan asumsi yang lebih rinci misalnya dengan menganggap lapisan model tidak homogen mungkin dapat menghasilkan pendugaan suhu yang lebih baik.

KESIMPULAN

Model pindah panas dalam rumah kaca yang dikembangkan ternyata cukup baik. Hal ini terbukti dari hasil simulasi suhu udara di dalam rumah kaca yang ternyata mendekati hasil pengukuran. Dekatnya hasil simulasi dengan hasil pengukuran ini antara lain karena perhitungan radiasi matahari yang masuk kedalam rumah kaca dilakukan dengan lebih akurat yaitu dengan memperhatikan sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan atap. Karena itu dalam merancang rumah kaca untuk daerah tropika, sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan atap perlu diperhitungkan. Selanjutnya, model ini dapat dikembangkan menjadi suatu *software* untuk menentukan sudut atap yang optimal bagi posisi lintang dan bujur tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Avissar, R., Ytshaq M. 1982. Verification study of numerical greenhouse microclimate model. *Trans. ASAE*: 1711- 1920.
- Bot, G.P.A. 1983. *Greenhouse Climate: from Physical Processes to a Dynamic Model*. Thesis. Agricultural University of Wagenigen, Netherland.
- Caruthers, et al.1990. dalam Marsh, Andrew. "Manual Calculation Method". 1999. <<http://fridge.arch.uwa.edu.au/>>

- Duffie, J.A., W. Beckman. 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Esmay, M.L., J.E. Dixon. 1983. *Environmental Control for Agricultural Buildings*. The AVI Publishing Inc., Westport, Connecticut, USA.
- Giacomelli, G. A. and William J. R. 2006. *Greenhouse Covering System*. www.ag.arizona.edu
- Hukseflux Thermal Sensors. 2006. *Thermal Conductivity Science*. www.hukseflux.com. 5 Agustus 2006
- Jansen, T. J. 1995. *Teknologi Rekayasa Surya*. Diterjemahkan oleh Wiranto Arismunandar. PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Papadakis et al., 1989. Soil Energy Balance Analysis of A Solar Greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 43: 231 – 243.
- Takakura, T., K.A. Jordan and L.L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. ASAE* : 964 - 971.