

ANALISIS PINDAH PANAS PADA PENDINGINAN DALAM TANAH UNTUK SISTEM HIDROPONIK

Heat Transfer Analysis of Ground Cooling for Hydroponics System

Herry Suhardiyanto¹, Muhammad Maftuh Fuadi², Yeni Widaningrum³

ABSTRACT

Zone cooling is used in greenhouses to maintain the area surrounding the plants at a level of temperature that is not too high and can be tolerated by the plants, even though air temperature inside the greenhouse rises some degrees above the temperature level of outside air. Cooling the root zone by distributing the cooled nutrient solution is one of the most effective methods of zone cooling. In this experiment, ground environment with a relatively low temperature has been used to reduce the temperature of nutrient solution by placing the nutrient solution tank about 7 m depth under the ground (surface). It has been shown that the method was efficient in energy use, because it need only energy for pumping the water from the depth to the floor level through a vertical pipe. Temperature of nutrient solution flowing out from the emitter with the tank placed under the ground (surface) could be maintained 0.1 to 1.9 °C lower than that sourced from tank placed at floor level. A heat transfer model has been developed to predict the nutrient solution temperature flowing out from the vertical pipe. It has been shown that the predicted temperature of nutrient solution agreed well with that of the measured temperatures.

Keywords: drip irrigation system, heat transfer analysis, ground cooling.

Terima: 11 Agustus 2007; **Disetujui:** 3 Nopember 2007

PENDAHULUAN

Metode pengendalian lingkungan untuk rumah kaca di daerah beriklim panas dan lembab pada siang hari masih belum banyak diterapkan. Hal ini disebabkan sulitnya menurunkan suhu udara di dalam rumah kaca pada kondisi tersebut yaitu ketika radiasi matahari yang diterima sangat besar. Bila digunakan pendingin mekanis untuk

menurunkan suhu udara di dalam rumah kaca, maka dibutuhkan energi yang sangat besar. Penggunaan *evaporative cooling* untuk pendinginan udara di dalam rumah kaca tidak efektif ketika kelembaban udara luar tinggi. *Zone cooling* telah dikembangkan sebagai metode pendinginan di dalam *greenhouse* untuk kondisi lingkungan panas dan lembab (Suhardiyanto, 1994).

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

² Mahasiswa Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680, mmaftuhfuadi_ae@yahoo.com

³ Alumnus Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, yeniwida@plasa.com

Tanaman tomat tersebut, ~~sebelum~~ ~~suatu~~ ~~di~~ ~~daerah~~ secara ~~tepat~~ ~~perak~~ ~~men~~ ~~gali~~ ~~ngkan~~ udara dingin ~~ke~~ ~~se~~ ~~ntar~~ ~~perak~~ ~~aran~~ atau mengalirkan ~~udara~~ ~~terus~~ ~~yang~~ ~~di~~ ~~dingin~~ ~~kan~~ ke daerah ~~perak~~ ~~aran~~. Meskipun suhu udara di dalam ~~ru~~ ~~ah~~ ~~kaca~~ tinggi, tetapi apabila suhu di ~~da~~ ~~erah~~ perakaran dapat dipertahankan cukup rendah, maka pertumbuhan tanaman akan cukup baik. Matsuoka dan Suhardiyanto (1992) melaporkan bahwa suhu daerah perakaran tanaman tomat yang dipertahankan pada tingkat 21 °C sampai 23 °C ternyata mendukung pertumbuhan tanaman jauh lebih baik dalam sistem *Nutrient Film Technique* (NFT) dibandingkan suhu daerah perakaran yang berada pada tingkat antara 25 °C sampai 27 °C. Suhu daerah perakaran yang lebih rendah beberapa derajat tetapi terus-menerus ternyata sangat membantu pertumbuhan tanaman tomat.

Dalam budidaya tanaman secara hidroponik, pendinginan larutan nutrisi merupakan pilihan yang lebih tepat dibanding pendinginan udara. Panas jenis air lebih tinggi daripada udara sehingga larutan yang didinginkan akan bertahan pada tingkat suhu sesudah didinginkan tersebut lebih lama dibandingkan dengan udara. Larutan nutrisi dapat didinginkan dengan memanfaatkan lingkungan di dalam tanah yang suhunya lebih rendah daripada di atas tanah, yaitu dengan menempatkan tangki larutan nutrisi di dalam tanah. Hal ini diharapkan dapat menurunkan suhu larutan nutrisi sebelum dialirkan ke daerah perakaran dengan murah karena hanya memerlukan energi untuk memompa larutan nutrisi dan bukan energi untuk mendinginkannya. Analisis termal yang menggunakan prinsip pindah panas dan mekanika fluida merupakan dasar perancangan sistem hidroponik dengan pendinginan efek lingkungan dalam tanah. Mengingat sifat fisik larutan nutrisi dapat dianggap sama dengan air maka dilakukanlah percobaan

pendinginan air menggunakan efek lingkungan dalam tanah dengan penempatan tangki di dalam tanah. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis pindah panas pada aliran air melalui pipa vertikal di dalam tanah dan melakukan validasi model pindah panas melalui perbandingan hasil pengukuran dan hasil simulasi.

METODOLOGI

Analisis Pindah Panas

Analisis pindah panas dilakukan terhadap aliran air yang melalui pipa vertikal di dalam tanah pada beberapa kedalaman dengan menggunakan persamaan-persamaan pindah panas. Dalam penelitian ini diambil beberapa asumsi yaitu: sifat fisik larutan nutrisi dianggap sama dengan air, perpindahan panas yang terjadi hanya melalui proses konveksi dan konduksi dengan batas sistem adalah dinding luar pipa, sehingga proses perpindahan panas hanya terjadi antara larutan nutrisi, dinding pipa bagian dalam dan dinding pipa bagian luar, serta terjadi pada satu dimensi dan dalam keadaan tunak atau *steady*.

Jika pada suatu benda terdapat gradien suhu maka terjadi perpindahan panas dari bagian dengan suhu tinggi ke bagian dengan suhu rendah. Selanjutnya, moda perpindahan panas yang terjadi disebut sebagai konduksi sedangkan lajunya didefinisikan sebagai:

$$q_k = -k \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

dimana q_k adalah laju perpindahan panas secara konduksi (Watt), k adalah koefisien konduktivitas termal bahan (W/m.K), A adalah luas permukaan bahan (m²) dan $\partial T / \partial x$ adalah gradien suhu pada penampang A (K/m).

Menurut Kreith (1986), perpindahan panas konveksi menurut cara menggerakkan alirannya diklasifikasikan

Tabel 1. Ikhtisar persamaan-persamaan yang digunakan dalam perpindahan panas konveksi paksa di dalam pipa

Sistem	Persamaan	No. Pers.
Pipa panjang ($L/D > 20$) Aliran laminar ($Re < 2100$)	$Nu = 1.86 (Re Pr Dh/L)^{0.33} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$ Pemanasan cairan $\mu_b/\mu_s = 0.36$ Pendinginan cairan $\mu_b/\mu_s = 0.20$	6
Pipa pendek ($L/D < 20$) Aliran laminar ($Re < 2100$)	$Nu = Re Pr Dh/(4L) \ln(1 - (2.6(Pr)^{0.167} (Re Pr Dh/L)^{0.5}))^{-1}$	7
Pipa panjang ($L/D > 20$) Aliran turbulen ($Re > 2100$)	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$	8
Pipa pendek ($L/D < 20$) Aliran turbulen ($Re > 2100$)	$Nu = 0.023 (1 + (Dh/L)^{0.7} Re^{0.8} Pr^{0.33})$	9

menjadi dua cara, yaitu konveksi bebas atau alami dan konveksi paksa. Pada konveksi bebas pergerakan fluida terjadi karena perbedaan massa jenis yang disebabkan oleh perbedaan suhu, sedangkan pada konveksi paksa fluida bergerak karena adanya pengaruh dari luar dari suatu alat seperti pompa atau kipas. Proses perpindahan panas dibedakan menjadi dua cara, yaitu proses tunak atau *steady* ($\partial T / \partial t = 0$) dan proses tidak tunak atau *unsteady* ($\partial T / \partial t \neq 0$).

Laju perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan:

$$q_c = h \cdot A \cdot (T - T_f) \quad (2)$$

dimana q_c adalah laju perpindahan panas secara konveksi (Watt), h adalah koefisien pindah panas konveksi ($W/m^2.K$), T adalah suhu bahan (K) dan T_f adalah suhu fluida (K).

Untuk kondisi tunak (*steady*), persamaan (1) dan (2) tersebut dapat digabungkan sepanjang aliran panas yang konstan, sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (3)$$

dimana q adalah laju perpindahan panas (Watt), ΔT_m adalah perbedaan suhu

menyeluruh (K) dan U adalah *overall heat transfer coefficient* ($W/m^2.K$).

Nilai *overall heat transfer coefficient* (U) adalah berbanding terbalik dengan tahanan termal (R), sehingga:

$$U = 1/R \quad (4)$$

Menurut Holman (1997) besarnya nilai *overall heat transfer coefficient* untuk pipa bentuk silinder adalah:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h}\right) + \left(\frac{A_o \cdot \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{2\pi \cdot k \cdot L}\right) + \left(\frac{1}{h}\right)} \quad (5)$$

dimana A_o adalah luas penampang bagian luar (m^2), A_i adalah luas penampang bagian dalam (m^2), h adalah koefisien pindah panas konveksi ($W/m^2.K$), R_o adalah jari-jari luar pipa (m) dan R_i adalah jari-jari dalam pipa (m).

Ikhtisar persamaan-persamaan yang digunakan dalam perpindahan panas konveksi paksa di dalam saluran disajikan pada Tabel 1.

Bilangan Reynold digunakan sebagai kriteria untuk menunjukkan jenis aliran turbulen atau laminar. Bilangan Reynold dicari dengan menggunakan persamaan:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (10)$$

dimana Re adalah bilangan Reynold, ρ adalah kerapatan fluida (kg/m^3), V adalah kecepatan aliran fluida (m/s), D_h adalah diameter hidrolis (m) dan μ adalah viskositas dinamik fluida (Pa/s).

Aliran yang mempunyai bilangan Reynold kurang dari 2000 merupakan aliran laminer, sedangkan aliran dengan bilangan Reynold antara 2000 dan 4000 merupakan aliran transisi (peralihan dari aliran laminer ke aliran turbulen), dan aliran dengan bilangan Reynold lebih dari 4000 dikatakan sebagai aliran turbulen penuh (Nevers, 2005).

Hukum Pertama Termodinamika secara sederhana dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{stored} \quad (11)$$

dimana Q_{in} adalah jumlah panas yang masuk ke dalam sistem (Watt), Q_{out} adalah jumlah panas yang keluar dari sistem (Watt) dan Q_{stored} adalah jumlah panas yang tersimpan dalam sistem (Watt). Panas yang disimpan oleh air selama mengalir dalam pipa dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (12)$$

dimana Q adalah jumlah panas yang tersimpan di dalam air (Watt), \dot{m} adalah laju aliran massa (kg/s), C_p adalah panas jenis (J/kg.K), dan ΔT adalah perbedaan suhu antara suhu yang masuk dan keluar pipa. Selanjutnya persamaan (11) dapat dikembangkan menjadi (Holman, 1997):

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = U \cdot A \cdot \left(\frac{(T_d - T_{in}) - (T_d - T_{out})}{\ln \left(\frac{T_d - T_{in}}{T_d - T_{out}} \right)} \right) \quad (13)$$

dimana T_{out} adalah suhu air yang keluar dari pipa vertikal atau berada pada posisi permukaan tanah ($^{\circ}\text{C}$), T_{in} adalah suhu air yang masuk kedalam pipa vertikal pada posisi tangki di dalam tanah ($^{\circ}\text{C}$) dan T_d adalah suhu dinding pipa bagian luar ($^{\circ}\text{C}$). Persamaan (13) tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$T_{out} = T_d - \left(\frac{T_d - T_{in}}{\exp \left(\frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p} \right)} \right) \quad (14)$$

Besarnya koefisien konveksi antara dinding pipa dan air selanjutnya diperoleh dari rumus:

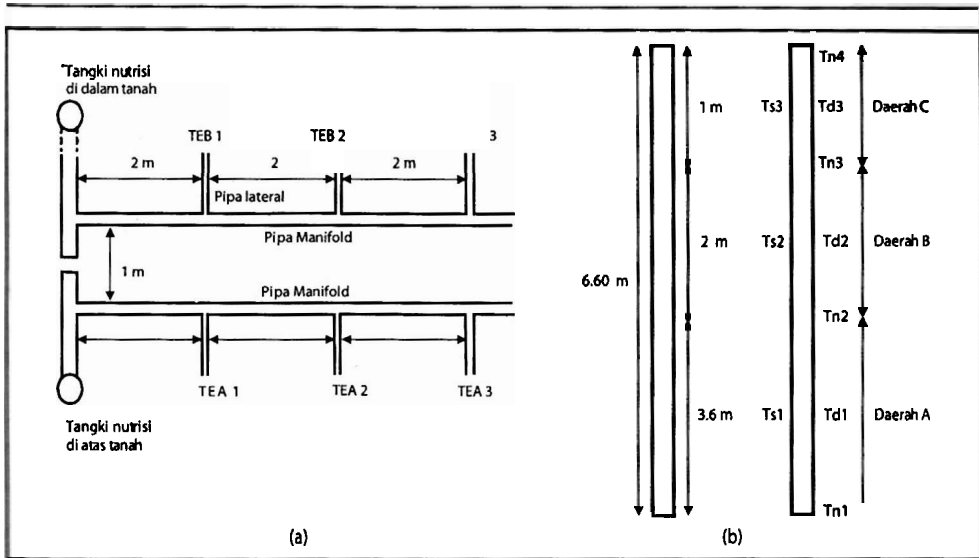
$$h = \frac{k_a \cdot Nu}{D_h} \quad (15)$$

dimana k_a adalah konduktivitas termal air (W/m.K) dan Nu adalah bilangan Nusselt. Nilai Nu diperoleh dengan menggunakan persamaan (6), (7), (8) atau (9) tergantung dari nilai bilangan Reynoldnya. Kemudian dihitung juga perbandingan (L/D) nya apakah lebih besar atau lebih kecil dari 20..

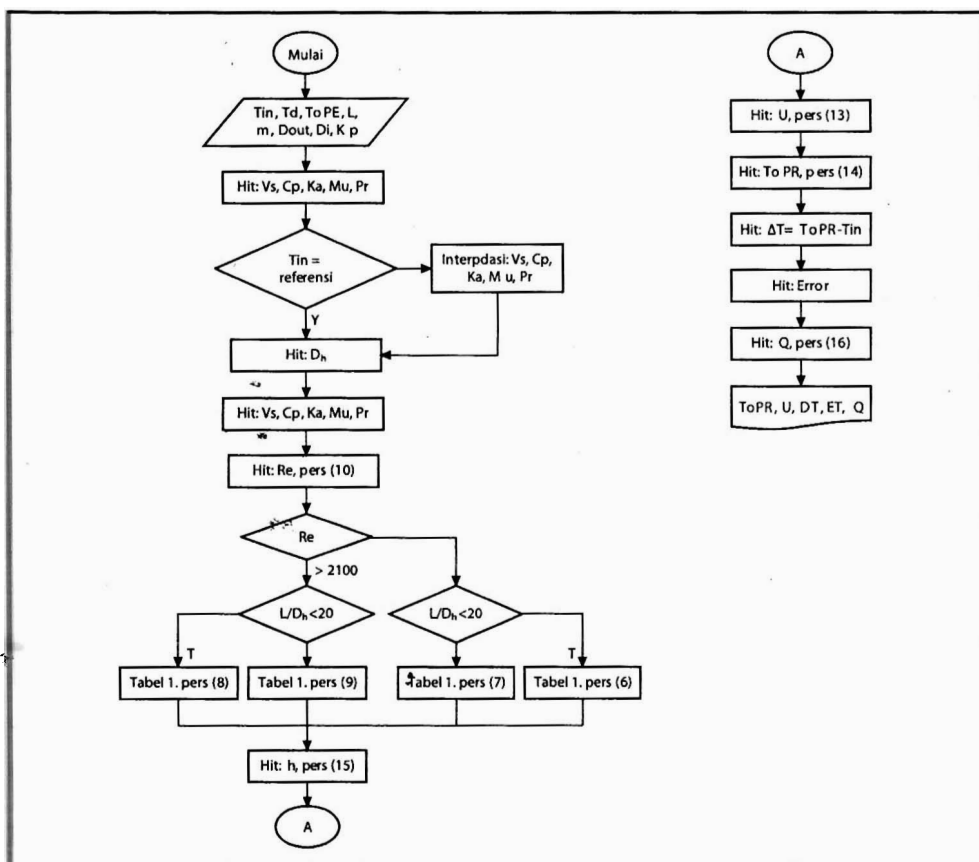
Pengukuran dan Pengolahan Data

Percobaan dalam rangka penelitian ini dilaksanakan di *greenhouse* Laboratorium Lingkungan dan Bangunan Pertanian Leuwikopo, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Skema pengukuran dalam percobaan ini disajikan pada Gambar 1. Pengukuran dilakukan mulai pukul 08:00 sampai 17:00 WIB, mulai bulan April 2007 sampai Mei 2007. Program komputer untuk simulasi suhu air yang keluar dari pipa vertikal di dalam tanah dibuat dengan menggunakan bahasa *Microsoft Visual Basic 6.0*. Diagram alir program komputer untuk memprediksi suhu air tersebut disajikan pada Gambar 2.

Input program adalah suhu air yang masuk dalam pipa, suhu dinding pipa, panjang pipa, laju aliran massa air, diameter luar pipa, diameter dalam pipa



Gambar 1. Skema titik pengukuran dalam penelitian (a) pipa lateral dalam greenhouse dan (b) pipa vertikal di dalam tanah.



Gambar 2. Diagram alir program komputer untuk memprediksi suhu larutan nutrisi.

dan konduktivitas termal pipa. Proses perhitungan dimulai dengan menetapkan parameter fisik dan termal air. Selanjutnya, dilakukan perhitungan bilangan Reynold, bilangan Nusselt, bilangan Prandtl, koefisien konveksi antara dinding pipa dan air, *overall heat transfer coefficient*, dan suhu air yang keluar dari pipa. Validasi dilakukan untuk mengetahui kinerja model pindah panas dalam memprediksi suhu air dengan program komputer yang telah dikembangkan tersebut. Dalam validasi tersebut, suhu air hasil prediksi dibandingkan dengan suhu air hasil pengukuran.

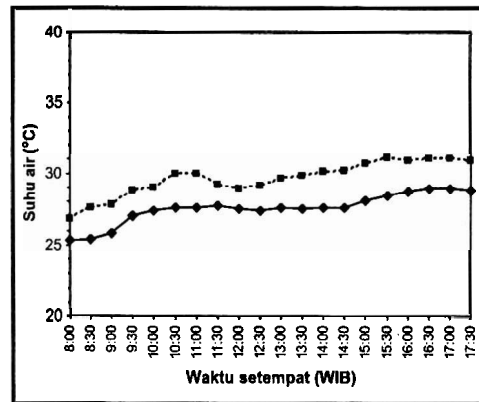
HASIL DAN PEMBAHASAN

Suhu Air yang Keluar dari Emiter

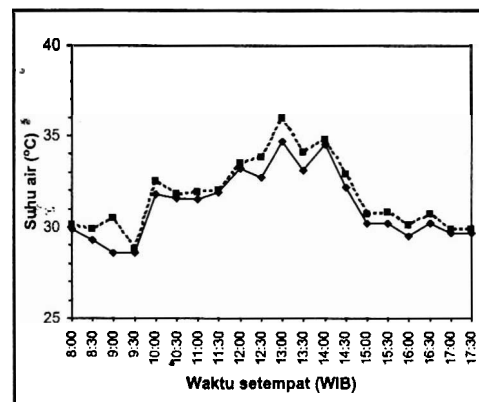
Penempatan tangki air di dalam tanah dan di atas tanah telah menyebabkan suhu air di dalamnya pada hari cerah berbeda antara 1,2 sampai dengan 2,7 °C (Gambar 3). Selanjutnya, air dari tangki yang ditempatkan di dalam tanah dipompa sehingga mengalir melalui pipa vertikal di dalam tanah. Suhu air tersebut mengalami kenaikan selama mengalir melalui pipa vertikal tersebut sebelum masuk ke dalam pipa lateral pada kedua jaringan irigasi tetes di dalam *greenhouse*. Selanjutnya, hal ini mempengaruhi suhu air yang keluar dari emiter pada masing-masing jaringan irigasi tetes. Suhu air yang keluar dari emiter dalam jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di dalam tanah tercatat 0,1 sampai dengan 5,1 °C lebih rendah dibandingkan dengan suhu air yang keluar dari emiter dalam jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di atas tanah. Suhu air yang keluar dari emiter dalam kedua jaringan irigasi tetes tersebut berubah sesuai dengan pola perubahan radiasi matahari dan suhu udara di dalam *greenhouse* sepanjang hari. Grafik perubahan suhu air yang keluar dari

emiter tersebut disajikan dalam Gambar 4.

Perubahan suhu air sepanjang pipa sampai dengan emiter terjadi sebagai akibat proses pindah panas antara air, pipa, dan lingkungannya, baik berupa tanah bagi aliran air dari tangki di dalam tanah maupun udara di dalam rumah tanaman. Perbedaan kenaikan suhu air dari tangki di dalam tanah dan di atas tanah ke emiter disebabkan terutama



Gambar 3. Suhu air di dalam tangki pada penempatan tangki di atas tanah (■) dan di bawah tanah (◆) tanggal 7 Mei 2007.



Gambar 4. Perubahan suhu larutan nutrisi yang keluar dari emiter pada jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di atas tanah (■) dan di bawah tanah (◆) tanggal 7 Mei 2007.

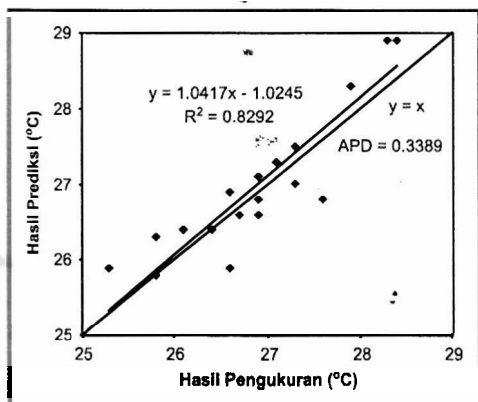
oleh perbedaan laju pindah panas melalui radiasi, konveksi, maupun konduksi pada kedua jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di dalam tanah dan di atas tanah tersebut. Apabila metode pendinginan yang dikembangkan dalam penelitian ini akan diterapkan untuk pendinginan larutan nutrisi pada sistem hidroponik maka kinerja pendinginan akan semakin baik apabila pipa lateral untuk mengalirkan larutan nutrisi dibalut dengan isolator panas. Dengan demikian, panas dari lingkungan sekeliling pipa lateral tersebut terhambat masuk ke dalam pipa sehingga kenaikan suhu larutan nutrisi akan tertahan.

Validasi Model Pindah Panas

Model pindah panas yang dikembangkan untuk memprediksi suhu air yang keluar dari pipa dalam tanah perlu divalidasi. Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan hasil pengukuran pada hubungan linear yang terbentuk. Prediksi suhu air semakin akurat jika nilai gradien dari persamaan regresi linear tersebut mendekati satu sedangkan intersepnya mendekati nol. Koefisien determinasi yang dihasilkan mencerminkan keeratan hubungan hasil prediksi dan hasil pengukuran. Hubungan

antara suhu air hasil prediksi dan hasil pengukuran disajikan pada Gambar 5. Seperti dapat dilihat pada gambar tersebut, gradien garis regresi yang diperoleh adalah 1,0417 atau mendekati satu. Hal ini menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan cukup efektif dalam memprediksi suhu air yang keluar dari pipa dalam tanah. Model tersebut dapat digunakan untuk memprediksi kinerja sistem pendinginan larutan nutrisi dengan penempatan tangki larutan nutrisi di dalam tanah untuk memanfaatkan lingkungan di dalam tanah yang suhunya lebih rendah daripada lingkungan di atas tanah.

Penempatan tangki air di dalam tanah menyebabkan suhu air di dalam tangki tersebut menjadi rendah. Selanjutnya, ketika dialirkan melalui pipa vertikal, terjadi kenaikan suhu air sejalan dengan kenaikan suhu dinding pipa. Pada penelitian ini, suhu dinding pipa cenderung lebih tinggi daripada suhu air di dalam pipa, sehingga terjadi aliran panas dari dinding pipa ke air. Semakin tinggi suhu dinding pipa, maka suhu air di dalam pipa akan semakin tinggi pula. Hal ini karena panas yang dilepaskan oleh dinding pipa ke air semakin besar. Analisis ini menerangkan peristiwa kenaikan suhu air selama mengalir dalam pipa vertikal dari tangki di dalam tanah sampai permukaan tanah. Suhu dinding pipa dipengaruhi oleh kondisi tanah di sekitarnya. Suhu dinding luar pipa cenderung lebih rendah dari pada suhu tanah, akibatnya terjadilah aliran panas dari tanah ke pipa. Radiasi matahari yang diterima oleh permukaan tanah di dalam atau di luar *greenhouse* pada siang hari sebagian disimpan dan sebagian yang lain dipantulkan. Komponen panas yang disimpan pada lapisan atas dari tanah tersebut mempengaruhi suhu tanah. Di dalam tanah, semakin dalam suatu titik, maka semakin kecil pengaruh radiasi matahari yang diterima di permukaan tanah sehingga suhu tanah pada titik



Gambar 5. Grafik hubungan antara suhu larutan nutrisi hasil prediksi dengan hasil pengukuran.

tersebut akan semakin rendah, sampai dengan suatu kedalaman, dimana rezim tanah tersebut suhu tanah cenderung konstan. Oleh karena itu, penempatan tangki larutan nutrisi di dalam tanah perlu mempertimbangkan kedalaman tanah dimana suhu tanah sudah cukup rendah dan cenderung konstan tetapi air tanah belum keluar.

KESIMPULAN

1. Pada hari cerah, penempatan tangki air di dalam tanah menyebabkan suhu air 1,2 sampai dengan 2,7 °C lebih rendah dibandingkan suhu air pada tangki di atas tanah. Selanjutnya, suhu air yang keluar dari emiter pada jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di dalam tanah 0,1 sampai dengan 5,1 °C lebih rendah dibandingkan suhu air yang keluar dari emiter pada jaringan irigasi tetes dengan penempatan tangki di atas tanah.
2. Model pindah panas yang dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi suhu air yang keluar dari pipa vertikal sebelum masuk ke dalam pipa lateral pada jaringan irigasi tetes di dalam *greenhouse*.
3. Metode pendinginan dengan efek lingkungan dalam tanah dapat digunakan untuk *zone cooling* dengan menempatkan tangki larutan nutrisi di dalam tanah pada kedalaman tertentu, dimana suhu tanah sudah cukup rendah dan cenderung konstan tetapi air tanah belum keluar. Metode ini tidak membutuhkan energi untuk mendinginkan larutan nutrisi tetapi hanya membutuhkan energi untuk memompa larutan nutrisi tersebut ke atas tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Holman, J.P. 1997. Perpindahan Kalor. Diterjemahkan oleh E. Jasjfi, Erlangga, Jakarta.
- Kreith, P. 1986. Principles of Heat Transfer (Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas). Diterjemahkan oleh A. Prijono. Erlangga, Jakarta.
- Matsuoka, T. and H. Suhardiyanto. 1992. Thermal and flowing aspects of growing petty tomato in cooled NFT solution during summer. *Environment Control in Biology* 30(3): 119-125.
- Nevers, N.D. 2005. Fluid Mechanics for Chemical Engineers, Third Edition. McGraw Hill Companies, Inc., New York, USA.
- Suhardiyanto, H. 1994. Studies on Zone Cooling Method for Greenhouse Culture. Ph.D. Thesis. Ehime University, Japan.