

PEMODELAN PEMANASAN AIR MENGGUNAKAN KOLEKTOR DATAR UNTUK PENGERINGAN GABAH

Frima Agung Nitipraja dan Leopold O. Nelwan

Alumni Departemen Teknik Pertanian Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220, Bogor
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem Fateta IPB, Gedung Fateta IPB, PO Box 220, Bogor, lonelwan@yahoo.com

ABSTRAK

Ketersediaan yang tidak kontinyu merupakan salah satu karakter khas energi surya. Pada pengering surya, sistem penyimpanan panas digunakan untuk memperoleh pengoperasian yang kontinyu. Sehubungan dengan panas jenisnya yang besar, air berpotensi digunakan sebagai penyimpanan panas. Sebuah sistem pengering gabah yang menggunakan air sebagai sistem penyimpanan panas telah didisain. Sistem ini terdiri dari kolektor datar sebagai penangkap radiasi surya dan bak dengan insulasi sebagai wadah penyimpanan air yang telah dipanaskan, penukar panas dan wadah pengering. Makalah ini membahas pemodelan sistem pemanasan air dengan kolektor datar berdasarkan keseimbangan termal masing-masing komponen sistem. Sebuah model fisik telah dikembangkan untuk memvalidasi model yang dikembangkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan menggunakan kolektor datar berukuran 1.5 m², air dengan massa 100 kg meningkat suhunya sampai hampir 20°C dalam waktu 330 menit pada radiasi rata-rata 0.5 kW/m². Jumlah air yang telah dipanaskan tersebut dapat digunakan untuk melakukan pengeringan gabah sebanyak 5 kg dalam waktu 300 menit. Model matematika yang dikembangkan untuk suhu air dalam bak pada proses pemanasan memiliki nilai R² 0.98 dengan simpangan 2.86%, sedangkan R² dalam pelepasan panas air untuk pengeringan adalah 0.97 dengan APD 2.36%.

Kata kunci: pemodelan, kolektor datar, penyimpanan panas, pengeringan gabah, pemanasan air

PENDAHULUAN

Salah satu tipe pengering berenergi surya yang cukup banyak digunakan adalah pengering dengan kolektor surya pelat datar. Umumnya, kebanyakan penelitian penggunaan kolektor datar untuk pengeringan adalah kolektor yang menggunakan udara sebagai media pembawa panasnya, misalnya Zaid et al. (1999), Abene et al. (2004), Kadam et al. (2006). Hal ini dapat dimengerti karena dalam pengeringan udara merupakan media yang juga digunakan sebagai media pembawa panas ke produk dan pembawa uap air dari produk.

Selain udara, air juga dapat digunakan media pembawa panas. Bahkan, untuk maksud pengeringan air memiliki keuntungan yakni densitas dan panas jenis yang lebih besar membuat densitas energinya menjadi jauh lebih tinggi daripada udara. Sifat ini membuat air cukup berpotensi untuk dijadikan sebagai penyimpan panas. Dalam pengeringan berenergi surya, penyimpanan panas menjadi penting mengingat ketersediaan energi surya yang fluktuatif. Hazami et al. (2005) bahkan menyatakan bahwa penggunaan kolektor penyimpan bahkan dapat mereduksi biaya instalasi dan operasi sistem pemanasan surya. Selain itu, air juga memiliki sistem pengaliran yang lebih sederhana sehingga lebih mudah untuk membawa panas ke lokasi pemanfaatannya.

About-Enein et al. (2000) melakukan simulasi penggunaan pasir, granit dan air sebagai penyimpan panas yang dihasilkan kolektor surya untuk pengeringan bahan-bahan pertanian. Penggunaan material penyimpanan panas meningkatkan kinerja pemanasan udara. Jain (2004) melakukan simulasi pada pengering dengan kolektor yang dipasangkan langsung pada material penyimpan panas. Irfantoro (1992) mengembangkan rangkaian sistem pengering yang terdiri dari kolektor, tangki air dan kotak pengering. Hasil pengujian yaitu diperoleh rata-rata radiasi matahari sebesar 714.62 W/m², dengan suhu air yang masuk ke tangki penyimpan panas adalah 43.5 °C, suhu yang keluar dari tangki 38.2 °C dan yang melalui pertukaran panas antara air dengan udara pengering didapat suhu rata-rata udara dalam kotak pengering sebesar 41.4 °C. Alat yang dibuat mampu menurunkan kadar air pisang ambon dari 75 % bb menjadi 37.61 % bb dengan

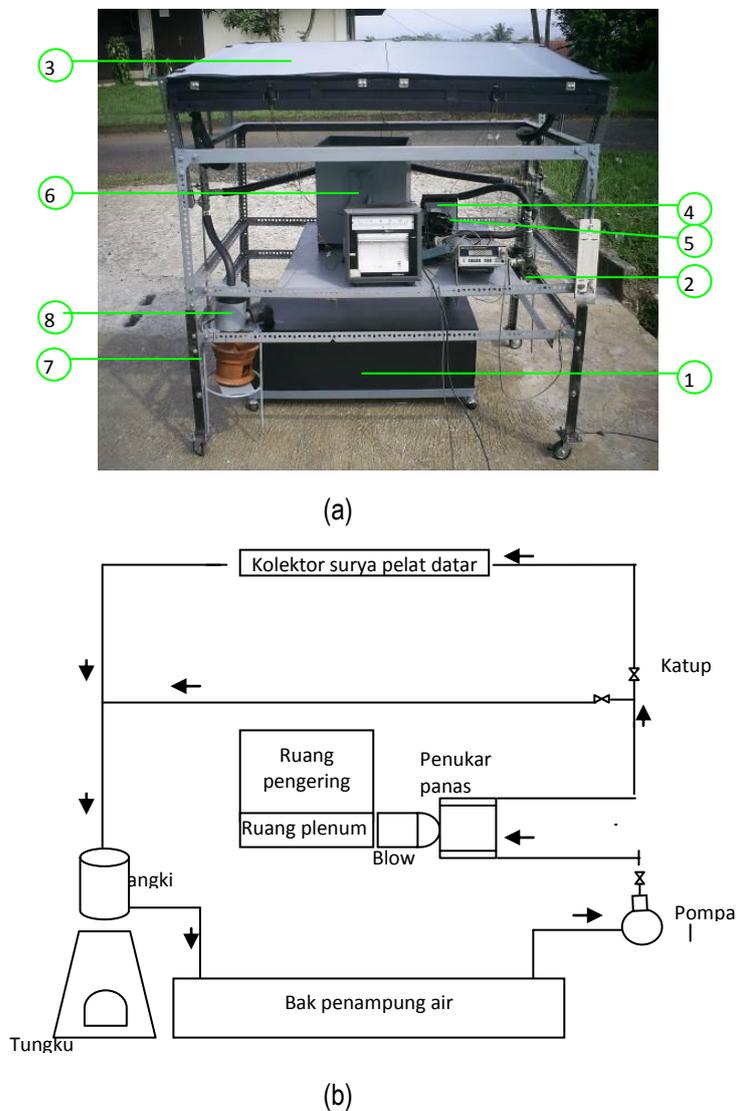
lama pengeringan 19 jam. Bal et al. (2010) menekankan bahwa air merupakan material penyimpan panas yang cukup potensial dibandingkan dengan material-material lain.

Untuk mengetahui lebih lanjut potensi penggunaan air sebagai media penyimpanan panas untuk pengeringan gabah, sebuah model fisik pengering yang terdiri dari kolektor surya, bak pengering, penukar panas, tangki pemanas dan bak penampungan air telah dibuat dalam penelitian ini. Metode simulasi merupakan metode yang cukup populer dalam melihat kinerja suatu sistem pengering. Tujuan dari penelitian ini adalah membangun model matematika yang didasarkan pada keseimbangan termal dibangun untuk mensimulasikan perubahan suhu air saat pemanasan menggunakan kolektor dan suhu air serta suhu udara pengering saat pemanfaatannya dalam proses pengeringan.

METODOLOGI

Model Pengering

Model system pengering yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Mekanisme system pengering ini adalah sebagai berikut: air ditempatkan pada bak air (1) akan menerima panas ketika dialirkan oleh pompa (2) melalui kolektor (3). Air yang telah dipanaskan tersebut selanjutnya dialirkan menuju ke penukar panas (4) dan panas akan dipindahkan ke udara yang dihembuskan oleh kipas (5) menuju ke bak pengering (6). Air dari penukar panas akan dialirkan kembali menuju bak air.



Gambar 1. Pengering surya dengan kolektor datar: (a) Foto; (b) Skema aliran

Tahap pemanasan dan pemanfaatan panas hanya dibedakan dari pengoperasian kipas. Saat pemanasan kipas tidak dioperasikan sedangkan pada saat pemanfaatan untuk pengeringan, kipas dinyalakan. Saat radiasi matahari sangat rendah, aliran air dialihkan melalui jalur pipa yang tidak melalui kolektor. Dalam makalah ini tungku (7) dan tangki pemanasan (8) tidak diuji.

Kolektor yang dirancang memiliki panjang 1.5 meter dan lebar 1 meter. Bagian utama kolektor yaitu kaca transparan yang fungsinya untuk memerangkap radiasi yang masuk ke dalam kolektor, kemudian pipa tembaga berfungsi sebagai tempat aliran air, dimana air yang mengalir mengambil panas yang diserap oleh pipa tembaga sehingga suhu air bertambah. Di bawah pipa tembaga terdapat pelat aluminium dengan ketebalan 0.5 mm berfungsi sebagai pelat *absorber*, kemudian terdapat *glasswool* dengan tebal 5 cm berfungsi sebagai insulasi untuk mengurangi kehilangan panas. Kolektor yang dirancang bisa diubah-ubah posisi sudutnya dari 0° sampai 15°, hal ini disesuaikan dengan arah penerimaan radiasi matahari.

Pemodelan keseimbangan termal

Sehubungan dengan lambatnya perubahan suhu air di kolektor, bak penampung dan penukar panas, model *unsteady state* digunakan untuk memodelkan keseimbangan termal pada kedua komponen tersebut. Keseimbangan termal pada kolektor adalah sebagai berikut :

$$(mCp)_w \frac{dT_K}{dt} = (\dot{m}Cp)_w (T_W - T_K^i) + I A_K \tau \alpha - (UA)_K (T_P - T_a) \dots \dots \dots [1]$$

T_K adalah suhu air di pipa kolektor (°C); T_W suhu air di bak (°C); T_P suhu pelat absorber (°C); T_a suhu lingkungan (°C); I radiasi surya (kW/m²); A_K luasan kolektor surya (m²); U_K koefisien pindah panas kolektor (kW/m² °C); t waktu (s); τ transmisivitas; α absorpsivitas.

Keseimbangan termal dalam bak penampungan air dinyatakan sebagai berikut :

$$(mCp)_w \frac{dT_W}{dt} = \left(\dot{m}Cp \right)_w (T_K^i - T_W^i) - (UA)_w (T_W^i - T_a) \dots \dots \dots [2]$$

U_w merupakan koefisien pindah panas bak (kW/m² °C); A_w luasan pindah panas bak penampungan air (m²)

Keseimbangan termal pada penukar panas adalah sebagai berikut :

$$(mCp)_w \frac{dT_{HE}}{dt} = \left(\dot{m}Cp \right)_w (T_W - T_{HE}^i) - (UA)_{HE} (T_{HE}^i - T_r^i) \dots \dots \dots [3]$$

T_{HE} merupakan suhu air di penukar panas (°C); T_r suhu udara di ruang *plenum* (°C); U_{HE} koefisien pindah panas penukar panas (kW/m² °C); A_{HE} luasan pindah panas penukar panas (m²).

Pada ruang plenum, sehubungan massa pada sub-sistem yang rendah maka perubahan diasumsikan terjadi secara cepat. Untuk itu, model *steady state* digunakan pada keseimbangan termal pada ruang *plenum* yang dinyatakan sebagai berikut :

$$0 = (UA)_{HE} (T_{HE} - T_r) + \left(\dot{m}Cp \right)_{ud} (T_a - T_r) \dots \dots \dots [4]$$

Persamaan-persamaan di atas diselesaikan dengan metode numerik beda hingga Euler.

Percobaan

1. Proses penyimpanan panas

Air sejumlah 100 liter dengan suhu kira-kira 25°C dimasukkan ke dalam bak dan kemudian dialirkan melalui kolektor dan dikembalikan lagi ke bak sedemikian hingga suhu air di atas 50°C. Selama proses pemanasan, termokopel tipe CC digunakan untuk mengukur suhu air di bak penampungan dan pipa sebelum dan setelah kolektor dan dicatat menggunakan rekorder titik. Pengukuran radiasi dilakukan dengan menggunakan pyranometer model MS-401.

2. Proses pengeringan

Gabah varietas Cihayang sebanyak 6 kg dimasukkan ke dalam bak pengering. Air yang telah dipanaskan pada proses sebelumnya dialirkan dari bak melalui penukar panas dan kembali menuju ke bak. Udara dialirkan melalui penukar panas oleh kipas dan dihembuskan melalui biji yang dikeringkan. Pengukuran suhu air dilakukan sama dengan cara sebelumnya sedangkan pengukuran suhu udara pengering

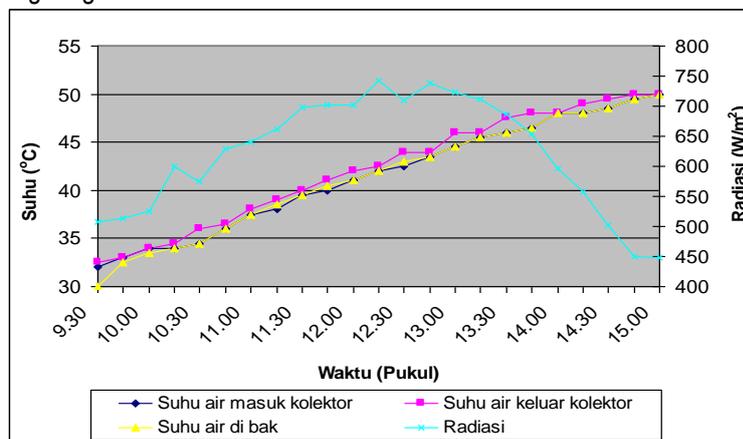
dilakukan pada plenum dari bak pengering. Kelembaban relatif pada udara pengering diukur berdasarkan suhu bola kering dan bola basah. Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer merek *Climomaster Kanomax*. Selama proses pengeringan berlangsung kadar air gabah diukur menggunakan metode oven.

HASIL DAN PEMBAHASAN

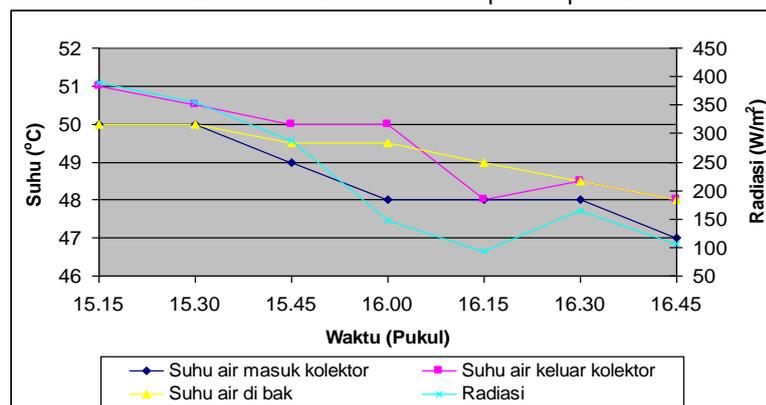
Perubahan radiasi selama pemanasan dan pengeringan awal

Gambar 2 memperlihatkan perubahan suhu air di bak, masuk dan keluar kolektor serta radiasi matahari saat proses pemanasan berlangsung. Dengan radiasi matahari rata-rata sebesar 621 W/m^2 (pukul 09.00 – 15.30) suhu air di bak meningkat dari 30°C pada awal pemanasan suhu air di bak menjadi 50°C setelah pemanasan selama 330 menit. Walaupun suhu air keluar kolektor maupun air dalam bak bergerak dalam trend yang sama, suhu air yang berasal dari kolektor sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan air dalam bak.

Dari pukul 15.15 sampai 16.45, proses pemanasan dan pengeringan terjadi bersamaan (Gambar 3), karena meskipun air di bak sudah mencapai suhu yang cukup tinggi dan sudah dapat digunakan untuk pengeringan, tetapi pada saat yang sama radiasi matahari masih memadai sehingga air masih disirkulasikan melewati pipa kolektor, oleh karena masih terjadi pemanasan air di kolektor, maka penurunan suhu air di bak pada awal proses pengeringan kecil.



Gambar 2. Perubahan suhu selama proses pemanasan



Gambar 3. Perubahan suhu selama proses pemanasan dan pengeringan awal

Validasi model keseimbangan termal

Tabel 1 memuat parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi berdasarkan model yang telah dikembangkan. Hasil simulasi untuk suhu air di bak penampungan serta data pengukurannya disajikan pada Gambar 4. Dari hasil pengukuran, perubahan suhu air di bak selama proses pemanasan yaitu dari 30 sampai 50°C , sedangkan hasil simulasi perubahannya dari 30 sampai 49.80°C . Beda suhu antara hasil pengukuran dan simulasi tidak jauh, hal ini menunjukkan bahwa model simulasi yang dibuat sudah baik, dengan nilai koefisien determinasi 0.98 dengan simpangan antara hasil simulasi dan

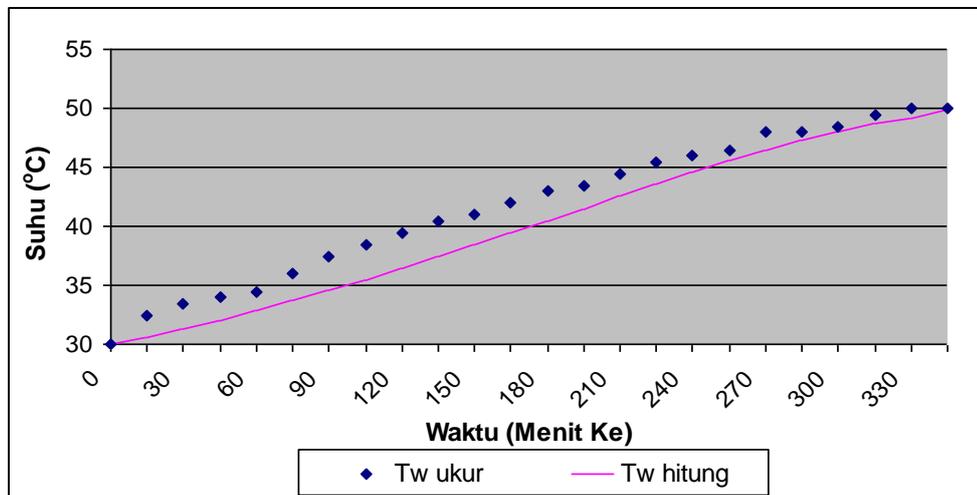
hasil pengukuran sebesar 4.46 %. Namun demikian dapat dilihat bahwa suhu hasil perhitungan lebih rendah dibandingkan hasil pengukuran terutama pada awal pemanasan.

Simulasi untuk melihat perubahan suhu selama penggunaan panas dari air dalam bak penampung untuk pengeringan dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter yang disajikan pada Tabel 2. Parameter-parameter lain yang tidak diberikan telah disajikan pada Tabel 1.

Karena pemanfaatan panas di penukar panas, walaupun radiasi surya masih cukup tinggi, suhu air di bak penampung sejak awal proses pengeringan telah menurun (Gambar 5). Pengeringan dilanjutkan terus sampai radiasi surya nol (yaitu malam hari). Suhu air di bak penampung yang terukur setelah proses pengeringan selesai adalah 40 °C, sedangkan hasil simulasi perubahannya mencapai 37.5 °C dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0.97 dan error sebesar 4.46 %.

Tabel 1. Parameter simulasi suhu air di bak pada proses pemanasan

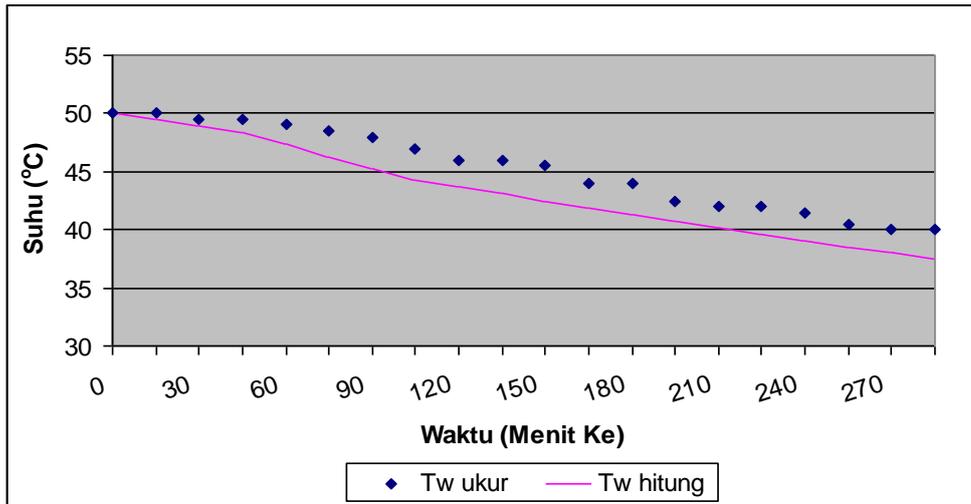
Parameter	Nilai	Satuan
Beda waktu (Δt)	900	detik
Massa air di bak (m)	100	kg
Massa air di kolektor (m)	1.683	kg
$C_{p \text{ air}}$	4.18	kJ/kg °C
$C_{p \text{ udara}}$	1	kJ/kg °C
Laju aliran massa air (\dot{m}_{air})	0.1743	kg/s
Suhu awal air di bak (T_w)	30	°C
Suhu air masuk bak (T_w^i)	30	°C
Koef PP bak (U)	0.0005	kW/m ² °C
Luasan PP bak (A_b)	1.62	m ²
Luasan kolektor (A_k)	1.5	m ²
Koef PP kolektor (U_L)	0.004	kW/m ² °C
Transmisivitas	0.9	-
Absorbsivitas	0.9	-



Gambar 4. Perbandingan perubahan suhu air di bak hasil pengukuran dan simulasi

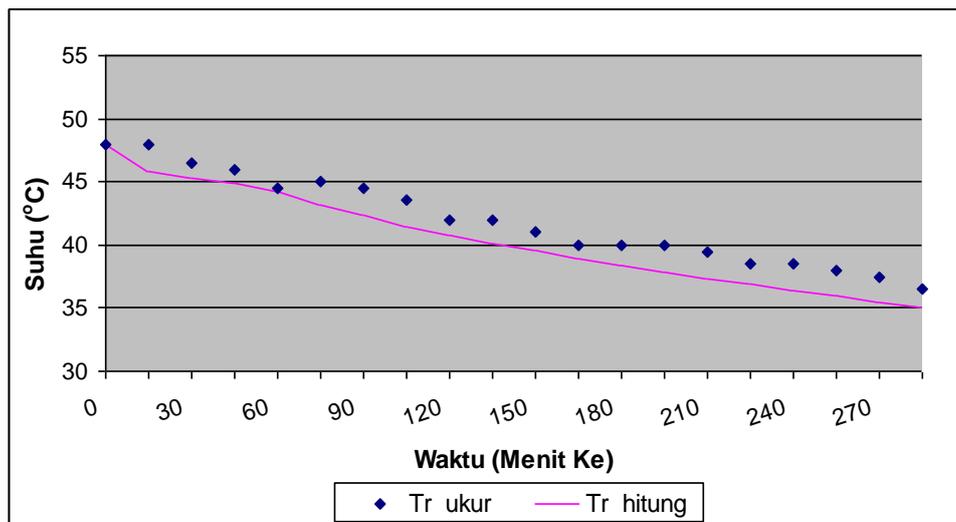
Tabel 2. Parameter simulasi suhu pada pemanfaatan panas untuk pengeringan

Parameter	Nilai	Satuan
Massa air di HE (m)	0.13385	kg
Laju aliran massa udara (\dot{m}_{udara})	0.0267	kg/s
Suhu awal air di bak (T_w)	50	°C
Suhu awal air di HE (T_{HE})	50	°C
Suhu awal ruang plenum (T_r)	48	°C
Koef PP HE (U)	0.2	kW/m ² °C
Luasan PP HE (A)	0.51312	m ²



Gambar 5. Perbandingan perubahan suhu air di bak hasil pengukuran dan simulasi pada pemanfaatan panas untuk pengeringan

Persamaan pemodelan untuk menentukan suhu udara ruang *plenum*, dibuat dalam bentuk *steady state*, yang mana nilainya tidak berubah tergantung waktu. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa karena massa udara jauh lebih rendah maka suhu udara di ruang *plenum* lebih cepat mencapai keseimbangan baru. Gambar 6 memperlihatkan perubahan suhu udara pengeringan terhadap waktu.



Gambar 6. Perbandingan perubahan suhu udara ruang *plenum* hasil pengukuran dan simulasi pada pemanfaatan panas untuk pengeringan

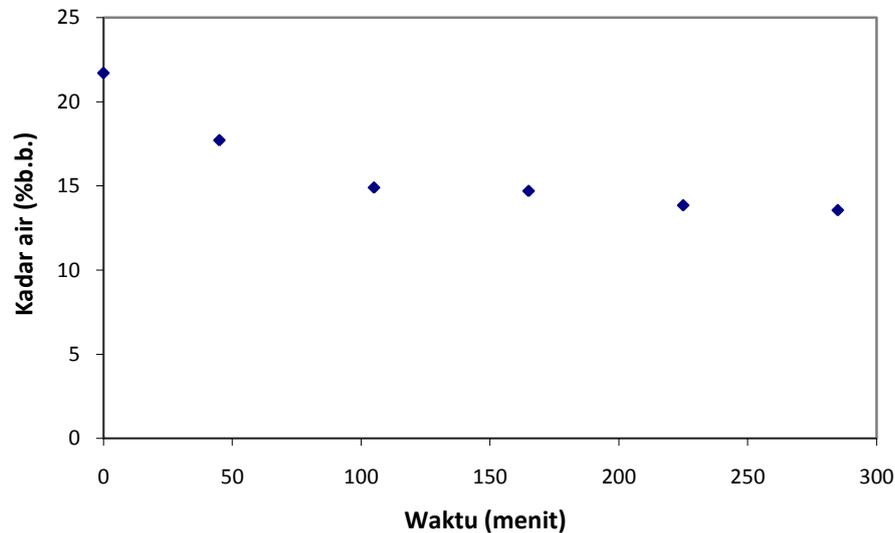
Dari hasil pengukuran, perubahan suhu udara ruang *plenum* selama proses pengeringan yaitu dari 48 °C sampai 36.5 °C, sedangkan hasil simulasi perubahannya dari 48 °C sampai 35.10 °C. Beda suhu antara hasil pengukuran dan simulasi tidak berbeda jauh, hal ini menunjukkan bahwa model simulasi yang dibuat sudah baik, sehingga hasil perhitungannya dapat mendekati hasil pengukuran langsung. Hal ini diperkuat dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0.98 dan error sebesar 3.80 %.

Suhu udara di ruang *plenum* dipengaruhi oleh suhu air di bak penampungan, penurunan suhu air di bak akan diikuti penurunan suhu udara ruang *plenum*. Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa pada awal proses pengeringan berlangsung, penurunan suhu ruang *plenum* lebih kecil, karena pada saat yang sama, air dalam bak masih dipanaskan melalui kolektor. Setelah 90 menit proses pengeringan berlangsung, air dalam bak sudah tidak lagi dipanaskan. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi suhu air di penukar panas dan juga suhu udara di ruang *plenum*, pemakaian air yang terus menerus untuk proses pengeringan dan sudah tidak dipanaskannya lagi air tersebut, menyebabkan suhu air dalam bak menurun, yang berpengaruh pada suhu

udara di ruang *plenum* ikut menurun, karena panas dari air yang bisa diambil di penukar panas sudah berkurang juga.

3. Penurunan kadar air dan konsumsi panas spesifik

Gambar 7 memperlihatkan perubahan kadar air selama proses pengeringan. Pengeringan dari kadar air awal 21.7% b.b. berlangsung kurang dari 5 jam untuk mencapai kadar air di bawah 14%. Waktu pengeringan seperti ini cukup memadai untuk gabah.



Gambar 7. Perubahan kadar air selama pengeringan

Tabel 3 memperlihatkan parameter-parameter terkait dengan konsumsi panas spesifik. Disini, definisi konsumsi energi yang digunakan adalah energi yang diperoleh dari air panas ditambah dengan radiasi surya saat pengeringan berlangsung atau dinyatakan sebagai:

$$KEPS = \frac{Q_w + I_{tot}}{m_w} \dots\dots\dots [5]$$

Nilai KEPS sistem pengering tersebut pada percobaan ini adalah 11.85 MJ/kg air yang diuapkan. Nilai konsumsi ini masih sangat besar apabila dibandingkan rata-rata sistem pengeringan gabah pada umumnya. Jumlah gabah yang dikeringkan yang terlalu sedikit nampaknya membuat nilai ini menjadi rendah. Untuk itu peningkatan jumlah beban nampaknya masih memungkinkan sehingga KEPS dapat diturunkan. Selain itu, suhu air akhir dalam bak adalah 40°C masih jauh di atas suhu lingkungan, yang berarti air masih berpotensi untuk menyuplai energi ke udara pengering.

Tabel 3. Parameter yang berkaitan dengan konsumsi energi dari sistem pengering

No.	Parameter	Nilai
1.	Massa awal bahan (kg) (m_o)	5
2.	Kadar air awal (% bb)	21.7
3.	Kadar air akhir (% bb)	13.6
4.	Lama pengeringan (t) (jam)	5
5.	Suhu air di bak awal pengeringan (°C) (T_{wo})	50
6.	Suhu air di bak akhir pengeringan (°C) (T_{wa})	40
7.	Suhu rata-rata ruang <i>plenum</i> (°C) (T_r)	41.9
8.	Suhu rata-rata lingkungan (°C) (T_a)	31.5
9.	Massa air yang diuapkan (kg)	0.47
10.	Energi yang diperoleh dari air panas (MJ) (Q_w)	4.18
11.	Radiasi surya total selama proses pengeringan berlangsung (MJ) (I_h)	1.39
12.	Konsumsi energi panas spesifik (MJ/kg air yang diuapkan) (KEPS)	11.85

KESIMPULAN

Dengan massa air 100 kg, sistem pengering yang dirancang terdiri dari lima bagian utama, yaitu kolektor, penukar panas, kotak pengering, bak penampung air telah dapat menyimpan panas dari radiasi surya untuk kemudian digunakan dalam pengeringan gabah sebanyak 5 kg dari kadar air awal 21% b.b. menjadi 13.7% b.b dalam waktu 300 menit pada saat tidak ada radiasi surya untuk lebih dari 70% waktu pengeringannya. Konsumsi energi panas spesifik untuk pengeringan adalah 11.85 MJ/kg air yang diuapkan. Nilai tersebut masih berpotensi untuk diturunkan.

Model matematik yang dikembangkan telah dapat mengikuti hasil pengukuran. Untuk proses pemanasan, model memiliki koefisien determinasi 0.98 dengan simpangan antara suhu air dalam bak hasil simulasi dan hasil pengukuran sebesar 4.46 %. Untuk proses pengeringan, model dapat menduga suhu air dalam bak sebesar dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0.97 dan error sebesar 4.46 % dan suhu udara pengering dengan koefisien determinasi sebesar 0.98 dan error sebesar 3.80 %.

DAFTAR PUSTAKA

- Abene A., V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued. Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering* 65 (2004) 15–22.
- Aboul-Enein, S., A.A. El-Sebaei, M.R.I. Ramadan, H.G. El-Gohary. Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renewable Energy* 21 (2000) p.p. 505-522.
- Ahmed-Zaid, A., H. Messaoudi, A. Abenne, M. Le Ray, J.Y. Desmons and B. Abed. Experimental Study of Thermal Performance Improvement of A Solar Air Flat Plate Collector through the Use of Obstacles: Application for the Drying of Yellow Onion. *Int. J. Energy Res.*, 23, 1083-1099 (1999)
- Hazamia M., S. Koolia, M. Lazaara, A. Farhata, A. Belghithb. Performance of a solar storage collector. *Desalination* 183 (2005) p.p. 167–172
- Irfantoro. 1992. Uji Penampilan Kolektor Pelat Datar dengan Media Penyimpan Air untuk Pengeringan Selai Pisang. Skripsi, Fateta, IPB.Bogor.
- Kadam, D. M., D.V.K. Samuel. Convective Flat-plate Solar Heat Collector for Cauliflower Drying. *Biosystems Engineering* (2006) 93 (2), 189–198
- Lalit M. Bal, Santosh Satya, S.N. Naik. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) p.p. 2298–2314