

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 5, No. 3, Desember 2017



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. Mulai edisi ini redaksi memandang perlu untuk meningkatkan nomor penerbitan dari dua menjadi tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember berisi 12 naskah untuk setiap nomornya. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi masa tunggu dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi online. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam *invited paper* yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, *review* perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, *technical paper* hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta *research methodology* berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (online submission) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Scopus ID: 6602716827, Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya - Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, Institut Pertanian Bogor)
Muhammad Faiz Syuaib (Scopus ID: 55368844900, Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin - Makassar)
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana - Bali)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah (Scopus ID: 55782905900, Institut Pertanian Bogor)
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, Institut Pertanian Bogor)
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Anggota : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, Institut Pertanian Bogor)
Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, Institut Pertanian Bogor)
Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, Institut Pertanian Bogor)
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, Institut Pertanian Bogor)
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, Institut Pertanian Bogor)
Administrasi : Diana Nursolehat (Institut Pertanian Bogor)

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah (me-review) Naskah pada penerbitan Vol. 5 No. 3 Desember 2017. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. I Made Supartha, MS.,PhD (Fakultas Teknologi Pertanian, Udayana), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwantana, M.Agr (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Hj, Nurpilihan Bafdal, MSc (Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Ida Ayu Dwi Giriantari, PhD (Fakultas Teknik, Universitas Udayana), Prof.Dr.Ir. Kamaruddin Abdullah, MSA (Universitas Darma Persada), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Andri Prima Nugroho, STP.,M.Sc (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr. Akhiruddin Maddu, MSi (Departemen Fisika, Institut Pertanian Bogor), Dr. Diding Suhandy, STP.,M.Agr (Fakultas Pertanian, Universitas Lampung), Dr.Ir. Chusnul Arief, STP.,M.Si (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Edward Saleh, MS (Universitas Sriwijaya), Dr.Ir. Abdul Rozaq, DAA (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Gatot Pramuhadi, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Muhammad Faiz Syaib, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Roh Santoso, BW.,MT (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Rokhani Hasbullah, MSi (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Rudiati Evi Masitoh, STP.,M.Dev.Tech, (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Sri Rahayoe, STP.,MP (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada).

Technical Paper

Analisis Pindah Panas pada Pipa Pendingin untuk *Root Zone Cooling System*

Analysis of Heat Transfer in Cooling Pipe for Root Zone Cooling System

Nurbaiti Araswati, Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor. Email: nurbaityaraswati@yahoo.co.id

Herry Suhardiyanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: herrysuhardiyanto@yahoo.com

Mohamad Solahudin, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: mohamadso@ipb.ac.id

Abstract

Root zone cooling system is needed to alleviate high-temperature injury for high-yield greenhouse vegetables production. Analysis of heat transfer along the cooling pipe is very important in designing the root zone cooling system. The objectives of this research were (1) to analyze heat transfer in cooling pipe for zone cooling in a hydroponic system, (2) to validate the heat transfer dynamics model to predict the water temperature at the outlet of the cooling pipe, and (3) to perform model simulations for various types of pipe materials and lengths in several thermal conditions in the greenhouse. Root zone cooling system was performed by flowing water (10°C) through a steel pipe along 25 m to the root zone. The analysis showed a decrease up to 2.8°C in the planting medium temperature 28.6°C from control 31.4°C. The validation of heat transfer model was conducted by comparing the predicted water temperature to that of measured on linear regression plot. The result showed a straight line $Y=1.0026X$ and the coefficient of determination (R^2) 0.9867. Based on data analysis, the temperature of water reaches 1°C in steel and copper cooling pipes along 40 m and significantly different from the PVC that is 0.8°C.

Keywords: hydroponics, heat transfer analysis, root zone cooling system

Abstrak

*Root zone cooling system diperlukan dalam mengurangi kerusakan akibat tingginya suhu agar hasil produksi sayuran rumah tanaman meningkat. Analisis pindah panas di sepanjang pipa pendingin sangat penting dalam perancangan *root zone cooling system*. Tujuan penelitian ini adalah (1) melakukan analisis pindah panas pada pipa pendingin untuk *zone cooling* dalam sistem hidroponik, (2) melakukan validasi model dinamik pindah panas untuk memprediksi suhu air pada bagian *outlet* pipa pendingin, dan (3) melakukan simulasi model untuk berbagai bahan dan panjang pipa pada beberapa kondisi termal rumah tanaman. *Root zone cooling system* dilakukan dengan mengalirkan air (10°C) melalui pipa *steel* sepanjang 25 m ke perakaran tanaman. Hasil analisis menunjukkan adanya penurunan suhu media tanam hingga 2.8°C yaitu 28.6°C dari suhu kontrol 31.4°C. Validasi model pindah panas dilakukan dengan membandingkan angka suhu air hasil prediksi dengan hasil pengukuran dalam grafik regresi linear. Hasil validasi model pindah panas didapatkan garis lurus $Y=1.0026X$ dan koefisien determinasi (R^2) 0.9867. Berdasarkan analisis data, kenaikan suhu air mencapai 1°C pada pipa pendingin *steel* maupun tembaga sepanjang 40 m dan berbeda nyata dengan PVC yaitu 0.8°C.*

Kata Kunci: hidroponik, analisis pindah panas, sistem pendinginan daerah perakaran

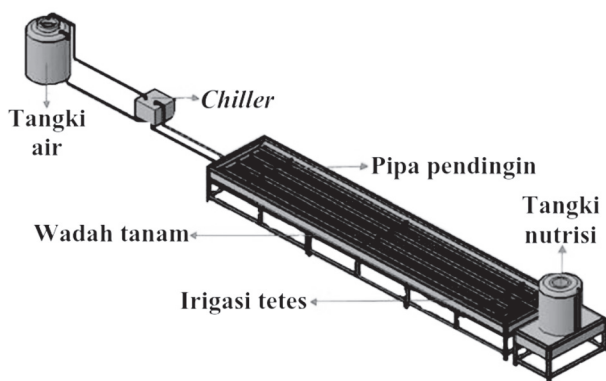
Diterima : 18 Oktober 2016; Disetujui: 30 November 2017

Latar Belakang

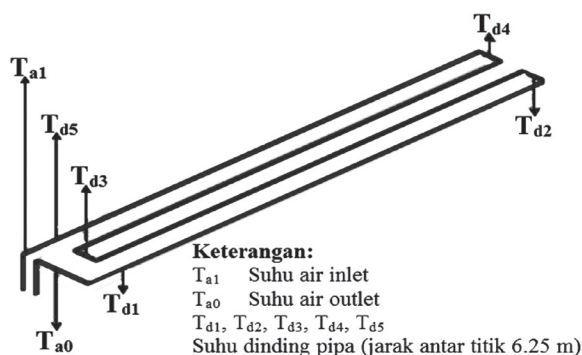
Kondisi lingkungan merupakan aspek yang sangat penting dalam budidaya tanaman. Lingkungan harus dijaga agar berada atau mendekati kondisi optimum bagi tanaman yang dibudidayakan. Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, termasuk cahaya dan

suhu (Porter dan Gawith 1997). Suhu udara adalah salah satu unsur lingkungan yang paling penting bagi tanaman (Ramakrishna dan Ravishankar 2011). Suhu udara mempengaruhi besarnya suhu tanah (Kinoshita *et al.* 2012). Suhu tanah dapat memodulasi pertumbuhan serta kualitas sayuran. Suhu pada zona perakaran (*root zone*) selain mempengaruhi pertumbuhan juga komposisi kimia

dari banyak tanaman (Adebooye et al. 2010; Malik et al. 2013; Yan et al. 2013; Sakamoto dan Suzuki 2015a, 2015b). Tingginya suhu serta kelembapan udara di dalam rumah tanaman menjadi kendala budidaya tanaman pada daerah tropis. Berbagai teknologi pendinginan telah dikembangkan untuk memungkinkan produksi tanaman sepanjang tahun. Penggunaan *evaporative cooling* tidak efektif ketika kelembapan udara tinggi (Real, Baille 2006), karena akan mengakibatkan peningkatan serangan penyakit (Max et al. 2009), dan pertumbuhan jamur (Suhardiyanto 2009). Oleh karena itu dapat ditempuh cara lain yaitu *root zone cooling system*. *Root zone cooling* mampu meningkatkan hasil mentimun (Ibarra-Jimenez et al. 2008), meningkatkan aktifitas fisiologi dan perkembangan morfologi tanaman tomat (Kawasaki et al. 2013), serta memodulasi produksi gula dan polifenol pada wortel juga selada merah (Sakamoto dan Suzuki 2015a, 2015b). Analisis pindah panas terhadap air di dalam pipa pendingin *root zone cooling system*, perlu dilakukan sebagai dasar perencanaan pendinginan sehingga diperoleh suhu yang ideal bagi tanaman. Tujuan penelitian ini yaitu melakukan analisis pindah panas pada pipa pendingin untuk *root zone cooling* dalam sistem hidroponik, memvalidasi model dinamik untuk prediksi suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin serta melakukan simulasi model untuk berbagai jenis bahan, dan panjang pipa pendingin.



Gambar 1. Skema set up hidroponik dengan *root zone cooling system*.



Bahan dan Metode

Penelitian dilaksanakan pada bulan Agustus-November 2014 di rumah tanaman Laboratorium Lapangan Siswadi Soepardjo IPB yang terletak pada $6^{\circ}33'50.82''$ LS dan $106^{\circ}43'37.91''$, dengan elevasi ± 182.3 m di atas permukaan laut. Alat dan bahan yang digunakan: media tanam, wadah media tanam, air, pipa pendingin, tangki, pompa air listrik, *chiller*, *thermocouple*, *hybrid recorder*, *software Powersim studio 10*, *AutoCAD*, *microsoft excel* dan *microsoft word*.

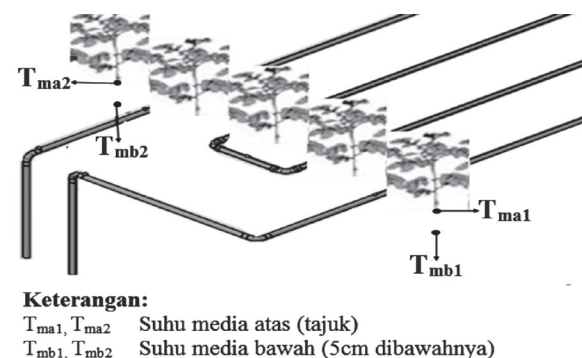
Root Zone Cooling System

Cara kerja *root zone cooling system*: air dari dalam tangki dipompa menuju *chiller* untuk didinginkan. Air yang telah mencapai suhu *setting* mengalir melalui pipa pendingin ke perakarn tanaman. Air pendingin tersebut akan mengalami kenaikan suhu dikarenakan perpindahan panas. Skema set up hidroponik dengan *root zone cooling system* disajikan pada Gambar 1.

Pengukuran suhu dilakukan terhadap air di dalam pipa pendingin (*set point* 10°C), dinding pipa pendingin, larutan nutrisi dalam media tanam, dinding wadah media tanam (*acrylic*) dan udara lingkungan. Pipa pendingin yang digunakan adalah pipa *steel* berukuran $\frac{3}{4}$ inch dengan panjang 25 meter. Pengukuran suhu air dalam pipa pendingin dilakukan pada posisi *inlet* dan *outlet*. Suhu larutan nutrisi didalam media tanam diukur pada titik ujung pangkal tajuk dan 5 cm di bawahnya (Gambar 2). Suhu dinding *acrylic* dan suhu udara lingkungan diukur pada tiap-tiap sisi (bagian kanan, kiri, depan, belakang dan bawah). Iklim mikro rumah tanaman diukur menggunakan *weather station* (meliputi suhu udara pada siang hari dan malam hari, kelembapan udara, dan radiasi matahari). Pengukuran dilakukan pada 17 September 2014 pukul 7.00-17.00 WIB dimana merupakan hari tercerah pada bulannya.

Analisis Pindah Panas

Analisis pindah panas dilakukan menggunakan persamaan-persamaan pindah panas. Beberapa asumsi yang digunakan yaitu: perpindahan panas hanya terjadi melalui proses konveksi dan konduksi dengan batas sistem adalah dinding *acrylic*; media



Gambar 2. Skema titik pengukuran.

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

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 $\mu b/\mu s = 0.20$	3
Pipa pendek (L/D < 20) Aliran laminar (Re < 2100)	$Nu = Re Pr Dh / (4L) \ln (1 - (2.6 / (Pr^{0.167} (Re Pr Dh/L)^{0.5})))^{-1}$	4
Pipa panjang (L/D > 20) Aliran turbulen (Re > 2100)	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$	5
Pipa pendek (L/D < 20) Aliran turbulen (Re > 2100)	$Nu = 0.023 (1 + (Dh/L)^{0.7} Re^{0.8} Pr^{0.33})$	6

Sumber: Suhardiyanto, Fuad dan Widiningrum 2007

tanam dalam kondisi basah merata oleh larutan nutrisi sehingga suhu media tanam diasumsikan sama dengan suhu larutan nutrisi didalamnya; perpindahan panas yang terjadi meliputi konveksi antara air dengan dinding pipa pendingin bagian dalam, konduksi pada dinding pipa pendingin, konveksi antara dinding pipa pendingin bagian luar dan larutan nutrisi dalam media tanam, konveksi antara larutan nutrisi dalam media tanam dengan dinding *acrylic* bagian dalam, konduksi pada dinding *acrylic* dan konveksi antara dinding *acrylic* bagian luar dengan udara lingkungan; serta pindah panas hanya terjadi pada satu dimensi dan dalam keadaan *steady*. Nilai konduktivitas diambil dari literatur, untuk pipa *steel* (C *steel*-1.5%, *table A-2 property values of metals*) 36 W/m.°C, paranet (*polyethylene, table A-3 properties of nonmetals*) 0.33 W/m.°C, *acrylic (glass fiber duct liner, table A-3 properties of nonmetals)* 0.038 W/m.°C, pipa tembaga (*aluminum bronze 95% cu, 5% al1.5%, table A-2 property values of metals*) 83 W/m.°C, dan pipa *polyvinylchloride (PVC) (table A-3 properties of nonmeteals)* 0.09 W/m.°C (Holman 2010).

Skema perpindahan panas dalam wadah tanam hidroponik disajikan pada Gambar 3. Suhu dinding luar pipa pendingin cenderung lebih rendah daripada suhu media tanam, akibatnya terjadilah aliran panas dari media tanam ke pipa pendingin. Pipa pendingin bersuhu lebih tinggi dari air di dalamnya, sehingga terjadi aliran panas dari dinding pipa pendingin ke air. Analisis ini menerangkan peristiwa kenaikan suhu air selama mengalir dalam pipa pendingin. Ketika suatu objek memiliki suhu yang berbeda

dari lingkungan sekitarnya, panas akan mengalir sehingga keduanya memiliki suhu yang sama pada satu titik kesetimbangan panas. Perpindahan panas terjadi secara spontan dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah.

Aliran fluida dengan nilai Reynold kurang dari 2000 merupakan aliran laminar, nilai Reynold antara 2000 dan 4000 merupakan aliran transisi, dan nilai Reynold lebih dari 4000 dikatakan sebagai aliran turbulen penuh (Nevers 2005). Bilangan Reynold digunakan sebagai kriteria untuk menentukan jenis aliran fluida. Persamaan bilangan Reynold (Re):

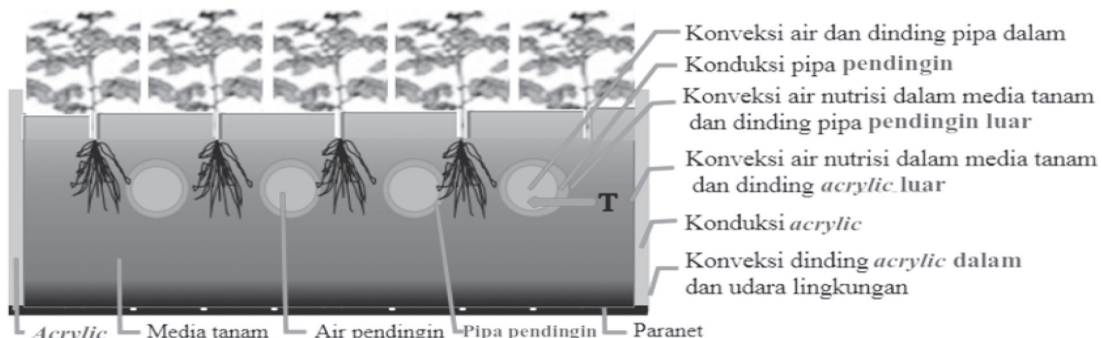
$$Re = \frac{\rho v Dh}{\mu} \tag{1}$$

Untuk aliran dalam saluran yang panjang, penting dalam bilangan Nusselt (Nu) adalah garis tengah hidroliknya (Dh) (Kreith 1986), yang berdefinisi:

$$Dh = 4 \left(\frac{A_1}{K_i} \right) \tag{2}$$

Nilai Nu diperoleh menggunakan persamaan (3), (4), (5) atau (6) tergantung dari nilai Reynoldnya. Kemudian dihitung juga perbandingan (L/D) nya apakah lebih besar atau lebih kecil dari 20. Ikhtisar persamaan-persamaan yang digunakan dalam perpindahan panas konveksi paksa di dalam pipa disajikan pada Tabel 1.

Mengikuti sebagian besar pola rumus empiris dalam penelitian sebelumnya oleh Bot (1983), Garzoli dan Blackwell (1981), Kittas (1986), dan Papadakis *et al.* (1992), koefisien konveksi pada pipa pendingin dan air didalamnya (h_a):



Gambar 3. Skema perpindahan panas dalam wadah tanam hidroponik\]

Tabel 2. Hubungan empiris rerata nilai Nusselt konveksi alami pada berbagai permukaan.

Geometri	Panjang karakteristik (Lc)	Rentang nilai Ra	Nu
Plat vertikal	Tinggi	10 ⁴ -10 ⁹	Nu = 0.59 Ra _L ^{1/4}
		10 ⁹ -10 ¹²	Nu = 0.1 Ra _L ^{1/3}
		semua	$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{1/4}} \right]^2$
Plat datar a) permukaan atas suhunya lebih tinggi	Luas/keliling	10 ⁴ -10 ⁷	Nu = 0.54 Ra _L ^{1/4}
		10 ⁷ -10 ¹¹	Nu = 0.15 Ra _L ^{1/3}
		b) permukaan atas suhunya lebih rendah	10 ⁵ -10 ¹¹
Silinder horizontal	Diameter	Ra < 10 ¹³	$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{1/4}} \right]^2$

Sumber: Cengel dan Turner 2001

$$h_p = a + bh^c \tag{7}$$

Dengan metode minimisasi untuk fungsi non-linear dari banyak variabel, seperti Persamaan (7), koefisien a, b, dan c dapat ditentukan. *Microsoft Excel Solver* dapat digunakan untuk menentukan koefisien, menggunakan *Generalized Reduced Gradient* (GRG2) optimasi nonlinier. Batasan yang digunakan yaitu jenis konveksi dan tipe aliran dari percobaan. Nilai pindah panas konveksi dapat dihitung menggunakan persamaan (8):

$$h = \frac{k}{Dh} Nu' \text{ untuk konveksi pada pipa pendingin;} \tag{8}$$

$$h = \frac{k}{Lc} Nu \text{ untuk konveksi pada wadah tanam hidroponik;} \tag{8}$$

Hubungan empiris untuk rerata nilai Nusselt konveksi alami pada berbagai geometri permukaan disajikan oleh Tabel 2. Rayleigh merupakan produk dari Grashof-Prandtl (9).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) Lc^3}{\nu^2} Pr \text{ dimana } \beta = \frac{1}{T} \tag{9}$$

Overall heat transfer coefficient (U) berbanding terbalik dengan tahanan panas (R), sehingga:

$$U = \frac{1}{R} \tag{10}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_a} \right) + \left(\frac{A_o \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right)}{2 \pi k_p L_p} \right) + \left(\frac{1}{h_{mt}} \right)} \text{ untuk pipa pendingin;} \tag{11}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_u} \right) + \left(\frac{1}{h_{mt}} \right)} \text{ untuk sisi atas wadah tanam} \tag{12}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_u} \right) + \left(\frac{\Delta x_{pr}}{k_{pr}} \right) + \left(\frac{1}{h_{mt}} \right)} \text{ untuk sisi bawah wadah tanam} \tag{13}$$

$$U = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{h_u} \right) + \left(\frac{\Delta x_{acr}}{k_{acr}} \right) + \left(\frac{1}{h_{mt}} \right)} \right) \text{ untuk sisi depan, belakang, kanan, dan kiri wadah tanam} \tag{14}$$

Panas yang disimpan oleh air selama mengalir di dalam pipa pendingin:

$$Q = m.Cp.\Delta T \tag{15}$$

Laju perpindahan panas per satuan luas:

$$\frac{q}{A} = U.\Delta T \tag{16}$$

Sehingga,

$$m.Cp.(T_o - T_i) = U.A. \left(\frac{(T_d - T_i) - (T_d - T_o)}{\ln \left(\frac{T_d - T_i}{T_d - T_o} \right)} \right) \tag{17}$$

Persamaan (17) tersebut dapat disederhanakan untuk memprediksi suhu air pada posisi outlet pipa pendingin menjadi (Suhardiyanto, et al. 2007):

$$T_o = T_d - \left(\frac{(T_d - T_i)}{\exp \left(\frac{U.A}{m.Cp} \right)} \right) \tag{18}$$

Model dinamik dan simulasi prediksi suhu air pada posisi outlet pipa pendingin dibuat menggunakan *software powersim studio 10* dan *microsoft excel. Flow diagram* model dinamik tersebut disajikan pada Gambar 4. Proses perhitungan dimulai dengan menetapkan parameter fisik dan termal air (Tabel 3). Input program adalah suhu air pada posisi inlet pipa pendingin, suhu

Tabel 3. Karakteristik fisik dan termal air.

k	$(-1 \times 10^{-5}) \times (\text{Suhu Air dalam Pipa}^2) + (0.0022 \times \text{Suhu Air dalam Pipa}) + 0.5631$
ρ	$(-0.0025 \times (\text{Suhu Air Nutrisi}^2)) - (0.113 \times \text{Suhu Air Nutrisi}) + 1000.9$
Cp	$(0.215 \times (\text{Suhu Air Nutrisi}^2) - (1.6794 \times \text{Suhu Air Nutrisi}) + 4206.7$
μ	$((3 \times 10^{-7}) \times (\text{Suhu Air dalam Pipa}^2)) - (4 \times 10^{-5}) \times \text{Suhu Air dalam Pipa} + 0.0016$
v	Densitas/Viskositas dinamik
Pr	$(0.0027 \times (\text{Suhu Air Nutrisi}^2)) - (0.2981 \times \text{Suhu Air Nutrisi}) + 11.877$

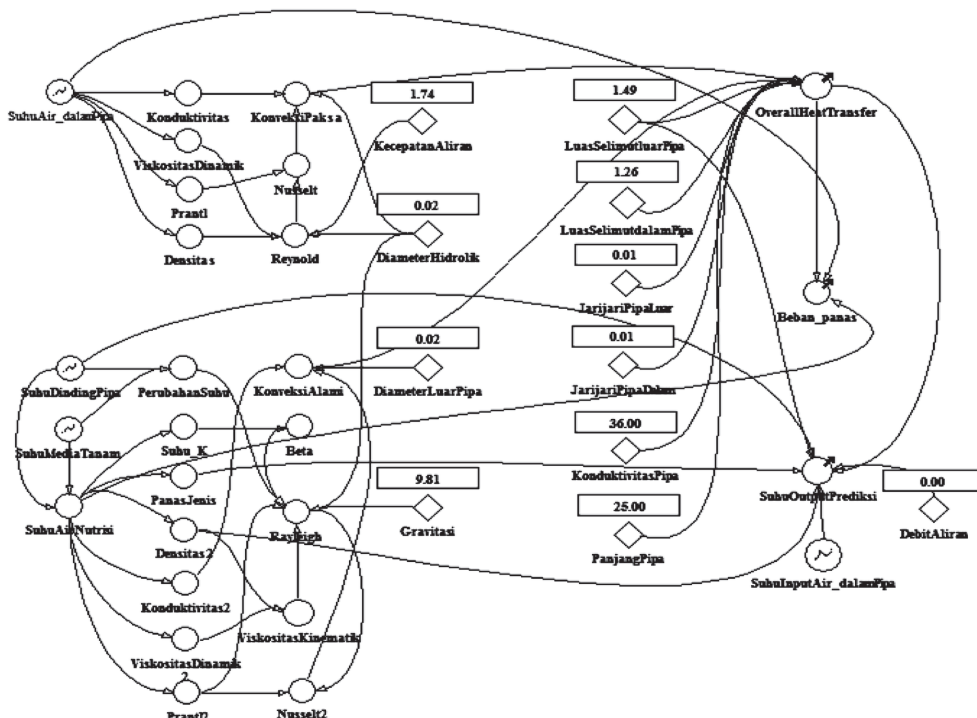
dinding pipa pendingin, suhu larutan nutrisi dalam media tanam, suhu dinding *acrylic*, suhu udara lingkungan, panjang pipa pendingin, laju aliran massa air pendingin, diameter luar pipa pendingin, diameter dalam pipa pendingin, luas masing-masing sisi wadah media tanam, konduktivitas pipa pendingin, paraset, *acrylic*, *polyvinylchloride (PVC)*, dan tembaga (Tabel 4). Selanjutnya dilakukan perhitungan bilangan Reynold/Rayleigh, Nusselt, Prandtl, koefisien konveksi dan konduksi yang terjadi didalamnya, *overall heat transfer coefficient*, flux panas dan suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin. Validasi dilakukan menggunakan parameter koefisien determinasi (R^2) dengan set intersep = 0, untuk mengetahui kinerja model pindah panas dalam memprediksi suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin.

Kenaikan suhu media tanam tersebut dipengaruhi oleh lingkungan di sekitar tanaman antara lain yaitu suhu udara di dalam rumah tanaman yang juga meningkat. Sesuai dengan hukum termodinamika dimana ketika suatu objek memiliki suhu yang berbeda dari lingkungan sekitarnya, panas akan mengalir sehingga keduanya memiliki suhu yang sama pada satu titik kesetimbangan panas. Perpindahan panas terjadi secara spontan dari daerah bersuhu tinggi (udara lingkungan) ke daerah bersuhu rendah (media tanam). Suhu media tanam berhubungan erat dengan proses penyerapan unsur hara, air, dan respirasi. Bila suhu media tanam tinggi dan kelembaban rendah, evapotranspirasi tanaman akan cepat berlangsung. Kondisi ini akan mempengaruhi daya hisap air dan hara dari media ke tanaman.

Hasil dan Pembahasan

Suhu lingkungan, dan suhu media tanam hidroponik baik kontrol maupun dengan *root zone cooling system* disajikan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 terlihat adanya kenaikan suhu media tanam selama rentang waktu pengukuran.

Suhu media tanam dengan pengaplikasian *root zone cooling system* menunjukkan nilai rata-rata 28.6°C. Penerapan *root zone cooling system* pada budidaya hidroponik mengakibatkan penurunan suhu media tanam hingga 2.8°C dibandingkan dengan kontrol (31.4°C). Akan tetapi, penurunan tersebut belum mampu mencapai suhu optimum tanaman hortikultura musim panas yaitu 16-24°C dan musim dingin sebesar 8-16°C (Sunu dan



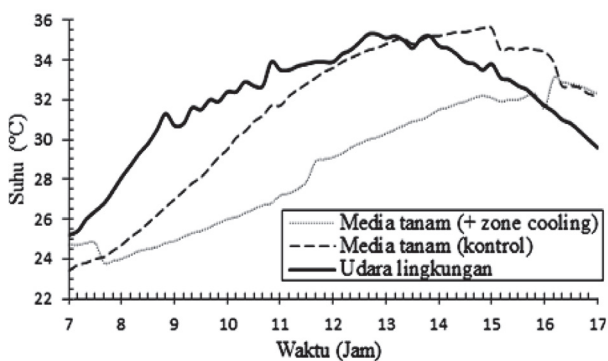
Gambar 4. Flow diagram model dinamik analisis pindah panas untuk memprediksi suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin.

Wartoyo 2006). Hal tersebut mengindikasikan bahwa pendinginan yang dilakukan masih jauh dari kondisi optimal pertumbuhan tanaman hortikultura yang diharapkan. Semakin besar panas yang dapat dipindahkan dari media tanam ke air di dalam pipa pendingin mengindikasikan semakin optimal pendinginan yang dilakukan.

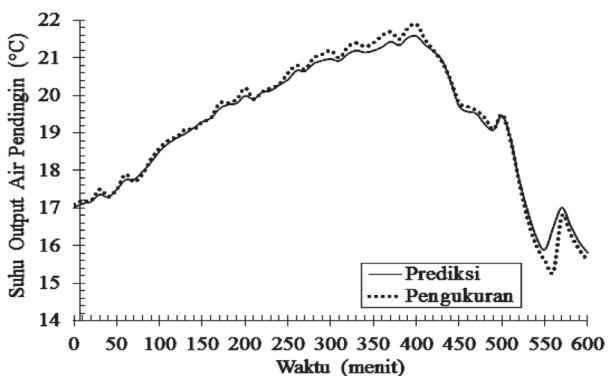
Suhu air pada posisi *inlet* pipa pendingin saat pengukuran tercatat 0.068-0.143°C lebih rendah dibandingkan dengan *outlet*. Penyerapan panas oleh air pendingin masih sangat rendah. Oleh karena itu, perlu pengkajian lebih dalam mengenai hal-hal yang dapat meningkatkan efektifitas pendinginan. *Root zone cooling system* berinteraksi dengan kondisi lingkungan termal di sekitarnya. Komponen-komponen yang penting dari interaksi tersebut dapat digambarkan secara sederhana dalam sebuah model sehingga hubungan sebab akibat komponen penyusun tersebut dapat dijelaskan dengan baik. Analisis pindah panas terhadap air yang mengalir di dalam pipa pendingin perlu dilakukan sebagai dasar perencanaan pendinginan terbatas daerah perakaran sehingga diperoleh suhu yang ideal bagi perakaran tanaman.

Validasi Model Pindah Panas

Flow diagram model dinamik analisis pindah panas sebagaimana disajikan pada Gambar 5 digunakan untuk memprediksi suhu air pada posisi *outlet* dalam pipa pendingin. Grafik suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin hasil pengukuran dan



Gambar 5. Suhu lingkungan, suhu media tanam dengan *root zone cooling system* dan control.



Gambar 6. Suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin hasil pengukuran dan prediksi.

Tabel 4. Besaran dimensi yang digunakan dalam analisis pindah panas.

Dimensi	Satuan	Besaran
R_i	m	0.008
R_o	m	0.010
D_i	m	0.016
D_o	m	0.019
K_i	m	0.05024
K_o	m	0.05966
A_1	m ²	0.0002
A_0	m ²	0.00028
A_i	m ²	1.256
A_o	m ²	1.492
L	m	25
Dh	m	0.016
Q	m ³ /s	0.00035
v	m/s	1.737
k_p	W/m.°C	36
<i>C steel 1.5%, table A-2 property values of metals (Holman 2010)</i>		
ΔX_{pr}	m	0.003
k_{pr}	W/m.°C	0.330
<i>polyethylene, table A-3 properties of nonmetals (Holman 2010)</i>		
ΔX_{acr}	m	0.005
k_{acr}	W/m.°C	0.038
<i>glass.fiber duct liner, table A-3 properties of nonmetals (Holman 2010)</i>		
L_{acr}	m	0.250
A_{ab}	m ²	7.813
K_{ab}	m	15
A_{db}	m ²	0.313
A_{kk}	m	1.563
Konstanta	a	1.249
hasil optimasi	b	1.444
menggunakan <i>solver</i>	c	1.471

prediksi disajikan dalam Gambar 6. Validasi model dilakukan untuk menguji apakah perilaku umum dari model mampu mencerminkan perilaku sistem yang dimodelkan. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan suhu air pendingin hasil pengukuran dalam plot grafik regresi linear. Grafik hubungan antara suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin hasil prediksi dengan hasil pengukuran pada pukul 7.00-17.00 WIB disajikan pada Gambar 7. Seperti dapat dilihat pada gambar tersebut, didapatkan garis lurus $Y=1.0026X$ yang memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.9867. Hal ini menunjukkan bahwa model pindah panas yang dikembangkan cukup efektif dalam memprediksi suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin dari daerah perakaran tanaman.

Perencanaan Pipa Pendingin untuk *Root Zone Cooling System*

Model pindah panas yang telah berhasil dikembangkan kemudian digunakan untuk perencanaan pipa pendingin untuk menentukan

Tabel 5. Kenaikan suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin pukul 13:00 WIB dengan tiga jenis bahan serta sepuluh panjang pipa pendingin.

Panjang pipa (m)	Kenaikan suhu air pendingin pada posisi outlet pipa pendingin hasil simulasi (oC)		
	PVC	Steel	Tembaga
10	0.660a	0.719b	0.719b
20	0.720a	0.835b	0.835b
30	0.778a	0.949b	0.949b
40	0.837a	1.060b	1.060b
50	0.894a	1.168b	1.169b
60	0.951a	1.275b	1.276b
70	1.007a	1.379b	1.379b
80	1.063a	1.480b	1.481b
90	1.118a	1.580b	1.581b
100	1.172a	1.677b	1.678b

Keterangan: angka-angka yang diikuti dengan huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata pada taraf $\alpha = 5\%$ UJGD

bahan serta panjang pipa pendingin. Tabel 5 menunjukkan angka-angka kenaikan dari suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin hasil simulasi terhadap variasi bahan serta panjang pipa pendingin. Semakin besar nilai perbedaan suhu, semakin besar perpindahan panas yang terjadi sepanjang aliran pipa pendingin. Panas dari lingkungan perakaran tanaman dalam sistem hidroponik berpindah ke pipa pendingin yang kemudian menyebabkan kenaikan suhu air pendingin pada posisi *outlet*. Perpindahan panas yang terjadi semakin besar dengan semakin panjangnya pipa pendingin yang dipasang. Hal tersebut dikarenakan luasan kontak perpindahan panas yang semakin besar antara pipa pendingin (luas selimut pipa pendingin) dengan lingkungan perakaran tanaman. Kemampuan dari suatu bahan untuk menghantarkan panas disebut juga sebagai nilai konduktivitas begitu sebaliknya.

Berdasarkan analisis data (Tabel 5) menggunakan sidik ragam dan dilanjutkan dengan uji jarak ganda Duncan (UJGD) pada $\alpha=5\%$ menunjukkan hasil yang berbeda nyata pada penggunaan bahan PVC dibandingkan dengan *steel* dan tembaga. Dari data diatas terlihat kenaikan suhu tertinggi terjadi pada bahan *steel* dan tembaga. Nilai kenaikan suhu yang terjadi antara kedua bahan tersebut tidak berbeda nyata. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kenaikan suhu air pipa pendingin sepanjang 40 m berbahan *steel* dan tembaga mencapai 1°C sedangkan PVC sebesar 0.8°C . Penggunaan pipa PVC sudah cukup baik untuk hidroponik dengan pengaplikasian *root zone cooling system*. Untuk mengoptimalkan penurunan suhu pada daerah perakaran, maka pipa PVC yang digunakan perlu dua kali lebih panjang (jarak antar pipa lebih kecil) dibandingkan dengan pipa berbahan *steel* dan tembaga sehingga

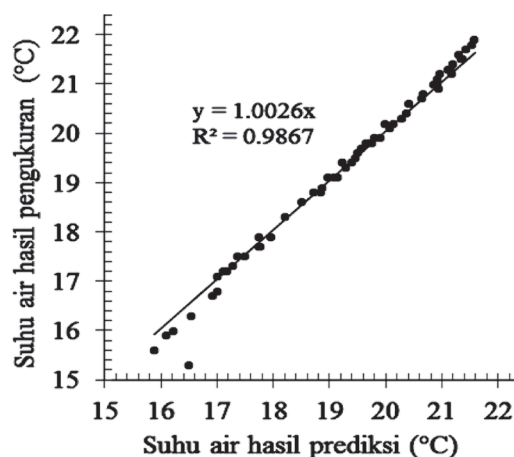
luasan kontak perpindahan panas yang terjadi lebih besar. Penempatan pipa pendingin tepat pada perakaran tanaman juga akan mengoptimalkan perpindahan panas yang terjadi dari media tanam ke pipa pendingin.

Simpulan

Suhu media tanam dengan pengaplikasian *root zone cooling system* mengalami penurunan hingga 2.8°C yaitu 28.6°C dari suhu kontrol 31.4°C . Validasi model pindah panas dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan suhu air pendingin hasil pengukuran dalam plot grafik regresi linear sehingga didapatkan garis lurus $Y=1.0026X$ yang memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.9867. Model pindah panas yang telah berhasil dikembangkan kemudian digunakan untuk perencanaan pipa pendingin. Berdasarkan analisis data sidik ragam dan uji jarak ganda Duncan (UJGD) pada $\alpha=5\%$ menunjukkan hasil yang berbeda nyata. Kenaikan suhu air pipa pendingin sepanjang 40 m berbahan *steel* dan tembaga mencapai 1°C sedangkan PVC sebesar 0.8°C . Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan pipa PVC sudah cukup baik untuk hidroponik dengan pengaplikasian *root zone cooling system*.

Daftar Pustaka

- Adebooye OC, Schmitz-Eiberger M, Lankes C, Noga GJ. 2010. Inhibitory Effects of Sub-optimal Root Zone Temperature on Leaf Bioactive Components, Photosystem II (PS II) and Minerals Uptake in *Trichosanthes cucumerina* L. Cucurbitaceae. *Journal of Acta Physiologiae Plantarum*. 32(6):67-73.
- Bot GPA. 1983. Greenhouse Climate: from Physical Processes to a Dynamic Model. Thesis. The Netherland: Agricultural University of Wageningen.



Gambar 7. Grafik hubungan antara suhu air pada posisi *outlet* pipa pendingin hasil prediksi dengan hasil pengukuran pada pukul 7.00-17.00 WIB.

- Garzoli KV, Blackwell I. 1981. An Analysis of the Nocturnal Heat Loss from a Single Skin Plastic Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 26(2):204-214.
- Holman JP. 2010. *Heat Transfer*. Ed ke-10. New York (US): McGraw-Hill.
- Ibarra-Jimenez L, Gonzalez Z, Rio A, Rubalcava JC, Ortiz BOH. 2008. Changes in Soil Temperature, Yield and Photosynthetic Response of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) under Coloured Plastic Mulch. *Journal of agrochimica*. 52(4):263-272.
- Kawasaki Y, Matsuo S, Katsumi S, Kanayama Y, Kanahama K. 2013. Root-Zone Cooling at High Air Temperature Enhances Physiological Activities and Internal Structures of Roots in Young Tomato Plants. *Journal of The Japanese Society for Horticultural Science*. 82(4):322-327.
- Kinoshita T, Nakano Y, Kawashima H. 2012. Effect of Duration of Root-Zone Cooling in Potted Tomato Seedling on Plant Growth and Fruit Yield during High-Temperature Periods. *Journal of Horticultural Research*. 11(4):459-465.
- Kittas C. 1986. Greenhouse Cover Conductances. *Journal of Boundary-Layer Meteorology*. 36(3):213-225.
- Kreith P. 1986. *Principles of Heat Transfer (Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas)*. A. Prijono, Penerjemah. Jakarta (ID): Erlangga.
- Malik S, Andrade SAL, Sawaya ACHF, Bottcher A, Mazzafera P. 2013. Root-Zone Temperature Alters Alkaloid Synthesis and Accumulation in *Catharanthus roseus* and *Nicotiana tabacum*. *Journal of Industrial Crops and Products*. 49(1):318-325.
- Max JFJ, Horst WJ, Mutwiwa UN, Tantau HJ. 2009. Effects of Greenhouse Cooling Method on Growth, Fruit Yield and Quality of Tomato (*Solanum lycopersicum* L) in a Tropical Climate. *Journal of Scientia Horticulturae*. 122(2):179-186.
- Nevers ND. 2005. *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*. Ed ke-3. New York (US): McGraw-Hill Companies, Inc
- Papadakis G, Frangoudakis A, Kyritsis S. 1992. Mixed, Forced, and Free Convection Heat Transfer at the Greenhouse Cover. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 51(C):191-205.
- Porter JR, Gawith M. 1997. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *European Journal of Agronomy*. 10(1):23-36.
- Ramakrishna A, Ravishankar GA. 2011. Influence of Abiotic Stress Signals on Secondary Metabolites in Plants. *Journal of Plant Signaling and Behavior*. 6(1):1720-1731.
- Real MMG, Baille A. 2006. Plant Response to Greenhouse Cooling. *Journal of Acta Horticulturae*. 719(1):427-438.
- Sakamoto M, Suzuki T. 2015a. Elevated Root-Zone Temperature Modulates Growth and Quality of Hydroponically Grown Carrots. *Journal of Agricultural Sciences*. 6(1):749-757.
- Sakamoto M, Suzuki T. 2015b. Effect of Root-Zone Temperature on Growth and Quality of Hydroponically Grown Red Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Red Wave). *American Journal of Plant Sciences*. 6(1):2350-2360.
- Suhardiyanto H. 2009. *Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah*. Bogor (ID): IPBPres.
- Suhardiyanto H, Fuadi MM, Widaningrum Y. 2007. Analisis Pindah Panas pada Pendinginan dalam Tanah untuk Sistem Hidroponik. *Jurnal Keteknik Pertanian*. 21(4):355-362.
- Sunu P, Wartoyo SP. 2006. *Buku Ajar: Dasar Hortikultura*. Surakarta (ID): UNS.
- Yan Q, Duan Z, Mao J, Xun L, Fei D. 2013. Low Root Zone Temperature Limits Nutrient Effects on Cucumber Seedling Growth and Induces Adversity Physiological Response. *Journal of Integrative Agriculture*. 12(8):1450-1460.

Nomenclature

A	Luas perpindahan panas, m^2	L	Panjang pipa, m
A_i	Luas selimut pipa dalam, m^2	L_c	Panjang karakteristik, m
A_o	Luas selimut pipa luar, m^2	L_p	Panjang pipa, m
A_1	Luas penampang pipa dalam, m^2	Nu	Nusselt number
A_0	Luas penampang pipa luar, m^2	ρ	Densitas fluida, (kg/m^3)
A_{ab}	Luas sisi atas atau bawah, m^2	Pr	Prantl number
A_{db}	Luas sisi depan atau belakang, m^2	q	Fluks panas, Wm^{-2}
A_{sk}	Luas sisi kanan atau kiri, m^2	Ra_L	Rayleigh number
C_p	Panas jenis fluida, $Jkg^{-1} K^{-1}$	Re	Reynold number
D	Diameter pipa, m	R_i	Jari-jari pipa dalam, m
$D_{h,d}$	Diameter hidrolis, m	R_o	Jari-jari pipa luar, m
D_i	Diameter pipa dalam, m	T_d	Suhu dinding pipa pendingin, $^{\circ}C$
D_o	Diameter pipa luar, m	T_i	Suhu air pendingin inlet, $^{\circ}C$
g	Percepatan gravitasi, ms^{-2}	T_o	Suhu air pendingin outlet, $^{\circ}C$
Gr_L	Grashof number	T_s	Suhu solid, $^{\circ}C$
h_{mt}	Koef. konveksi media tanam, $Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$	T_w	Suhu fluida, $^{\circ}C$
h_a	Koef. konveksi pipa pendingin, $Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$	U	Overall heat transfer coefficient, $Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$
h_u	Koefisien konveksi udara, $Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$	μ	Viskositas dinamik, $kg m^{-1} s^{-1}$
K_i	Keliling pipa dalam, m	ν	Kecepatan aliran fluida, $m s^{-1}$
K_o	Keliling pipa luar, m	ν	Viskositas kinematik, $m^2 s^{-1}$
k_{acr}	Konduktivitas acrylic, $Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$	ΔX_{acr}	Tebal acrylic, m
k_p	Konduktivitas pipa, $Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$	ΔX_p	Tebal paragnet, m
k_{pr}	Konduktivitas paragnet, $Wm^{-1}^{\circ}C^{-1}$		