

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

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

Vol. 4, No. 2, Oktober 2016



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) merupakan publikasi resmi Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA). 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. Sehubungan dengan banyaknya naskah yang diterima redaksi, maka sejak edisi volume 4 No. 1 tahun 2016 redaksi telah meningkatkan jumlah naskah dari 10 naskah menjadi 15 naskah untuk setiap nomor penerbitan, tentunya 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, energy 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 (Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang B. Seminar (Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Universitas Sriwijaya, Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta)
Y. Aris Purwanto (Institut Pertanian Bogor)
M. Faiz Syuaib (Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Universitas Hasanuddin, Makasar)
Anom S. Wijaya (Universitas Udayana, Denpasar)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Lenny Saulia
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah
Anggota : Usman Ahmad
Dyah Wulandani
Satyanto K. Saptomo
Slamet Widodo
Liyantono
Sekretaris : Diana Nursolehat

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, Darmaga, 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. 4 No. 2 Oktober 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Thamrin Latief, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Ade M. Kramadibrata, (Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwanto, MS (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Tineke Madang, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Budi Indra Setiawan (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Siswoyo Soekarno, M.Eng (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya), Dr.Ir. Nugroho Triwaskito, MP (Prodi. Ilmu dan Teknologi Pangan, Universitas Muhammadiyah Malang), Dr.Ir. Lady Corrie Ch Emma Lengkey, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Andasuryani, S.TP, M.Si. (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Yazid Ismi Intara, SP.,M.Si. (Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman), Dr. Ir. Supratomo, DEA (Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr. Suhardi, STP.,MP (Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin), Dr.Ir. Desrial, M.Eng (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. Lilik Pujantoro, M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Wayan Budiastira, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Dyah Wulandani, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Leopold O. Nelwan, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Gatot Pramuhadi, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Sugiarto (Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Chusnul Arief, STP., MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Yudi Chadirin, STP.,M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Analisis Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap untuk Pengeringan Gabah

The Analysis of Vapor Compression Heat Pump System for Rough Rice Drying

Damawidjaya Biksono, Mahasiswa S3 PS Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pascasarjana, IPB.
Email: damawidjaya@yahoo.com

Leopold Oscar Nelwan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian,
Institut Pertanian Bogor. Email: lonelwan@yahoo.com

Tineke Mandang, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian,
Institut Pertanian Bogor. Email: tineke_mandang_2003@yahoo.com

Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian,
Institut Pertanian Bogor. Email: dwulandani@yahoo.com

Yogi Sirodz Gaos. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Ibnu Khaldun (UIKA) Bogor.

Abstract

As a drying system, heat pump drying with appropriate configuration is potential to save energy. The objective of this research was to develop vapor compression heat pump system for rough rice drying and to obtain low energy consumption from several system configurations. Therefore, the model of vapor compression heat pump system was designed in which its configuration was modifiable. The result showed that the ratio of specific moisture extraction rate which calculated mechanic and thermal consumption ($SMER_{Tot}$) upon resistive heating dryer for those several configurations was 159 – 329%. The open cycle heat pump drying method with intermittent operation produced the highest specific moisture extraction rate which only calculated thermal energy ($SMER_T$) and $SMER_{Tot}$ at 7.06 and 5.06 kg/kWh, respectively. Intermittent operation did not much influence drying rate but significantly reduced energy consumption. Ambient air inlet which placed before evaporator and condenser on a closed cycle could produce different $SMER_{Tot}$ i.e. 4.01 dan 3.07 kg/kWh respectively. The utilization of ambient air through forced convection in heat exchanger could increase $SMER_{Tot}$, while the utilization of air flow the dryer from outlet could reduce $SMER_{Tot}$.

Keywords: *rough rice drying, vapor compression heat pump system, specific moisture extraction rate (SMER)*

Abstrak

Pengeringan *heat pump* merupakan sistem pengeringan yang berpotensi menghemat energi terutama apabila konfigurasinya sesuai. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU) untuk pengeringan gabah dan mendapatkan konsumsi energi yang rendah dari berbagai konfigurasi sistem. Untuk itu pada penelitian ini didesain sebuah model sistem pengering *heat pump* yang konfigurasinya dapat diubah-ubah untuk pengeringan gabah. Hasil percobaan memperlihatkan bahwa rasio peningkatan *specific moisture extraction rate* yang memperhitungkan konsumsi energi mekanik dan termal ($SMER_{Tot}$) terhadap pengering pemanas resistif untuk berbagai konfigurasi tersebut adalah 159 – 329%. Metode pengeringan *heat pump* siklus terbuka dengan pengoperasian HPKU yang *intermittent* memberikan *specific moisture extraction rate* yang hanya memperhitungkan konsumsi energi termal ($SMER_T$) dan $SMER_{Tot}$ yang paling tinggi yaitu masing-masing 7.06 dan 5.06 kg/kWh. Pengoperasian *intermittent* tidak banyak mempengaruhi laju pengeringan, tetapi secara nyata menurunkan konsumsi energi. Penempatan inlet udara lingkungan sebelum evaporator dan sebelum kondensor pada siklus tertutup memberikan $SMER_{Tot}$ yang berbeda yaitu 4.01 dan 3.07 kg/kWh. Penggunaan udara lingkungan dengan menggunakan konveksi paksa melalui penukar panas dapat meningkatkan $SMER_{Tot}$, sedangkan penggunaan aliran udara dari keluaran pengering dapat menurunkan nilai $SMER_{Tot}$.

Kata kunci: Pengeringan gabah, sistem *heat pump* kompresi uap, *specific moisture extraction rate (SMER)*

Diterima: 14 Maret 2016; Disetujui: 12 Mei 2016

Latar Belakang

Pengeringan adalah penurunan kadar air bahan sampai batas tertentu yang diinginkan atau aman sehingga batas tersebut bebas dari serangan mikroba, enzim dan insekta yang merusak (Henderson dan Perry 1982). Secara lebih luas pengeringan merupakan proses yang terjadi secara serempak antara perpindahan panas dari udara pengering ke massa uap air dari bahan yang dikeringkan (Hall 1970, Brooker *et al.* 1981). Mekanisasi pada pengeringan padi relatif tertinggal dibandingkan dengan tahapan pascapanen diantaranya mesin penggilingan. Hal tersebut disebabkan oleh mahalnnya biaya pengeringan artifisial gabah yang terutama disebabkan oleh biaya energinya, sedangkan nilai tambah yang diberikan oleh pengering ditinjau dari sisi kecepatan pengolahannya tidak terlalu besar, sehingga opsi penjemuran masih menjadi pilihan utama karena biaya operasional yang relatif murah.

Sistem HPKU diharapkan dapat mengatasi permasalahan utama tersebut, karena sistem ini mendapatkan panas yang diserap dari suhu lingkungan. Selain digunakan untuk meningkatkan kuantitas panas (dibandingkan input panasnya) sistem HPKU memiliki kemampuan *dehumidifikasi* udara yang digunakan untuk pengeringan. Umumnya pengeringan dengan sistem HPKU mengkonsumsi energi yang lebih hemat dibandingkan pengering konvensional (Aveces-Sabiro 1992, Harchegani *et al.* 2012), walaupun ada juga penelitian lain yang memperlihatkan peningkatan konsumsi energi sehubungan dengan waktu yang terlalu lama (Pal *et al.* 2010). Akan tetapi sehubungan dengan suhu yang relatif rendah maka kompensasi yang diperoleh adalah kualitas pengeringan yang lebih baik (Goh *et al.* 2011). Rossi *et al.* (1992) membuat pengeringan sayuran dengan pengeringan *heat pump* dan pengeringan konvensional menggunakan heater listrik dan dapat penghemat energi 40% dan waktu proses. Mellmann and Furl, (2008) melaporkan hasil penelitiannya dengan penghematan energi dari 30% sampai dengan 50% dari biaya produk. Pengeringan dengan sistem HPKU untuk mengeringkan gabah memiliki potensi untuk digunakan secara lebih efisien, dan umumnya dilakukan pada suhu yang lebih rendah dari pengeringan konvensional sehingga dapat mempertahankan kualitas.

Siklus dalam pengoperasian HPKU secara umum mencakup siklus resirkulasi dan terbuka. Pada siklus resirkulasi, sebagian energi yang berasal dari pengering dimanfaatkan kembali sedangkan pada siklus terbuka pemanasan hanya mengandalkan suhu dari lingkungan. Zigler *et al.* (2009) melakukan penelitian pengeringan tanaman obat dan rempah-rempah dengan menggunakan pengeringan *batch* yang ditambah dengan sistem *heat pump*, dimana pengeringan *heat pump*

dengan sistem siklus resirkulasi dilanjutkan dengan pengeringan konvensional dan melaporkan hasil penelitian tahap awal dengan konsumsi energi primer dapat dikurangi 40% sampai dengan 55% dengan menggunakan sistem *heat pump*. Aceves-Saborio (1993) menyatakan walaupun pada umumnya konsumsi energi sistem siklus resirkulasi lebih rendah, tidak ada jaminan apakah siklus resirkulasi ini menguntungkan. Ketergantungan pada kondisi udara lingkungan menyebabkan kondisi yang demikian.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan pengeringan gabah dengan sistem HPKU untuk mendapatkan konsumsi energi yang paling rendah permassa air yang diupayakan dari berbagai konfigurasi sistem HPKU yang mencakup penggunaan penukar panas dengan udara lingkungan atau udara ekshaus pada pengoperasian siklus terbuka dan resirkulasi serta membandingkannya dengan pengeringan gabah konvensional yang menggunakan pemanas resistif.

Bahan dan Metode

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Desember 2014 sampai Oktober 2015. Percobaan dilakukan di Laboratorium Teknik Energi Terbarukan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB Bogor.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gabah varietas Ciherang dengan kadar air 22 – 24% b.b. dan alat ukur yang digunakan termokopel tipe T, *pressure gauge*, rotameter, multimeter CD 800a, moisture tester, clamp meter, power analyzer Lutron DW-6091, timbangan digital, oven, anemometer Kanomax, climd master model A 541, recorder Yokogawa type MV-1000 dan type MV-2000. Dimana kalibrasi suhu termokopel dilakukan dengan menggunakan thermometer glass standart untuk suhu rendah dan suhu tinggi dengan *Oil bath*.

Model Pengering dengan Sistem HPKU

Gambar 1 memperlihatkan skema desain dari sistem pengering HPKU yang dilengkapi dengan penukar panas dengan udara lingkungan atau udara ekshaus (HE) dengan pengoperasian siklus terbuka dan siklus resirkulasi. Pada siklus terbuka katup gate (A) dan (B) ditutup dan katup gate (C) dan (D) dibuka, dimana udara lingkungan masuk ke sistem HPKU mengalir ke pengering dan ke luar lingkungan. Pada siklus resirkulasi aliran udara bersirkulasi dari sistem HPKU ke pengering dengan katup gate (B) dibuka, dan katup gate (A) atau (D) dibuka sesuai dengan konfigurasi yang diinginkan yaitu udara lingkungan masuk sebelum kondensor atau evaporator dan katup gate (C) dibuka untuk

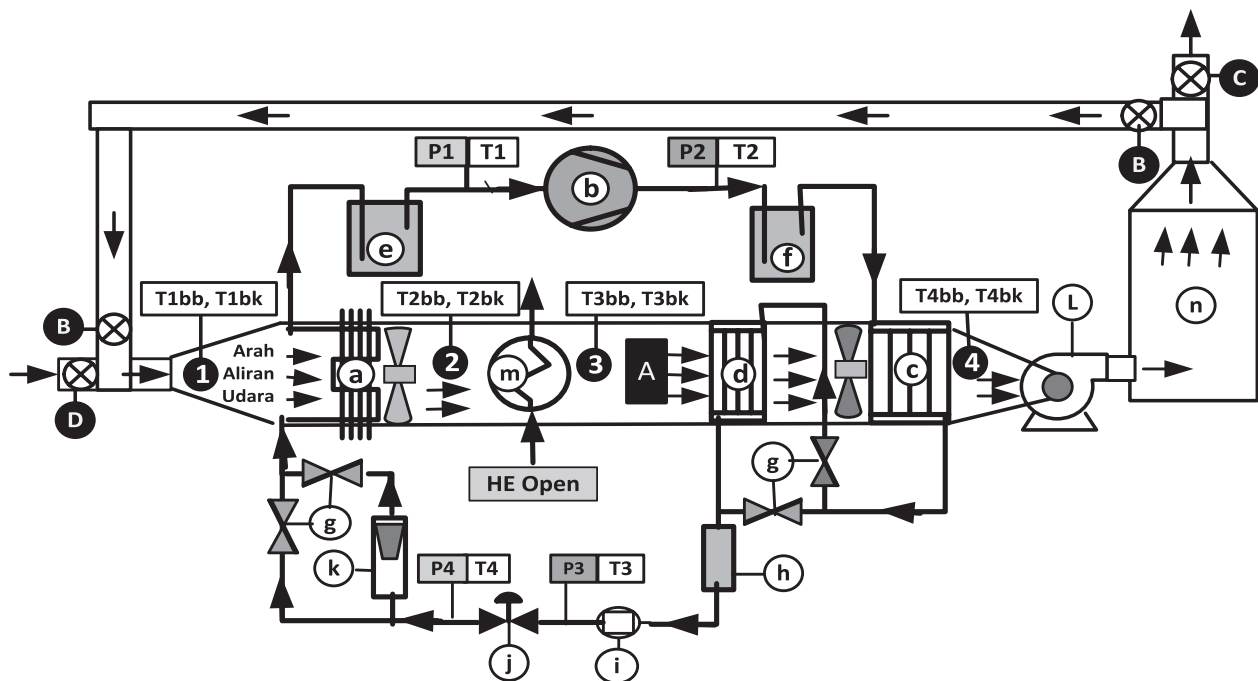
membuang udara dalam jumlah yang sama dengan yang masuk. Dan untuk menghindari masuknya cairan refrigerant ke dalam kompresor maka digunakan receiver sebelum kompresor.

Saluran udara dari sistem pengering tersebut dibuat berbentuk segi empat ukuran (30 x 30) cm bahan plat baja 0.6 mm memudahkan pembentukan konstruksi dan diinsulasi *polyurethane foam* 5 mm untuk meminimalkan kontak dengan udara luar. Saluran udara HPKU ke ruang pengering bagian tengah sistem antara evaporator dan kondensor dipasang HE yang tujuannya mempercepat pindah panas udara dari lingkungan model sistem HPKU sistem terbuka dan resirkulasi. Sirkulasi udara dari ruang pengering ke sistem HPKU menggunakan pipa PVC ukuran 4 inchi dengan panjang 350 cm, pengering model silinder dengan diameter 82 cm, tinggi 90 cm, jarak bagian plenum atas dan bawah 23 cm.

Gambar 1 memperlihatkan pengukuran suhu sistem HPKU dilakukan pada titik aliran udara masuk (1) dan keluar (2) evaporator, masuk (2) dan keluar (3) *heat exchanger*, masuk (3) dan keluar (4) kondensor. Pengukuran suhu plenum dilakukan pada bagian bawah, tengah dan atas. Pengukuran suhu bola basah dan bola kering di sistem HPKU dan pengering dilakukan untuk mengetahui kelembaban relatif dan data suhu yang terekam di recorder setiap 10 menit selama kira-kira 12 jam.

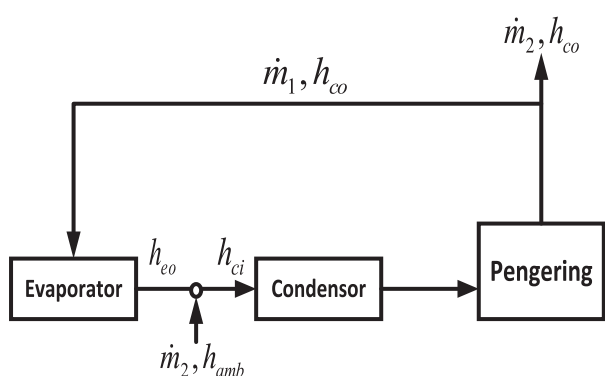
Neraca Energi pada Pengeringan Heat Pump Kompresi Uap dengan Sistem Resirkulasi

HPKU untuk pengeringan pada sirkulasi sistem resirkulasi murni harus menggunakan kondensor eksternal untuk membuang kelebihan panas sedemikian hingga HPKU dapat bekerja dengan stabil. Pada penelitian ini HPKU tidak dilengkapi kondensor eksternal, sehingga untuk

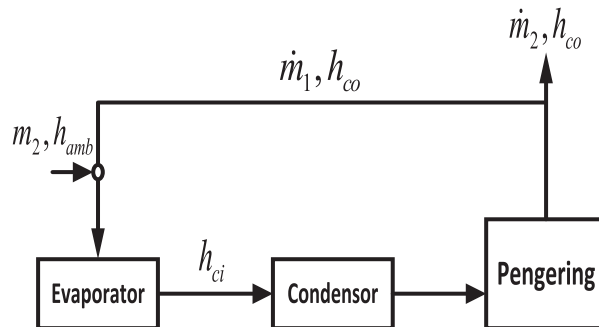


Gambar 1. Skematik sistem *heat pump* kompresi uap dengan pengering sistem terbuka dan resirkulasi.

Keterangan Gambar 1 : a. Evaporator, b. Kompresor, c & d. Condensor, e. Receiver, f. Suction Accumulator, g. Hand Valve, h. Filter Dryer, i. Sight Glass (Glas penduga), j. Katup TXV, k. Rota meter, l. Blower, m. Heat Exchanger, n. Ruang pengering, P. Pressure Gauge, T. Thermocouple, Temperatur bola basah (T_{bb} .) dan Temperatur bola kering (T_{bk} .).



Gambar 2. Skematik HPKu sistem resirkulasi udara masuk sebelum kondensor.



Gambar 3. Skematik HPKu sistem resirkulasi udara masuk sebelum evaporator.

Tabel 1. Konfigurasi sistem pengering yang diuji.

Percobaan	Konfigurasi Pengeringan
1	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, HE tertutup.
2	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, HE udara lingkungan konveksi bebas.
3	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, HE udara keluar dari ruang pengering
4	Siklus udara pengeringan sistem resirkulasi, inlet udara dari condensor rasio bukaan udara 1/2, HE udara lingkungan konveksi bebas.
5	Siklus udara pengeringan sistem resirkulasi, inlet udara dari condensor rasio bukaan udara 2/3, HE udara lingkungan konveksi bebas.
6	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, pengoperasian HPKu <i>intermittent</i> dan blower dihidupkan kontinu, HE udara lingkungan konveksi bebas.
7	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, HE udara lingkungan menggunakan blower.
8	Siklus udara pengeringan sistem resirkulasi, inlet udara dari evaporator rasio bukaan udara 1/2, HE udara lingkungan konveksi bebas.
9	Siklus udara pengeringan sistem terbuka, pengoperasian <i>intermittent</i> baik HPKu dan blower dengan sirkulasi, HE udara lingkungan konveksi bebas.
10	Pengeringan dengan sistem pemanas resistif.

pengoperasian sistem resirkulasi sebagian udara dari lingkungan harus dialirkan melalui komponen HPKU dengan jumlah udara pengeringan harus dibuang yang sama besar. Udara lingkungan dapat dialirkan melalui inlet sebelum kondensor atau sebelum evaporator yang secara skematik masing-masing ditunjukkan oleh Gambar 2 dan 3.

Neraca energi untuk sistem HPKU adalah:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_e + \dot{W} \quad (1)$$

Keterangan :

\dot{Q}_c = Laju pindah panas kondensor (kW)

\dot{Q}_e = Laju pindah panas evaporator (kW)

\dot{W} = Kerja kompresor (kW)

Oleh karena itu, jika seluruh panas dari/ke kondensor atau evaporator mengalir dari/ke udara di dalam sistem heat pump maka persamaan neraca untuk sistem Gambar 2 adalah:

$$(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)h_{co} - (\dot{m}_1 h_{eo} + \dot{m}_2 h_{amb}) = \dot{m}_1 (h_{co} - h_{eo}) + \dot{W} \quad (2)$$

Atau

$$\dot{m}_2 (h_{co} - h_{amb}) = \dot{W} \quad (3)$$

Keterangan :

\dot{m}_1 = Laju aliran udara masuk evaporator (kg/s)

\dot{m}_2 = Laju aliran udara lingkungan masuk kondensor dan evaporator (kg/s)

h_{ci} = Entalpi udara masuk kondensor (kJ/kg)

h_{co} = Entalpi udara keluar kondensor (kJ/kg)

h_{ei} = Entalpi udara masuk evaporator (kJ/kg)

h_{eo} = Entalpi udara keluar evaporator (kJ/kg)

h_{amb} = Entalpi udara lingkungan (kJ/kg)

Sedangkan persamaan neraca untuk sistem Gambar 3 adalah:

$$(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_{co} - h_{ci}) = (\dot{m}_1 h_{co} + \dot{m}_2 h_{amb}) - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)h_{ci} + \dot{W} \quad (4)$$

Atau:

$$\dot{m}_2 (h_{co} - h_{amb}) = \dot{W} \quad (5)$$

Sehingga secara neraca energi, kedua skema ini dapat diterapkan.

Percobaan Pengering Sistem Heat Pump Kompresi Uap

Pengeringan gabah dengan sistem HPKU dilakukan dengan 9 model konfigurasi dan satu model perlakuan dengan sistem pemanas resistif sebagai pembanding, antara lain sebagai berikut :

Percobaan Model Pengering dengan Pemanas Resistif

Gambar 4 menunjukkan udara lingkungan disalurkan ke ruang pengering menggunakan saluran udara yang dipasang menyatu dengan ruang pengering dibuat pendek untuk mengurangi kehilangan panas akan tetapi tidak mengganggu penyebaran udara ke ruang pengering. Ukuran diameter saluran di bagian depan saluran sesuai dengan lubang keluaran udara dari blower dan diinsulasi untuk mengurangi kehilangan panas saluran udara melalui pemanas resistif dengan daya 2 kW, suhu pengering diatur otomatis menggunakan termostat suhu antara 40°C–45°C, sedangkan pengukuran konsumsi energi listrik dengan menggunakan power analyzer, clamp meter dan multimeter.

Perhitungan *Specific Moisture Extraction Rate* (SMER) dan Penentuan Laju Pengeringan

Nilai SMER merupakan rasio jumlah massa air yang diuapkan dari bahan terhadap energi listrik yang digunakan (kg/kWh). Nilai SMER dapat dinyatakan dalam dua ekspresi, yaitu untuk konsumsi energi listrik yang hanya digunakan untuk maksud pemanasan:

$$SMER_T = \frac{W_{air}}{E_T} \quad (6)$$

Keterangan :

$SMER_T$ = *Specific Moisture Extraction Rate* termal (kg/kWh)

W_{air} = Jumlah massa air yang diuapkan (kg)

E_T = Energi yang digunakan sistem HPKU (kWh)

dan untuk konsumsi energi listrik yang digunakan untuk total energi yaitu untuk pemanasan dan mekanik (blower), yaitu :

$$SMER_{Tot} = \frac{W_{air}}{E_{Tot}} \quad (7)$$

Keterangan :

$SMER_{Tot}$ = *Specific Moisture Extraction Rate* total (kg/kWh)

E_{Tot} = Energi yang digunakan sistem HPKU dan Blower (kWh)

Jumlah air yang diuapkan dihitung dari:

$$W_{air} = \left(1 - \frac{100 - m_f}{100 - m_i} \right) \times W_i \quad (8)$$

Keterangan :

m_f = Kadar air awal (% b.b.)

m_i = Kadar air akhir (% b.b.)

W_i = Berat bahan (kg)

Laju pengeringan dalam (kg/s) dinyatakan sebagai:

$$\dot{W}_{air} = \frac{W_{air}}{\Delta t} \quad (9)$$

Keterangan :

\dot{W}_{air} = Laju pengeringan (kg/s)

Δt = Waktu pengeringan (jam)

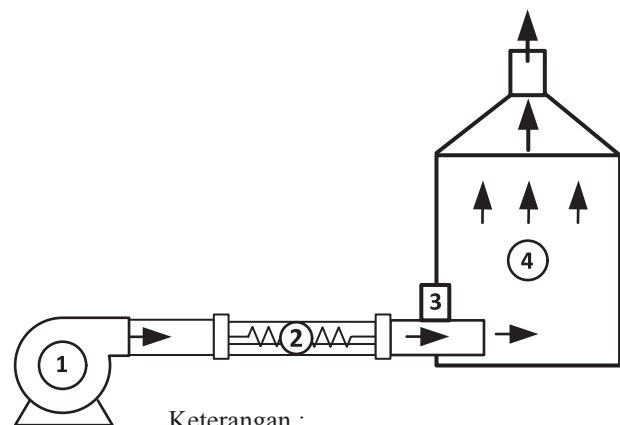
Hasil dan Pembahasan

Konsumsi Energi untuk Setiap Konfigurasi

Hasil pengukuran konsumsi energi dan rasio energi terhadap pengeringan dengan pemanas resistif serta $SMER_T$ dan $SMER_{Tot}$ untuk masing-masing metode pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2. Pengeringan dilakukan pada kadar air awal rata-rata 24% b.b. dan kadar air

akhir rata-rata 13.36 - 14.34% b.b. Laju aliran udara pengering yang digunakan adalah 0.125 kg/s serta massa gabah yang dikeringkan sebanyak 150 kg per konfigurasi pengujian pada tebal tumpukan gabah 0.6 m. Waktu pengeringan yang dibutuhkan untuk keseluruhan konfigurasi relatif sama yaitu antara 11–12 jam. Penurunan kadar air yang paling cepat dari 9 konfigurasi yang dilakukan adalah pada konfigurasi II yaitu merupakan pengeringan siklus terbuka dengan HE yang menggunakan konveksi bebas udara lingkungan dengan waktu 11 jam.

Pada sistem HPKU nilai $SMER_T$ diperoleh 3.39–7.06 kg/kWh dan $SMER_{Tot}$ berkisar 2.45–5.06 kg/kWh. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan hasil percobaan dari (Harchegani *et al.* 2012) pada pengeringan gabah dimana nilai SMER 0.1 kg/kWh. Kemungkinan penyebab rendahnya SMER pada percobaan tersebut mungkin disebabkan oleh jumlah massa gabah yang jauh lebih rendah, namun pada makalah tersebut tidak dijelaskan berapa jumlah massa gabah yang dikeringkan. Bahkan pada produk lain dengan kadar air yang lebih tinggi seperti kayu dan pisang (Prasertan dan Sean-saby 1998) memperoleh SMER dalam kisaran 0.34–0.57 kg/kWh. Penghematan energi yang cukup signifikan pada penelitian ini kemungkinan justru disebabkan oleh pengoperasian HPKU yang tidak kontinu akibat terjadinya kondisi *over-pressure* pada kompresor HPKU. Dengan blower yang secara kontinu beroperasi, tumpukan gabah tetap dialiri oleh udara lingkungan yang pada percobaan ini memiliki rata-rata suhu dari 30.4 – 31.9°C dengan RH 63 – 68%. Oleh karena itu, ketika kompresor tak beroperasi untuk beberapa saat, penurunan kadar air masih berlangsung dengan cukup baik. Bahkan pada pengeringan dengan pemanasan resistif dengan suhu dan kelembaban udara lingkungan yang demikian masih memiliki $SMER_{Tot}$ yang cukup tinggi yaitu sebesar 1.54 kg/kWh.



Gambar 4. Skematik sistem pengeringan dengan pemanas resistif.

Tabel 2. Konsumsi dan rasio energi terhadap pengeringan dengan pemanas resistif serta $SMER_T$ dan $SMER_{Tot}$ untuk masing-masing pengujian.

Per coba an	Waktu Operasi (menit)	Konsumsi energi (kWh)		Rasio energi terhadap pengering (%)		SMER (kg/kWh)		Rasio SMER terhadap pengering pemanas resistif (%)		Rata-rata kadar air (% b.b.)		Waktu pe ngering an (jam)	Laju pe ngering an (kg/s)	Kelembaban relatif (RH) (%)		Suhu ling kungan (°C)
		Termal	Total	Termal	Total	Termal ($SMER_T$)	Total ($SMER_{Tot}$)	Termal	Total	Awal	Akhir			Plenum	Ling kungan	
I	337	3.27	4.88	36.82	46.67	5.14	3.45	283.89	244.00	23.36	13.68	12	0.389	40.05	63.82	31.30
II	341	3.81	5.44	42.92	52.04	4.73	3.31	260.95	215.21	24.35	14.02	11	0.445	43.33	63.78	30.44
III	323	3.99	5.54	44.96	52.96	3.39	2.45	187.15	158.90	22.70	14.34	12	0.313	44.05	63.07	30.91
IV	324	4.07	5.61	45.78	53.67	4.23	3.07	233.66	199.27	23.38	13.45	12	0.398	45.91	65.77	31.85
V	439	3.88	5.97	43.70	57.13	3.78	2.46	208.64	159.58	22.42	14.01	12	0.340	35.40	68.33	31.37
VI	240	2.92	4.06	32.82	38.86	7.06	5.06	389.53	328.97	25.44	13.59	12	0.476	36.05	65.40	31.72
VII	275	3.22	4.53	36.25	43.33	5.90	4.19	325.78	272.50	24.57	13.63	12	0.440	38.36	65.23	30.97
VIII	275	3.36	4.67	37.82	44.70	5.57	4.01	307.75	260.41	24.18	13.36	12	0.434	43.92	67.56	30.31
IX	275	3.36	3.69	37.88	35.33	5.48	4.99	302.41	324.24	24.41	13.82	12	0.427	44.33	66.83	30.49
X	329	8.88	10.45	100	100	1.81	1.54	100	100	23.01	13.76	12	0.372	45.13	66.00	31.21

Dibandingkan dengan pengering yang menggunakan pemanas resistif, nilai $SMER_{Tot}$ dari seluruh konfigurasi pengering HPKU berkisar antara 159 – 329%, yang berarti keefektifan per satuan energi yang digunakan oleh pengering HPKU mencapai lebih dari tiga kali lipat. Nilai $SMER_T$ bahkan lebih tinggi lagi, yaitu mencapai hampir empat kali lipat. Hal ini dapat dipahami karena COP sistem HPKU umumnya lebih dari 1. Dari seluruh konfigurasi pengering HPKU, konfigurasi VI merupakan konfigurasi yang paling menghemat konsumsi energi yaitu dengan $SMER_{Tot}$ dan $SMER_T$ masing-masing adalah 7.06 dan 5.06. Hal ini disebabkan pada konfigurasi ini, perbedaan waktu pengeringannya tidak signifikan dibandingkan dengan penurunan energi dengan cara *intermittent*.

Pengoperasian dengan Siklus Sistem Resirkulasi

Sistem siklus yang digunakan (resirkulasi atau terbuka) nampaknya tidak terlalu banyak mempengaruhi SMER. Akan tetapi dilihat dari $SMER_{Tot}$ pada konfigurasi IV, V dan VIII, untuk siklus resirkulasi lebih baik digunakan dengan input udara lingkungan dari evaporator (4.01 kg/kWh) dibandingkan dengan input udara dari kondensator (2.46 dan 3.07 kg/kWh). Walaupun persamaan (2) dan (4) memperlihatkan kedua konfigurasi ini sama secara neraca energi, perbedaan dapat disebabkan oleh kerja kompresor yang berbeda saat menerima kondisi yang berbeda pada komponen evaporator dan juga kondensornya.

Efek dari Penggunaan HE

Maksud dari penukar panas (HE) yang ditempatkan di antara evaporator dan kondensator adalah untuk meningkatkan panas sensibel setelah udara didehumidifikasi di evaporator. Penukar panas dioperasikan dengan menggunakan udara lingkungan atau udara dari ekshaus pengering. Pengaliran udara lingkungan dapat menggunakan

blower atau konveksi bebas. Pada siklus terbuka yaitu pada konfigurasi I, II, III dan VII, nilai $SMER_T$ masing-masing adalah 3.45, 3.31, 2.45 dan 4.19. Walaupun dari konfigurasi I dan II tidak nampak efek dari penukar panas, efek ini cukup signifikan ketika mengalirkan udara dalam penukar panas dengan udara ekshaus (konfigurasi III) dengan udara lingkungan menggunakan blower (konfigurasi VII). Pengaliran udara menggunakan udara ekshaus tidak membantu konservasi energi karena perpindahan panasnya memiliki *driving force* beda suhu antara bagian dalam dan luar HE. Walaupun entalpi dari udara keluaran pengering lebih tinggi dari udara lingkungan, suhunya lebih rendah.

Efek Pengoperasian *Intermittent* Selama Proses Pengeringan Heat Pump Kompresi Uap

Gambar 5 memperlihatkan perubahan suhu dan RH terhadap waktu pengeringan pada sistem HPKU siklus sistem resirkulasi, dimana Gambar 5a adalah untuk konfigurasi II yang merupakan pengoperasian kontinyu, Gambar 5b buntut konfigurasi VI dengan pengoperasian *intermittent* untuk sistem HPKU dan Gambar 5c untuk konfigurasi IX dengan pengoperasian *intermittent* baik untuk sistem HPKU maupun blowernya.

Gambar 5a memperlihatkan bahwa akibat kondisi *over-pressure* yang menyebabkan kompresor berhenti sementara, suhu plenum (udara pengering) berfluktuasi selama proses pengeringan. Misalnya menit ke 110 – 150 terjadi *over-pressure* sehingga sistem HPKU mati dan suhu plenum turun dari 40°C ke 31°C, sedangkan nilai kelembaban relatif naik dari 40% ke 60%, padahal suhu lingkungan antara jam 08.00–13.00 cenderung meningkat dari 26.3°C ke 33.8°C. Dengan kondisi ini nilai rata-rata suhu plenumnya 38.63°C, dengan kelembaban relatif 43% dan kelembaban mutlak 0.0163 kg/kg u.k.

Konfigurasi VI dilakukan dengan 120 menit sistem HPKU dioperasikan dan 30 menit dimatikan selama proses pengeringan. Selama pengeringan blower

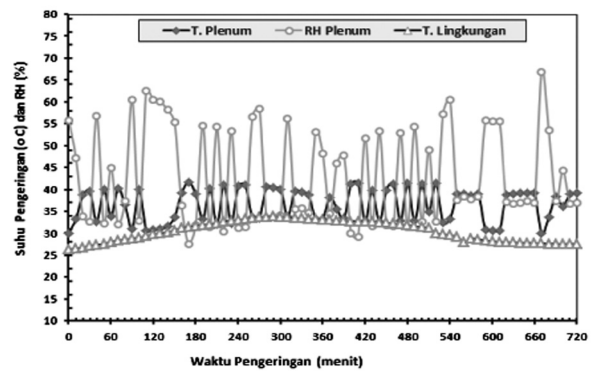
tetap dioperasikan. Gambar 5b memperlihatkan bahwa pada kondisi dimatikan, dengan segera suhu plenum turun ke kondisi lingkungan seperti yang dapat dilihat pada 30 menit pertama yaitu menit ke 120-150 kelembaban relatif naik dari 36% ke 50% suhu turun dari 42°C ke 30°C. Namun demikian nilai rata-rata suhu masih mencapai 39.64°C dengan kelembaban relatifnya 36% dan kelembaban mutlak 0.0142 kg/kg u.k.

Pada konfigurasi IX, perlakuannya hampir sama dengan konfigurasi VI akan tetapi pada saat heat pump tidak dioperasikan, blower juga dimatikan. Sebagaimana halnya dengan konfigurasi VI ketika pengoperasian HPKU dan blower dihentikan, suhu plenum menurun sedangkan kelembabannya meningkat. Karena blower pada konfigurasi ini juga dimatikan peningkatan suhu plenumnya menjadi lebih lambat sehingga rata-rata suhu pengeringannya sedikit lebih rendah yaitu 37.72°C dengan kelembaban relatif 44%.

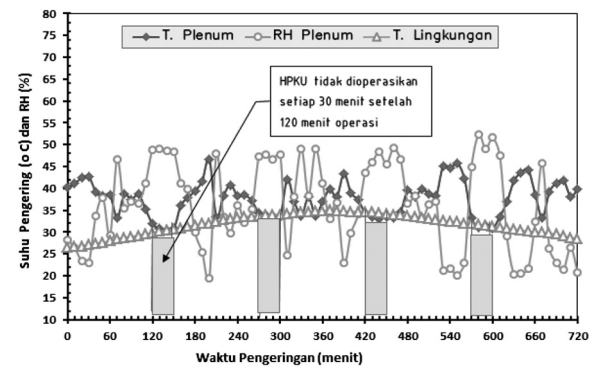
Walaupun terdapat perbedaan suhu dan kelembaban rata-rata pada konfigurasi II, VI dan IX, secara keseluruhan penurunan kadar air bahan (% b.b.) terhadap waktu pengeringan tidak terpengaruh secara signifikan (Gambar 6). Penurunan kadar air pada 180 menit pertama hampir sama untuk ketiga konfigurasi. Perlambatan penurunan kadar air pada menit ke 90–180 pada konfigurasi II disebabkan oleh tidak beroperasinya kompresor pada menit ke 120 selama kira-kira 30 menit. Selanjutnya penurunan kadar air pada konfigurasi ini tidak terlalu cepat dibandingkan pada konfigurasi VI dan IX ketika HPKU sedang dioperasikan.

Perlambatan penurunan kadar air tidak terlalu signifikan pada konfigurasi VI pada saat HPKU tidak dioperasikan akan tetapi cukup signifikan untuk konfigurasi IX. Hal ini disebabkan oleh tidak digunakannya blower pada konfigurasi IX sehingga penurunan kadar air cenderung tidak terjadi pada saat tersebut. Akan tetapi ketika pengoperasian HPKU sedang berjalan, penurunan kadar air pada konfigurasi ini cukup cepat.

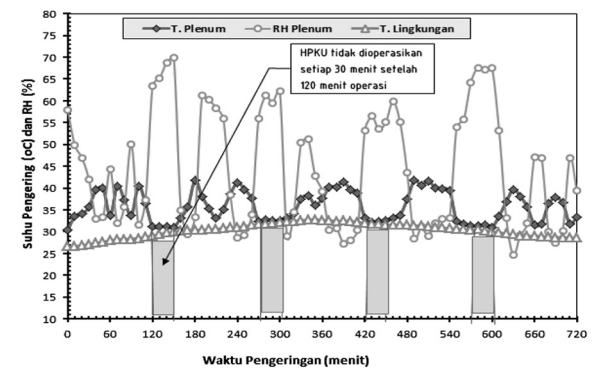
Pada studi ini, secara umum dapat dilihat bahwa pengoperasian HPKU secara *intermittent* pada berbagai konfigurasi tidak berpengaruh terhadap suhu udara pengering dan penurunan kadar air. Namun demikian, pengoperasian *intermittent* memberikan efek penurunan konsumsi energi yang cukup signifikan, sehingga Konfigurasi VI dan IX merupakan konfigurasi yang nilai SMER_{Tot} paling tinggi. Jika dibandingkan dengan konfigurasi II, nilai SMER_{Tot} dari kedua konfigurasi tersebut kira-kira mencapai 1.5 kali lipat. Selain itu, karena kondisi udara lingkungan yang cukup potensial, penggunaan blower secara kontinyu (konfigurasi VI) lebih menguntungkan dibandingkan dengan penggunaan blower secara *intermittent* (konfigurasi IX).



(5a)

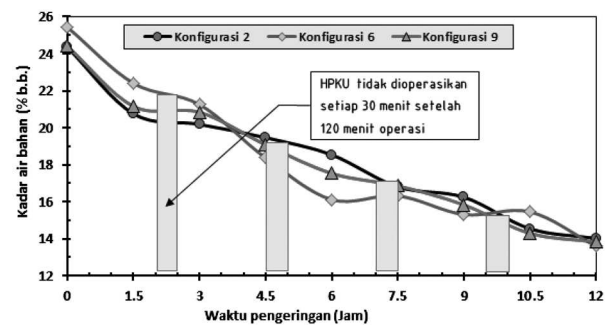


(5b)



(5b)

Gambar 5. Grafik perbandingan suhu pengering dan RH terhadap waktu pengeringan : (a) konfigurasi II, (b) konfigurasi VI, dan (c) konfigurasi IX.



Gambar 6. Grafik perbandingan kadar air gabah rata-rata masing-masing konfigurasi terhadap waktu pengeringan.

Simpulan

Seluruh kondisi udara pengeringan yang dihasilkan oleh seluruh konfigurasi heat pump kompresi uap dan pemanas resistif pada studi ini hampir sama yaitu suhu 35.7 - 37.9°C dan RH 35.4 - 45.9°C sehingga juga memberikan waktu pengeringan yang hampir sama yaitu 11 – 12 jam. Rasio peningkatan $SMER_{Tot}$ terhadap pengering pemanas resistif untuk berbagai konfigurasi pengering heat pump kompresi uap yang digunakan pada studi ini adalah 159 – 329%. Tingginya nilai $SMER_{Tot}$ baik dari pengering heat pump kompresi uap maupun pemanas resistif disebabkan oleh pengoperasian yang *intermittent* pada kondisi suhu dan kelembaban udara lingkungan yang memadai. Metode pengeringan heat pump dengan sistem terbuka dengan pengoperasian heat pump kompresi uap yang *intermittent* memberikan $SMER_T$ dan $SMER_{Tot}$ yang paling tinggi yaitu masing-masing 7.06 dan 5.06 kg/kWh. Pengoperasian *intermittent* tidak banyak mempengaruhi laju pengeringan, tetapi secara nyata menurunkan konsumsi energi.

Penempatan inlet udara lingkungan pada sebelum evaporator lebih baik dibandingkan inlet sebelum kondensator pada siklus tertutup yang ditunjukkan oleh $SMER_{Tot}$ berturut-turut 4.01 dan 3.07 kg/kWh. Penggunaan udara lingkungan dengan menggunakan konveksi paksa pada penukar panas akan meningkatkan $SMER_{Tot}$, sedangkan penggunaan aliran udara dari keluaran alat pengering akan menurunkan nilai $SMER_{Tot}$.

Daftar Pustaka

Aceves-Saborio, S. 1992. Analysis of Energy Consumption in Heat Pump and Conventional Driers. Heat Recovery System & CHP Vol. 13. No. 5 : 419–428.

Brooker, Donal, B., Brakker-Arkema, Fred, W., Hall, Carl, W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. An AVI book, Published by Van Nostrand Reinhold, New York.

Goh, Li Jin. Othman, Mohd Yusof. Mat, Sohif. Ruslan, Hafidz. Sopian, Kamaruzzaman. 2011. Review of Heat Pump Systems for Drying Application. Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 4788–4796.

Henderson, SM., and Perry, RL. 1982. Agriculture Process Engineering. 3rd Edition. Ceneticut : The AVI Publishing Company, Inc. Wesport.

Harchegani, M., Sadeghi, M., Emami, MD. Moheb, A. 2012. Investigating Energy Consumption and Quality of Rough Rice Drying Process using A Grain Heat Pump Dryer. Australian Journal of Crop Science 6 (4) : 209–217.

Mellmann, J. and Füll, C. 2008. Drying Plants for Medicinal and Spice [2] Plant - Specific Energy Consumption and Optimization Potential . Journal of Medicinal and Aromatic Plants 13 (3), pp 127-133.

Pal, US., Khan, MK., Mohanty, SN. 2010. Heat pump drying of green sweet pepper. Drying Tecol. 26, 1584–1590.

Prasertsan, S. and Saen-saby, P. 1998. Heat Pump Drying of Agricultural Materials. *Drying Technology*, 16 (1&2) : 235–250.

Rossi, SJ., Neues, LC., Kicokbush, TG. 1992. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying of vegetables. In : Mujumdar AS, Editor, Drying'92. Elsevier Science : P. 1475–8.

Ziegler, Th., F. Niebling, F., Teodorov, T., Mellmann, J. 2009. Heat Pump Drying of Drug and Aromatic Plants Possibilities for Increasing the Energy Efficiency / Heat Pump Drying of Medicinal and Spice Plants - Possibilities of Energy Efficiency Enhancement . Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 14 (4): 160-166.