

Pemodelan Matematik Kinerja Pengering Surya Efek Rumah Kaca (ERK)-Hibrid Menggunakan Rak Berputar secara Vertikal

Mathematical Modeling Performance of Greenhouse Effect (GHE)-Hybrid Solar Dryer with a Vertical Rotating Rack

Sigit Triwahyudi¹, Bandul Suratmo², Budi Rahardjo², Leopold Oscar Nelwan³

¹Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Tromol Pos 02, Serpong 15310, Indonesia

²Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada,

Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, Indonesia

³Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor, PO Box 220, Bogor 16002, Indonesia

Email: sigittriwahyudi@yahoo.com

Submisi: 10 Juni 2015; Penerimaan: 9 November 2015

ABSTRAK

Makalah ini menyajikan uji unjuk kerja dan pemodelan matematik pengering energi surya (ERK)-Hibrid menggunakan rak berputar secara vertikal. Pengering terdiri dari bangunan rumah kaca berukuran ($1100 \times 860 \times 1300$) mm dengan delapan buah rak dan sistem pemanas tambahan yang terdiri dari kolektor plat datar ($1,04 \text{ m}^2$), tangki penyimpan air panas (197 liter) dan penukar panas. Untuk mengetahui kinerja pengering energi surya, dilakukan lima kali percobaan variasi kecepatan putar rak (1, 4, 7, 10) rpm dan tanpa pemutaran rak. Bahan yang dipergunakan pada pengujian adalah kapulaga lokal (*Amomum cardamomum* Wild). Masing-masing percobaan seberat 9 sampai dengan 10 kg. Rata-rata suhu air tangki penyimpan panas bervariasi dari 50,0 sampai dengan 55,0 °C suhu ruang pengering antara 38,9 sampai dengan 45,9 °C, sedangkan kelembaban relatif (RH) ruang pengering berkisar antara 32,1 sampai dengan 47,4 %. Perlakuan pemutaran rak berpengaruh terhadap keseragaman suhu bahan maupun kadar air pada masing rak pengering. Pada perlakuan pemutaran 1 rpm (percobaan II), didapatkan kondisi terbaik (suhu bahan maupun kadar air yang paling seragam). Dengan kecepatan putar rak yang semakin meningkat menyebabkan nilai ragam suhu bahan maupun kadar air semakin meningkat. Untuk melakukan simulasi unjuk kerja dilakukan pemodelan matematik berdasarkan pindah panas dan massa serta pendekatan pengeringan lapisan tipis. Persamaan diselesaikan secara numerik menggunakan *finite difference* Euler dengan bantuan bahasa pemrograman *Visual Basic Application* (VBA) Excell. Validasi dilakukan dengan membandingkan antara perhitungan hasil pemodelan (data prediksi) dengan data hasil pengukuran (data observasi). Kriteria kevalidan ditentukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2), nilai RMSD maupun nilai MAPD. Pemodelan matematik yang telah dibangun dapat menggambarkan dengan tepat perubahan suhu air tangki penyimpan panas, suhu ruang pengering, suhu bahan maupun penurunan kadar air.

Kata kunci: Pengering surya efek rumah kaca; uji kinerja; pemodelan matematik Rak berputar vertikal

ABSTRACT

This paper presents a performance test and mathematical modeling of greenhouse effect (GHE)-Hybrid solar dryer with vertical rotating rack. The dryer consists of a greenhouse dryer ($1100 \times 860 \times 1300$) mm with eight rack and additional heating system consists of a flat plate collector ($1,04 \text{ m}^2$), a hot water storage tank (197 liters) and a heat exchanger. To investigate the performance of solar greenhouse dryer, five experimental variation speed of rack were conducted (1, 4, 7, 10 rpm) and without rotation. Materials used in the experiment are local cardamom (*Amomum cardamomum* Wild). Weight of each experiment about 9 to 10 kg. The average temperature of the hot water storage tank varies from 50.0 to 55.0 °C, drying air temperature between 38.9 to 45.9 °C, while the relative humidity (RH) of drying chamber ranged

from 32.1 to 47.4 %. Variation of rotational speed affects on the uniformity of product temperature and water content in each rack drying. At rotation 1 rpm (experiment II), obtained as the best conditions (temperature and moisture content are most uniform). Increasing rotational speed of rack causes increasing in standard deviation of product temperature and moisture content. To simulate the performance of the dryer, mathematical modeling based on heat and mass transfer and a thin layer drying approaches were conducted. Equations solved numerically using the finite difference Euler with Visual Basic Application (VBA) program on Excel. Validation was conducted by comparing the calculation results of mathematical modeling (data prediction) with measurement data (data observation). Criterion validity was determined by the value of the coefficient of determination (R^2), the value of RMSD and MAPD. Mathematical models that have been developed can be described precisely the temperature of the hot water storage tank, temperature of the drying chamber, temperature of the product as well as a moisture content decrease.

Keywords: Greenhouse effect solar dryer; performance test; mathematical modelling Vertical rotating rack

PENDAHULUAN

Peluang pemanfaatan energi baru dan terbarukan untuk proses pengeringan masih terbuka luas dan perlu lebih ditingkatkan lagi. Salah satu sumber energi yang bisa dikembangkan adalah penggunaan energi surya. Jenis alat pengering yang banyak dikembangkan adalah pengering Efek Rumah Kaca (ERK) yang memadukan kolektor panas surya sebagai pembangkit panas udara dengan ruang pengering untuk mengurangi biaya konstruksi (Abdullah, 2007). ERK dapat dibangun dalam berbagai konfigurasi tergantung pada jenis komoditas yang dikeringkan, luas lahan tersedia, intensitas, dan lama penyinaran surya.

Pengering ERK telah diuji coba untuk mengeringkan berbagai produk pertanian, seperti, kakao (Nelwan, 1997; 2005), kopi (Wulandani, 1997; Janjai dkk., 2011), cengkeh (Wulandani, 2005), jagung (Nelwan dkk., 2007); cabai dan pisang (Janjai dkk., 2011), dan lain-lain. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, pengering ERK mampu memberikan performasi pengeringan yang cukup bagus. Namun demikian masih ada beberapa kendala yang dijumpai dalam penerapan ERK.

Kendala yang dijumpai pada pengering ERK tipe rak adalah masalah keseragaman kadar air akhir produk yang dikeringkan. Salah satu penyebab beragamnya kadar air produk hasil pengeringan adalah distribusi aliran panas yang tidak merata di dalam ruang pengering selama proses pengeringan, khususnya tipe rak. Prasad dan Vijay (2005) melakukan penelitian pengeringan jahe dan temulawak dengan menggunakan pengering energi matahari tipe kabinet, dimana suhu pada rak bagian atas mencapai 49,8 °C, rak bagian tengah 42,2 °C dan rak bagian bawah sebesar 39,9 °C. Wulandani (2005), melaporkan pada pengering ERK dengan bangunan segiempat menunjukkan bahwa perbedaan suhu yang terjadi pada arah vertikal lebih besar dibandingkan dengan suhu pada arah horizontal. Hasil penelitian Janjai dkk. (2011) pada pengeringan kopi, pisang dan cabai dengan pengering ERK (*solar greenhouse*) menunjukkan

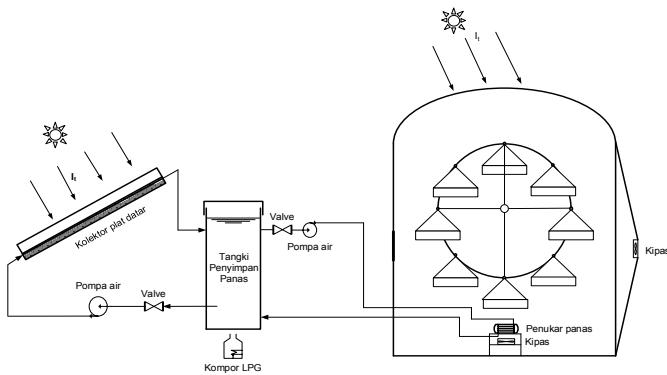
bahwa tidak ada perbedaan suhu pada arah horizontal untuk setiap titik pengamatan. Oleh karena itu, pengering ERK harus dimodifikasi dengan tempat pengeringan yang memungkinkan produk mencapai suhu dan kadar air akhir yang seragam, yaitu dengan cara memutar produk dengan sistem pemutaran atau tempat/wadah, seperti yang pernah dilakukan oleh Nelwan (2005), yaitu dengan menggunakan rak berputar secara horisontal dan Nelwan dkk. (2007) dengan wadah silinder yang diputar secara vertikal. Akan tetapi tidak semua jenis produk pertanian dapat dilakukan proses pengadukan selama pengeringan berlangsung. Untuk itu diperlukan bentuk modifikasi lain, antara lain dengan rancangan rak pengering yang dapat diputar kearah vertikal. Triwahyudi (2009), melakukan kajian pengeringan kapulaga dengan pengering ERK Hybrid tipe rak berputar secara vertikal, yang merupakan disain dari Wulandani dkk. (2008) dan diperoleh hasil pada pergeseran 45° memberikan hasil terbaik dengan nilai ragam untuk sebaran suhu sebesar 1,2 °C, nilai ragam untuk kadar air sebesar 1,1 %. Namun pada penelitian tersebut belum dilakukan pemodelan matematik dengan memasukkan pengaruh variasi kecepatan putar rak.

Proses pengeringan dan pemodelan matematik pada pengering Efek Rumah Kaca (ERK) menggunakan rak berputar secara vertikal dengan variasi kecepatan putar rak belum dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan uji kinerja sistem pengering untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan putar rak terhadap keragaman suhu bahan maupun penurunan kadar air. Serta merumuskan model matematik untuk memprediksi perubahan suhu maupun penurunan kadar air bahan dan melakukan validasi dari model tersebut.

METODE PENELITIAN

Diskripsi Alat

Alat pengering efek rumah kaca terdiri dari tiga bagian utama yaitu bangunan rumah kaca, pemanas tambahan dan sistem kontrol (Gambar 1).



Gambar 1. Skematis pengering ERK-Hybrid tipe rak berputar dengan penyimpan panas

Bangunan rumah kaca merupakan rancangan Wulandani dkk. (2008), berukuran ($p \times l \times t$) $1100 \times 860 \times 1300$ mm. Dinding pengering dan atap bangunan menggunakan lembaran polikarbonat ketebalan 1,2 mm. Silinder pengering dengan rak pengering sejumlah delapan buah rak. Silinder pengering ini digerakkan dengan motor listrik 187 W, kecepatan putaran diatur pada kecepatan 1, 4, 7, dan 10 rpm dengan menggunakan Inverter. Untuk membantu sirkulasi udara, pada bagian pengeluaran udara dipasang kipas 60 W. Pemanas tambahan menggunakan sistem pemanas air terdiri dari kolektor plat datar, tangki penyimpan air panas dan pemanas tambahan. Kolektor plat datar berukuran $1,04 \text{ m}^2$ dengan penutup transparan menggunakan bahan akrilik 5 mm, plat absorber menggunakan plat tembaga yang dicat hitam. Tangki penyimpan panas berkapasitas 174 liter terbuat dari bahan *stainless steel* yang diberi isolasi untuk mengurangi kehilangan panas. Untuk mensirkulasikan air dari penyimpan panas ke kolektor menggunakan pompa air 125 W yang dilengkapi dengan *valve*. Air panas dari tangki penyimpan dialirkan ke penukar panas (radiator) yang ada di dalam ruang pengering dengan menggunakan pompa air. Udara panas dari penukar panas tersebut kemudian dihembuskan ke ruang pengering dengan bantuan kipas 60 W.

Metode Pengujian

Pengujian unjuk kerja dilakukan di Desa Pagedangan, Kecamatan Pagedangan, Kabupaten Tangerang pada bulan Februari sampai dengan Juli 2014. Proses pengeringan hanya dilakukan pada siang hari saja, sedangkan pada malam hari bahan tetap dibiarkan didalam ruang pengering dan bangunan pengering ditutup dengan menggunakan terpal. Bahan uji yang digunakan adalah kapulaga lokal (*Amomum cardamomum* Wild) berasal dari Desa Cibadak, Sukabumi, Jawa Barat, dengan bobot setiap percobaan 9 sampai dengan 10 kg. Untuk mengetahui penurunan kadar air pada masing-masing rak dibuat sampel seberat 375 gram. Sampel

Tabel 1. Percobaan pemutaran rak pada uji unjuk kerja pengering energi surya ERK tipe rak berputar secara vertikal.

Percobaan	Deskripsi
I (kontrol)	Tanpa pemutaran rak pengering
II	Pemutaran rak pengering kecepatan putar 1 rpm
III	Pemutaran rak pengering, kecepatan putar 4 rpm
IV	Pemutaran rak pengering, kecepatan putar 7 rpm
V	Pemutaran rak pengering, kecepatan putar 10 rpm

diletakkan ditengah-tengah pada masing-masing rak. Setiap interval satu jam sampel ditimbang menggunakan timbangan digital (Kern, ketelitian $\pm 0,1$ gram). Pengeringan dihentikan apabila sudah tidak ada penurunan bobot sampel pada masing-masing rak. Pada akhir proses pengeringan kadar air diukur dengan menggunakan metode oven (103°C selama 24 jam).

Iridiasi surya diukur dengan menggunakan pyranometer (MS- 102) yang diletakkan di samping bangunan pengering, keluaran dari pyranometer ini berupa tegangan yang diukur dengan menggunakan digital multimeter SANWA CD 800A. Termokopel tipe K digunakan untuk mengukur suhu air masuk dan keluar kolektor, suhu air masuk dan keluar penyimpan panas, suhu udara masuk dan keluar penukar panas, suhu udara ruang pengering. Suhu dari termokopel ini dibaca pada hybrid recorder HR-2500E. Suhu bahan pada pasing-masing rak diukur dengan menggunakan FLUKE 62 mini IR thermometer. Kelembaban relatif (RH) udara luar dan ruang pengering diukur dengan menggunakan thermohygrometer SANFIX TH-308. Sedangkan kecepatan udara masuk dan ke luar ruang pengering diukur dengan menggunakan anemometer LUTRON AM 4206. Masing-masing parameter tersebut diukur dan diamati setiap interval satu jam.

Untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar rak terhadap unjuk kerja alat, dalam penelitian ini akan dilakukan lima percobaan pemutaran rak seperti terlihat pada Tabel 1.

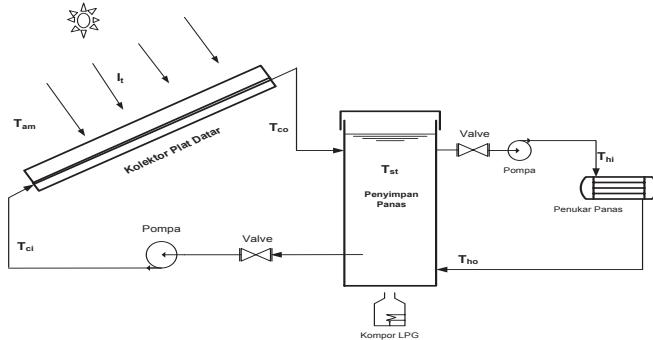
Pengembangan Model Matematik

Pengering ERK tipe rak berputar dengan penyimpan panas meliputi: sub sistem kolektor - tangki air - penukar panas, serta sub sistem ruang pengering dengan rak berputar.

Asumsi yang digunakan dalam mengembangkan model matematika adalah sebagai berikut: penyebaran suhu dan RH di dalam ruang merata ke seluruh tempat; laju aliran udara masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) alat pengering dianggap sama untuk setiap waktu; kecepatan aliran udara di dalam ruang pengering dianggap konstan; kehilangan panas pada saat pintu dibuka untuk pengambilan sampel diabaikan; suhu masing-masing komponen dianggap merata; proses pengeringan menggunakan prinsip pengeringan lapisan tipis (*thin layer drying*).

Model Neraca Energi Panas pada Penyimpan Panas dan Penukar Panas

Skema diagram neraca energi pada sistem penyimpan panas dan penukar panas dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema diagram neraca energi pada penyimpan panas

Berdasarkan diagram tersebut neraca energi air di dalam penyimpan panas dan penukar panas sebagai berikut:

Model Neraca Energi Panas pada Penyimpan Panas

Dalam sistem pemanas air energi surya neraca energi pada tangki penyimpan panas merupakan akumulasi dari panas yang didapatkan dari energi surya berupa kolektor plat datar yang disirkulasikan dengan sebuah pompa dikurangi dengan laju kehilangan panas dari penyimpan panas dan beban penggunaan berupa aliran air yang digerakkan oleh pompa dari tangki menuju penukar panas dan kembali lagi ke tangki. Dengan asumsi suhu masuk penukar panas (T_{hi}) sama dengan suhu penyimpan panas (T_{st}), maka persamaan neraca energi panas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$(\rho C_p)_w V_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = A_{col} F_R [I_t (\tau \alpha) - U_L (T_{st} - T_{am})] - A_{st} U_{st} (T_{st} - T_{am}) - \dot{m}_{HE} C_{pw} (T_{hi} - T_{ho}) + \dot{m}_{LPG} Q_{LPG} \quad (1)$$

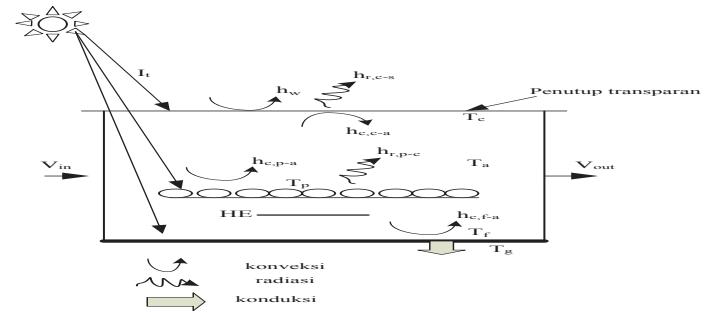
Model Neraca Energi Panas pada Penukar Panas

Penukar panas yang digunakan adalah penukar panas tipe aliran *cross-flow*. Dengan asumsi bahwa perubahan entalpi air cepat menuju ke *equilibrium (steady state)* serta suhu masuk penukar panas (T_{hi}) sama dengan suhu penyimpan panas (T_{st}), maka neraca energi panas dapat dinyatakan sebagai :

$$0 = \dot{m}_{HE} C_{pw} (T_{ho} - T_{hi}) + U_{HE} A_{HE} \Delta T_{HE,ln} \quad (2)$$

Model Neraca Energi Panas pada Ruang Pengering

Skema diagram perpindahan panas dalam ruang pengering dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema diagram pindah panas dalam ruang pengering

Berdasarkan diagram tersebut dapat dijabarkan persamaan perpindahan panas dan masa sebagai berikut:

Neraca energi panas dalam ruang pengering dapat dirumuskan sebagai:

$$(m_a C_{pa}) \frac{dT_a}{dt} = A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) - A_p h_{c,p-a} (T_a - T_p) - A_p D_p C_{pv} \rho_p m_p (T_p - T_a) \dot{m}_{v,tot} - [\rho_a (A_{out} V_{out}) - (A_{in} V_{in})] C_{pa} (T_a - T_{am}) - (UA)_c (T_a - T_{am}) + (UA)_{HE} (T_{HE} - T_a) + I_t \tau_c \alpha_c A_c \quad (3)$$

Sedangkan neraca energi panas pada lantai dalam ruangan dirumuskan :

$$(mc_p)_f \frac{dT_f}{dt} = I_t \tau_c \alpha_f A_f - A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) - A_f h_{D,f-g} (T_f - T_g) \quad (4)$$

Neraca energi panas pada penutup transparan dirumuskan:

$$(mc_p)_c \frac{dT_c}{dt} = I_t \alpha_c A_c - A_c h_{c,c-a} (T_c - T_a) - A_c h_{r,c-s} (T_c - T_s) - A_c h_w (T_c - T_{am}) - A_p h_{r,p-c} (T_c - T_p) \quad (5)$$

Neraca uap air di dalam ruang pengering dirumuskan:

$$\rho_a V_a \frac{dH_a}{dt} = \rho_a [(A_{out} V_{out}) - (A_{in} V_{am})] (H_{am} - H_a) + \dot{m}_{v,tot} \quad (6)$$

Dengan asumsi suhu ruang pengering homogen, maka neraca energi panas pada produk pada saat posisi rak diatas (terkena iradiasi langsung) dirumuskan:

$$(mc_p)_{p,n} \frac{dT_{p,n}}{dt} = I_t \tau_c \alpha_p A_{p,n} - A_{p,n} h_{c,p-a} (T_{p,n} - T_a) - A_{p,n} h_{r,p-c} (T_{p,n} - T_c) - \dot{m}_{v,n} h_{fg} \quad (7)$$

Sedangkan neraca energi panas pada produk saat tidak terkena iradiasi, dirumuskan:

$$(mc_p)_{p,n} \frac{dT_{p,n}}{dt} = -A_{p,n} h_{c,p-a} (T_{p,n} - T_a) - A_{p,n} h_{r,p-c} (T_{p,n} - T_c) - \dot{m}_{v,n} h_{fg} \quad (8)$$

Model Penurunan Kadar Air Pada Produk untuk Tiap Rak

Model pengeringan lapisan tipis diterapkan untuk menduga laju pengeringan. Laju pengeringan dapat dinyatakan sebagai berikut (Bala, 1997):

$$\frac{dM_n}{dt} = -K(M - M_e) \quad (9)$$

Perubahan kadar air untuk masing-masing rak dihitung dengan menggunakan rumus model persamaan lapisan tipis yang didapatkan pada percobaan pengeringan lapisan tipis. Untuk bahan kapulaga lokal, persamaan lapisan tipis yang cocok adalah model Logaritmik (Triwahyudi dkk., 2015a), dengan persamaan:

$$MR(a, k, t, b) = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) + b \quad (10)$$

dimana :

$$a = 1,031 - 0,016 T + 1,267 RH + 0,00018 T^2 - 1,151 RH^2, R^2 = 0,984 \quad (11)$$

$$k = 0,0127 - 0,0002 T - 0,0239 RH + 0,0000025 T^2 + 0,0220 RH^2, R^2 = 0,996, \quad (12)$$

$$b = 0,298 - 0,0084 T - 0,490 RH + 0,000082 T^2 + 0,447 RH^2, R^2 = 0,997 \quad (13)$$

Persamaan 10 dapat disederhanakan menjadi:

$$M_t = M_e + (M_0 - M_e)(a \exp(-kt) + b) \quad (14)$$

Sedangkan kadar air kesetimbangan (M_e) untuk kapulaga lokal menggunakan model persamaan Chung-Pfost (Triwahyudi dkk., 2015b) dengan persamaan :

$$M_e = \frac{-1}{0,128} \ln \left[-\frac{(T - 8,499)}{122,594} \ln(ERH) \right] \quad (15)$$

Prosedur Penyelesaian

Pemecahan persamaan-persamaan baik model persamaan pindah panas dan masa (Pers. 1 sampai dengan Pers. 8) dan persamaan pengeringan lapisan tipis tersebut dapat dilakukan secara numerik menggunakan *finite difference Euler*, secara bersama-sama untuk komponen-komponen utama dengan bantuan bahasa pemrograman *Visual Basic Application* (VBA) Excell. Penyelesaian persamaan model memerlukan beberapa konstanta baik dari data maupun yang perlu dihitung.

Untuk maksud validasi, hasil perhitungan pemodelan (data prediksi) dibandingkan dengan hasil pengukuran dari percobaan (data observasi) yang meliputi suhu penyimpanan panas, suhu ruang pengering, suhu bahan dan penurunan kadar air. Evaluasi kevalidan ditentukan dengan melihat kriteria nilai koefisien determinasi (R^2) menggunakan persamaan 16 serta nilai *root mean square deviation* (RMSD) maupun nilai *mean relative percent error* (MAPD) dengan menggunakan persamaan 17 dan 18 (Janjai dkk., 2009; Zare dan Chen, 2009).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{obs,i} - y_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{obs,i} - \bar{y}_{obs})^2} \quad (16)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{pred,i} - y_{obs,i})^2}{N}} \times 100 \quad (17)$$

$$MAPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_{obs,i} - y_{pred,i}|}{y_{obs,i}} \quad (18)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian

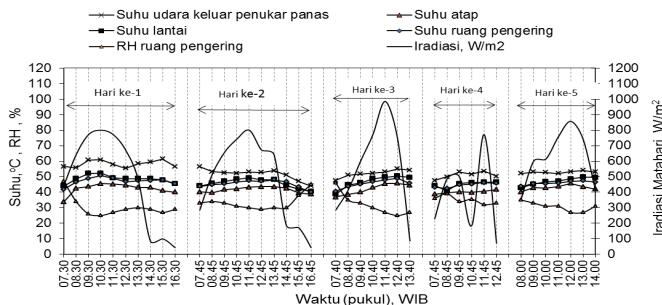
Perubahan suhu pemanas tambahan

Pemanas tambahan yang digunakan berasal dari air yang dipanaskan didalam kolektor dan disimpan dalam tangki penyimpan kemudian digunakan untuk memanaskan udara pengeringan dalam penukar panas. Dalam kasus ini, pada tabung penyimpan air panas juga dilengkapi dengan kompor gas LPG dimaksudkan untuk mempertahankan suhu air panas pada kisaran 50 °C. Dalam penelitian ini kompor gas LPG hanya digunakan pada awal proses untuk memanaskan air pada tangki penyimpan sampai suhu tangki mencapai 50 °C, atau apabila suhu tangki penyimpan air panas menurun dikarenakan iradiasi surya yang berfluktuasi.

Dari percobaan I sampai dengan percobaan V didapatkan rata-rata suhu air keluar kolektor maupun suhu air tangki penyimpan panas berada pada kisaran 50 sampai dengan 55 °C, sedangkan rata-rata suhu udara keluar penukar panas mencapai angka 45,2 sampai dengan 53,5 °C. Dengan kondisi tersebut, rata-rata suhu ruang pengering dapat mencapai 38,9 sampai dengan 45,9 °C.

Perubahan suhu pada ruang pengering selama proses pengeringan

Gambar 4 memperlihatkan perubahan suhu maupun RH ruang pengering pada percobaan II. Nampak bahwa suhu atap, suhu lantai, suhu ruang maupun RH ruang pengering berfluktuasi mengikuti iradiasi surya. Suhu atap pada percobaan II berkisar antara 33,8 sampai dengan 45,8 °C, kisaran suhu lantai yang dapat dicapai antara 38,7 sampai dengan 52,3 °C. Sedangkan kisaran suhu ruang pengering yang dapat dicapai pada percobaan II berkisar antara 40,1 sampai dengan 50,8 °C, dengan RH ruang pengering antara 25,0 sampai dengan 47,0 %. Rata-rata suhu ruang pengering tertinggi dan RH terendah terjadi pada percobaan II, hal tersebut disebabkan pada percobaan II menerima iradiasi surya lebih tinggi dibandingkan dengan percobaan yang lain. Sedangkan pada percobaan V didapatkan rata-rata suhu ruang pengering terendah dan RH ruang pengering tertinggi dikarenakan pada percobaan V rata-rata iradiasi surya yang diterima paling rendah jika dibandingkan dengan percobaan yang lain.



Gambar 4. Distribusi suhu ruang pengering hasil pengujian pada percobaan II

Pengaruh variasi kecepatan putar rak terhadap keragaman suhu bahan

Suhu bahan rata-rata untuk kelima percobaan dapat dilihat pada Gambar 5. Dari Gambar tersebut nampak bahwa pada pengujian dengan pemanas tambahan, pada percobaan I (tanpa pemutaran) didapatkan suhu bahan rata-rata untuk tiap rak yang tidak seragam. Suhu bahan untuk rak No. 4, 5 dan 6 mempunyai suhu bahan yang tinggi, hal tersebut disebabkan posisi untuk rak No. 4, 5 dan 6 ada pada posisi atas sehingga lebih banyak mendapatkan iradiasi surya secara langsung. Dari Gambar tersebut juga nampak bahwa posisi rak No. 1, 2 dan 8 juga mempunyai suhu bahan yang tinggi. Hal tersebut disebabkan untuk posisi rak No. 1, 2 dan 8 pada pengujian dengan pemanas tambahan juga mendapatkan panas langsung dari penukar panas. Posisi rak No. 3 dan No. 7 suhu bahan lebih rendah disebabkan posisi ke dua rak tersebut berada pada posisi tengah sehingga kurang mendapatkan panas dari iradiasi surya secara langsung maupun panas dari penukar panas.

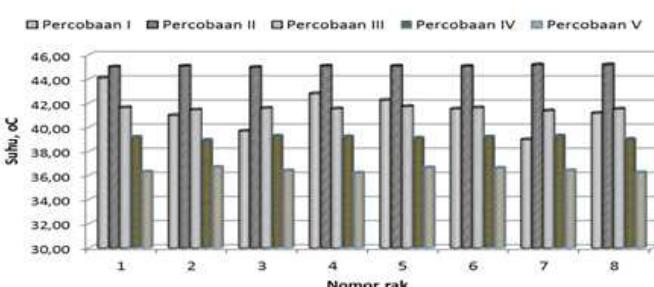
Dari percobaan juga didapatkan hasil, percobaan pemutaran rak pengering berpengaruh terhadap keseragaman suhu bahan pada masing-masing rak pengering. Pada percobaan I (tanpa pemutaran) didapatkan hasil suhu bahan untuk tiap-tiap rak bervariasi yang ditunjukkan dengan besarnya nilai ragam (standar deviasi) sebesar $1,64^{\circ}\text{C}$ dengan suhu bahan rata-rata $41,5^{\circ}\text{C}$. Pada percobaan II

dengan pemutaran 1 rpm didapatkan suhu bahan pada tiap-tiap rak yang paling seragam dengan nilai ragam yang terendah sebesar $0,07^{\circ}\text{C}$ dan suhu bahan rata-rata $45,1^{\circ}\text{C}$, kemudian diikuti dengan percobaan III sebesar $0,11^{\circ}\text{C}$ suhu bahan rata-rata $41,6^{\circ}\text{C}$, percobaan IV sebesar $0,13^{\circ}\text{C}$ suhu bahan rata-rata $39,2^{\circ}\text{C}$ dan pada percobaan V sebesar $0,19^{\circ}\text{C}$ dengan suhu bahan rata-rata $36,4^{\circ}\text{C}$. Nilai ragam suhu bahan pada penelitian dengan pemutaran 1 rpm ini lebih rendah dari pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Triwahyudi (2009) dengan melakukan pergeseran rak sebesar 45° setiap interval satu jam dengan nilai ragam sebesar $1,2^{\circ}\text{C}$.

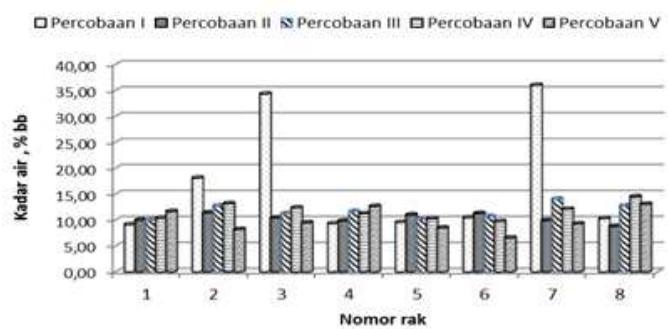
Pengaruh variasi kecepatan putar rak terhadap penurunan kadar air selama proses pengeringan

Kadar air akhir (% bb) hasil pengeringan untuk kelima percobaan dapat dilihat pada Gambar 6. Pada percobaan I dengan perlakuan tidak dilakukan pemutaran rak, didapatkan kadar air tiap-tiap rak yang tidak seragam. Rak No. 1, 2, 4, 5, 6 dan 8 kadar air lebih rendah dari pada rak No. 3 dan 7. Hal ini disebabkan pada rak tersebut suhu bahan lebih tinggi dari pada rak No. 3 dan 7. Rak No. 1, 2 dan 8 mendapatkan panas langsung dari penukar panas karena posisi rak ada pada bagian bawah, sedangkan rak No. 4, 5 dan 6 mendapatkan panas dari iradiasi surya secara langsung karena posisi rak ada pada bagian atas.

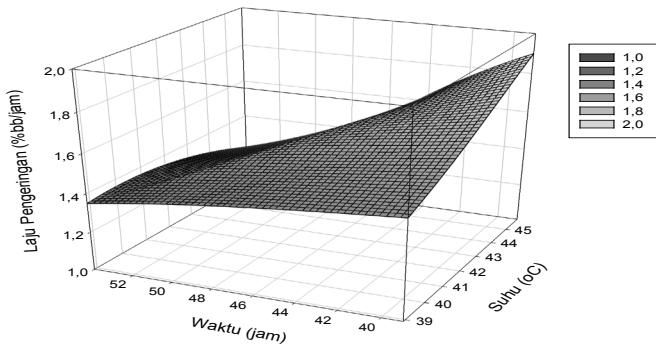
Dari Gambar 6 juga terlihat bahwa perlakuan pemutaran rak berpengaruh terhadap keragaman kadar air. Pada percobaan II dengan pemutaran 1 rpm, didapatkan kadar air akhir tiap rak yang lebih seragam jika dibandingkan dengan percobaan yang lain dengan nilai ragam sebesar $0,89\%$. Pada percobaan I dimana tidak dilakukan proses pemutaran rak pengering didapatkan nilai ragam sebesar $11,51\%$. Sedangkan nilai ragam untuk percobaan III sebesar $1,43\%$, percobaan IV sebesar $1,64\%$ dan pada percobaan V sebesar $2,31\%$. Dari hasil penelitian juga didapatkan dengan pemutaran rak pengering yang semakin meningkat menyebabkan nilai ragam kadar air yang juga meningkat. Nilai ragam kadar air pada penelitian dengan pemutaran 1 rpm ini juga lebih rendah dari



Gambar 5. Suhu bahan rata-rata pada tiap rak pengering pada percobaan I, II, III, IV dan V



Gambar 6. Kadar air akhir tiap-tiap rak pada percobaan I, II, III, IV, dan V



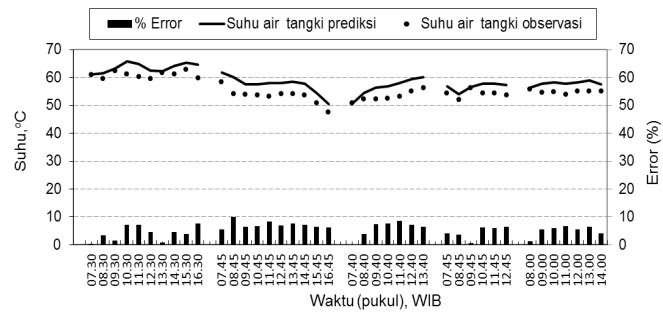
Gambar 7. Grafik hubungan antara laju pengeringan dengan waktu dan suhu pengeringan

pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Triwahyudi (2009) dengan melakukan pergeseran rak sebesar 45° setiap interval satu jam dengan nilai ragam sebesar 1,1 %.

Dari hasil pengujian juga didapatkan bahwa variasi kecepatan putar rak tidak berpengaruh terhadap laju pengeringan. Laju pengeringan dipengaruhi oleh suhu ruang pengering dan lama pengeringan seperti terlihat pada Gambar 7. Semakin tinggi suhu, waktu pengeringan semakin singkat sehingga laju pengeringan semakin besar. Hal tersebut juga sesuai dengan hasil penelitian pada pengeringan lapisan tipis untuk kapulaga lokal (Triwahyudi, 2015a). Hal yang sama juga dikemukakan oleh Abasi dkk. (2009) pada pengeringan bawang merah, Abano dkk. (2011) pada pengeringan irisan tomat serta Tzempelikos dkk. (2014) pada penelitian irisan buah quince (*Cydonia oblonga*). Laju pengeringan pada percobaan II merupakan laju pengeringan tertinggi 1,90 % bb/jam dan laju pengeringan terendah didapatkan pada percobaan V sebesar 1,35% bb/jam. Pemutaran rak pengering hanya berpengaruh pada keseragaman laju pengeringan pada masing-masing rak pengering. Pada percobaan I didapatkan nilai ragam yang tertinggi sebesar 0,35 %, sedangkan nilai ragam terendah didapatkan pada percobaan II dengan nilai 0,02 %.

Validasi Pemodelan Matematik

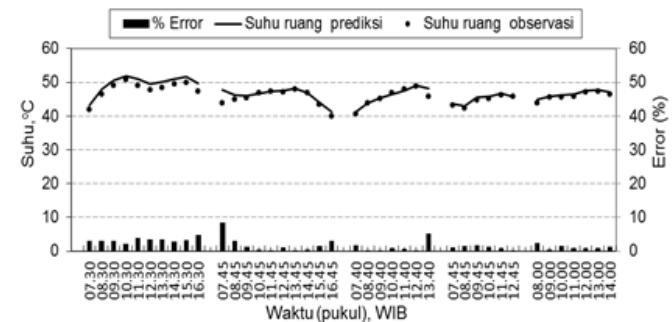
Gambar 8 memperlihatkan perbandingan antara hasil observasi dan prediksi suhu air penyimpan panas. Dari Gambar tersebut terlihat pola sebaran suhu air tangki penyimpan panas secara umum sudah mengikuti suhu hasil observasi. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 83,6 % dengan nilai RMSD 6,27 % dan nilai MAPD sebesar 5,38 %. Berdasarkan angka tersebut dapat dikatakan pemodelan yang telah dibangun dapat memprediksi suhu air tangki penyimpan panas dengan akurat. Menurut Janjai dkk. (2009), model dapat dikatakan tepat apabila nilai RMSD < 10 % serta nilai MAPD < 15 % (Zare dan Chen, 2009).



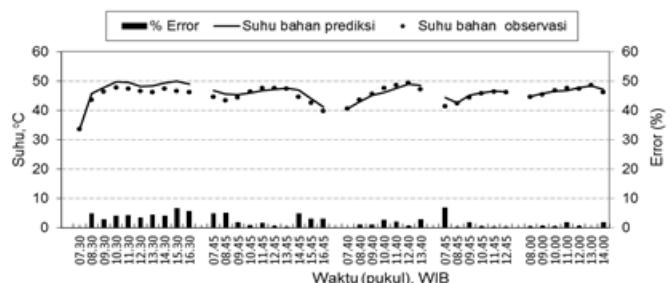
Gambar 8. Suhu air tangki penyimpan panas prediksi dan observasi pada pengujian percobaan II

Pola perubahan suhu ruang pengering antara hasil observasi dan prediksi dapat dilihat pada Gambar 9. Nilai koefisien determinasi hubungan antara suhu ruang pengering hasil observasi dan prediksi sebesar 88,5 %, RMSD sebesar 2,68 % dan nilai MAPD nya sebesar 1,93 %. Dari hasil tersebut, model matematik yang telah dibangun untuk menduga perubahan suhu ruang pengering sudah cukup valid.

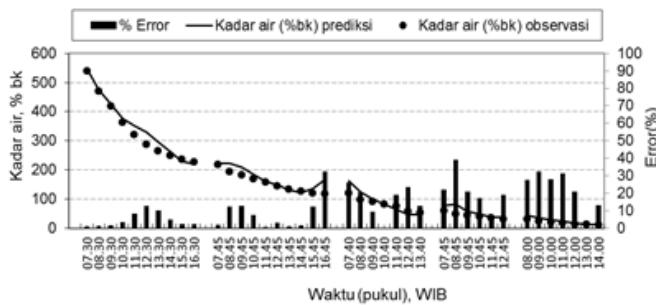
Gambar 10 memperlihatkan perubahan suhu bahan rata-rata antara hasil observasi dan prediksi. Dari Gambar tersebut nampak bahwa perubahan suhu bahan berfluktuasi mengikuti perubahan iradiasi surya. Nilai koefisien determinasinya didapatkan sebesar 83,5 %, RMSD sebesar 3,21 % dan nilai MAPD sebesar 2,36 %. Dari hal tersebut dapat dikatakan model yang dibangun cukup akurat untuk memprediksi suhu



Gambar 9. Perubahan suhu ruang pengering prediksi dan observasi pada pengujian percobaan II



Gambar 10. Perubahan suhu bahan prediksi dan observasi pada pengujian percobaan II



Gambar 11. Perubahan kadar air bahan prediksi dan observasi pada pengujian percobaan II

bahan, hal tersebut dapat dilihat dari kecilnya nilai RMSD maupun MAPD nya.

Sedangkan pada Gambar 11 memperlihatkan perubahan kadar air rata-rata hasil observasi dan prediksi. Nilai koefisien determinasi (R^2) didapatkan sebesar 98,8 %, sedangkan nilai RMSD sebesar 12,46 % dan nilai MAPD sebesar 13,26 %. Walaupun nilai RMSD nya lebih besar dari 10 %, namun model dapat dikatakan cukup valid untuk memprediksi penurunan kadar air. Hal tersebut dapat dilihat dengan nilai R^2 yang cukup tinggi ($> 90\%$) serta nilai MAPD nya masih dibawah 15 %.

KESIMPULAN

Rata-rata suhu air tangki penyimpan panas mencapai $50,0 - 55,0^\circ\text{C}$, suhu udara keluar penukar panas antara $45,2 - 53,5^\circ\text{C}$. Sedangkan suhu udara ruang pengering berkisar antara $38,9 - 45,9^\circ\text{C}$ dengan RH berkisar antara $32,1 - 47,4\%$. Perlakuan pemutaran rak berpengaruh terhadap keseragaman suhu bahan maupun kadar air pada masing rak pengering. Pada perlakuan pemutaran 1 rpm didapatkan kondisi suhu bahan maupun kadar air yang paling seragam. Dengan kecepatan putar rak yang semakin meningkat menyebabkan nilai ragam suhu bahan maupun kadar air semakin meningkat. Variasi kecepatan putar rak tidak berpengaruh terhadap laju pengeringan. Laju pengeringan dipengaruhi oleh suhu dan waktu pengeringan. Perlakuan pemutaran rak hanya berpengaruh terhadap keseragaman laju pengeringan pada masing-masing rak. Model persamaan matematik yang telah dibangun dapat menggambarkan dengan tepat perubahan suhu air tangki penyimpan panas, suhu ruang pengering, suhu bahan maupun penurunan kadar air.

DAFTAR PUSTAKA

Abano, E.E., Ma, H. dan Qu, W. (2011). Influence of air temperature on the drying kinetics and quality of tomato slices. *Journal Food Process Technology* 2(5): 123.

- Abasi, S., Mousavi, M.S., Mohebi, M. dan Kiani, S. (2009). Effect of time and temperature on moisture content, shrinkage, and rehydration of dried onion. *Iranian Journal of Chemical Engineering* 6(3): 57-70.
- Abdullah, K. (2007). Dissemination of GHE solar dryer in Indonesia. *ISESCO Science and Technology Vision* 3(3): 102-105.
- Bala, B.K. (1997). *Drying and Storage of Cereal Grains*. Oxford and IBH Publishing Co. PVT. LTD., Calcutta, New Delhi, India.
- Janjai, S., Lamert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B.K., Nagle, M. dan Muller, J., (2009). Experimental and simulated performance of a PV- ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy* 82: 1550-1565.
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C. dan Khamvongsa, V. (2011). A large-scale of solar greenhouse dryer using polycarbonat cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy* 36: 1053-1062.
- Nelwan, L.O. (1997). *Pengeringan Kakao Dengan Energi Surya Menggunakan Rak Pengering dengan Kolektor Tipe Efek Rumah Kaca*. Tesis. Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Nelwan, L.O. (2005). *Studi on Solar-Assisted Dryer with Rotating For Cocoa Beans*. PhD Thesis. The Graduate School, Bogor Agricultural University, Bogor.
- Nelwan, L.O., Wulandani, D., Paramawati, R. dan Widodo, T.W. (2007). *Rancang Bangun Alat Pengering Efek Rumah Kaca (ERK)-Hybrid dan In-Store Drying (ISD) Terintegrasi untuk Biji-Bijian*. Laporan Hasil Penelitian. Institut Pertanian Bogor bekerjasama dengan Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Prasad, J. dan Vijay, V.K. (2005). Experimental studies on drying zingiber officinale, curcuma longa l and tinospora cardifolia in solar-biomass hybrid drier. *Renewable Energy* 30: 2097-2109.
- Triwahyudi, S. (2009). *Kajian Pengering Surya Efek Rumah Kaca (ERK)- Hybrid dengan Rak Berputar secara Vertikal untuk Pengeringan Kapulaga Lokal (Amomum cardamomum wild)*. Tesis. Sekolah Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Triwahyudi, S., Suratmo, B., Nelwan, L.O. dan Wulandani, D. (2015a). Characteristic and mathematical modelling of thin layer drying of local cardamom (*Amomum cardamomum Wild*). *Indian Journal of Scientific Research and Technology* 3(1): 12-21.

Triwahyudi, S., Rahardjo, B., Nelwan, L.O. dan Wulandani, D. (2015b). Mathematical modeling of equilibrium moisture content of local cardamom (*Amomum cardamomum* Wild). *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 4(2): 40-44.

Tzempelikos, D.A., Vouros, A.P., Bardakas, A.V., Filios, A.E. dan Margaris, D.P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering* 3: 79-85.

Wulandani, D. (1997). *Analisis Pengering pada Alat Pengering Kopi (Coffea Sp.) Efek Rumah Kaca Berenergi Surya*. Thesis. Sekolah Program Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Wulandani, D. (2005). *Kajian Distribusi Suhu, RH dan Aliran Udara Pengering untuk Optimasi Disain Pengering Efek Rumah Kaca*. PhD Thesis. Sekolah Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Wulandani, D., Nelwan, L.O., Agustina, S.E. dan Purwanto, Y.A. (2008). *Pengembangan Alat Pengering Efek Rumah Kaca (ERK)-Hybrid Tipe Rak Berputar untuk Penyeragaman Aliran Udara*. Laporan Penelitian Hibah Bersaing. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM). Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Zare, D. dan Chen, G. (2009). Evaluation of simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 68: 78-87.

Nomenklatur:

A_c : Luas penutup transparan (m²)
 A_{col} : luas kolektor (m²)
 A_f : Luas lantai penyerap panas (m²)
 A_{HE} : Luas penukar panas (m²)
 A_p : Luas bahan yang dikeringkan (m²)
 A_{in} : Luas lubang udara masuk (m²)
 A_{out} : Luas lubang udara keluar (m²)
 A_{st} : Luas tabung penyimpan panas (m²)
 Cp_a : panas jenis udara (kJ/kg K)
 Cp_c : Panas jenis penutup transparan (kJ/kg K)
 Cp_f : Panas jenis lantai (kJ/kg K)
 Cp_p : panas jenis bahan yang dikeringkan (kJ/kg K)
 Cp_v : panas jenis uap air (kJ/kg K)
 Cp_w : panas jenis air (kJ/kg K)
 D_p : Diameter bahan yang dikeringkan (m)
 F_R : Faktor kehilangan panas kolektor
 H_a : Kelembaban mutlak ruang pengering (kg H₂O/kg uk.)
 H_{am} : Kelembaban mutlak udara luar (kg H₂O/kg uk.)
 $h_{c,a}$: Koefisien pindah panas konveksi antara atap dan

ruang pengering (W/m²K)
 $h_{c,f,a}$: Koefisien pindah panas konveksi antara lantai dan ruang pengering (W/m²K)
 $h_{c,p-a}$: Koefisien pindah panas konveksi antara bahan dan ruang pengering (W/m²K)
 $h_{D,f-g}$: Koefisien pindah panas konduksi antara lantai dan pondasi (W/m²K)
 $h_{r,c-s}$: Koefisien pindah panas radiasi antara atap dan udara luar (W/m²K)
 $h_{r,p-c}$: Koefisien pindah panas radiasi antara bahan yang dikeringkan dan atap (W/m²K)
 h_{fg} : Panas latent penguapan (kJ/kg)
 h_w : Koefisien pindah panas konveksi antara atap dan udara luar (W/m²K)
 I_t : Iradiasi surya (kW/m²)
 K : Konstanta laju pengeringan (1/jam)
 M : Kadar air (%bk)
 Me : Kadar air kesetimbangan (%bk)
 M_o : Kadar air awal (%bk)
 M_t : Kadar air pada saat t (%bk)
 m_a : Massa udara ruang pengering (kg)
 m_c : Massa penutup transparan (kg)
 m_f : Massa lantai (kg)
 m_p : Massa bahan yang dikeringkan (kg)
 \dot{m}_{HE} : Laju aliran air penukar panas (kg/detik)
 \dot{m}_{LPG} : Laju pemakaian gas LPG (kg/detik)
 \dot{m}_v : Laju air yang diuapkan tiap rak (kg/detik)
 $\dot{m}_{v,tot}$: Laju total air yang diuapkan (kg/detik)
 Q_{LPG} : Nilai kalor LPG (kJ/kg)
 RH : Kelembaban relatif (%)
 t : waktu (jam)
 T_a : Suhu udara ruang pengering (°C)
 T_{am} : Suhu udara luar (°C)
 T_c : Suhu atap (penutup transparan) (°C)
 T_f : Suhu lantai (°C)
 T_g : Suhu pondasi (ground) (°C)
 T_{HE} : Suhu udara keluar penukar panas (°C)
 T_{hi} : Suhu air masuk penukar panas (°C)
 T_{ho} : Suhu air keluar penukar panas (°C)
 T_p : Suhu bahan yang dikeringkan (°C)
 T_{st} : Suhu air penyimpan panas (°C)
 U_c : Koefisien pindah panas keseluruhan penutup transparan (W/m²°C)
 U_{HE} : Koefisien pindah panas keseluruhan penukar panas (W/m²°C)
 U_L : Koefisien pindah panas keseluruhan kolektor (W/m²°C)
 U_{st} : Koefisien pindah panas keseluruhan tabung penyimpan panas (W/m²°C)
 V_a : Volume udara ruang pengering (m³)

v_{am}	: Kecepatan udara luar (m/detik)	α_p	: Absorptivitas bahan yang dikeringkan
v_{in}	: Kecepatan udara masuk (m/detik)	ρ_a	: densitas udara (kg/m^3)
v_{out}	: Kecepatan udara keluar (m/detik)	ρ_p	: densitas bahan (kg/m^3)
V_{st}	: volume tabung penyimpan panas (m^3)	ρ_w	: densitas air (kg/m^3)
α_c	: Absorptivitas penutup transparan	τ_c	: Transmisivitas penutup transparan
α_{col}	: Absorptivitas plat kolektor	τ_{col}	: Transmisivitas penutup kolektor
α_f	: Absorptivitas lantai		