

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengering energi surya efek rumah kaca (ERK) terintegrasi dengan sistem penyimpanan panas menggunakan rak yang dapat diputar secara vertikal, untuk mendapatkan hasil pengeringan dengan laju pengeringan seragam. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dibagi dalam beberapa tujuan khusus yaitu : (a) Mendapatkan karakteristik pengeringan lapisan tipis, kadar air kesetimbangan, model pengeringan lapisan tipis serta konstanta laju pengeringan pada percobaan pengeringan lapisan tipis dengan variasi suhu dan kelembaban. (b) Mengevaluasi kinerja pengering surya efek rumah kaca (ERK) tanpa pemanas tambahan dan dengan pemanas tambahan, serta mengetahui pengaruh variasi kecepatan putar rak terhadap keragaman suhu bahan maupun penurunan kadar air. (c) Mengetahui pengaruh sistem pengeringan tanpa pemanas tambahan dan dengan pemanas tambahan terhadap konsumsi energi pada pengering surya efek rumah kaca (ERK) dan (d) Merumuskan model matematik untuk memprediksi perubahan suhu, RH, dan penurunan kadar air bahan selama proses pengeringan pada berbagai variasi kecepatan putar rak, melakukan validasi dari model tersebut, serta melakukan simulasi untuk beberapa kondisi.

Percobaan pengeringan lapisan tipis dilakukan pada suhu 40, 50 dan 60°C, dan kelembaban relatif 20, 40 dan 60% dengan menggunakan pengering laboratorium. Lima model matematika (Lewis, Henderson & Pabis, Page, Two-term Exponential dan Logaritma) digunakan untuk memprediksi kurva pengeringan. Keakuratan model dievaluasi dengan membandingkan nilai koefisien determinasi (R^2) dan nilai root mean square error (RMSE) antara hasil percobaan dan nilai prediksi rasio kadar air (MR) dengan menggunakan analisis regresi *nonlinear*. Sedangkan untuk mengevaluasi sistem pengeringan, dilakukan pengujian kinerja pengering ERK. Pengujian dilakukan baik tanpa pemanas tambahan maupun dengan pemanas tambahan. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan putar rak terhadap keragaman suhu bahan maupun penurunan kadar air, dilakukan lima kali percobaan variasi kecepatan putar rak (1, 4, 7, 10) rpm dan tanpa pemutaran rak. Pada penelitian ini juga dilakukan analisis energi untuk mengetahui efisiensi sistem pengeringan dan kebutuhan energi spesifik. Untuk melakukan simulasi kinerja pengering dilakukan pengembangan model matematik berdasarkan pindah panas dan masa 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. Bahan yang dipergunakan pada pengujian adalah kapulaga lokal (*Amomum cardamomum* Wild).

Hasil penelitian menunjukkan, pada percobaan pengeringan lapisan tipis untuk kapulaga lokal, suhu pengeringan lebih berpengaruh terhadap waktu pengeringan. Pengeringan kapulaga lokal berlangsung pada periode laju pengeringan menurun (*falling rate periode*). Model persamaan kadar air

kesetimbangan (Me) yang paling sesuai untuk kapulaga lokal adalah model modifikasi Chung-Pfost, sedangkan model pengeringan lapisan tipis yang paling sesuai adalah model persamaan logaritmik.

Rata-rata suhu yang dapat dicapai pada pengujian tanpa pemanas tambahan untuk suhu atap antara 34,1 – 41,8°C, suhu lantai 35,9 – 43,6°C, suhu ruang pengering antara 35,1 – 41,9°C dan RH ruang pengering antara 40,0 – 59,7%. Sedangkan pada pengujian dengan pemanas tambahan, rata-rata suhu air tangki penyimpan panas mencapai 50,0 – 55,0°C, suhu udara keluar penukar panas antara 45,2 – 53,5°C. Suhu udara ruang pengering berkisar antara 38,9 – 45,9°C dengan RH berkisar antara 32,1 – 47,4%. Dari hasil tersebut didapatkan dengan penambahan sistem pemanas akan meningkatkan suhu dan menurunkan RH ruang pengering dan dapat mengurangi waktu pengeringan antara 13 – 14%. Dari hasil analisis didapatkan baik pada pengujian tanpa pemanas maupun dengan pemanas tambahan, perlakuan pemutaran rak berpengaruh terhadap keseragaman suhu bahan maupun kadar air pada masing-masing rak pengering. Pada perlakuan pemutaran 1 (satu) 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. Variasi pemutaran rak hanya mempengaruhi keseragaman laju pengeringan pada masing-masing rak.

Berdasarkan analisis energi didapatkan hasil efisiensi sistem pengeringan pada pengujian tanpa pemanas tambahan berkisar antara 15,8 – 28,7%, sedangkan pada pengujian dengan pemanas tambahan berkisar antara 4,2 – 8,8%. Konsumsi energi spesifik (KES) pada pengujian tanpa pemanas tambahan berkisar antara 8,6 – 15,7 MJ/kg H₂O, sedangkan pada pengujian dengan pemanas tambahan berkisar antara 28,4 – 59,8 MJ/kg H₂O. Penggunaan pemanas tambahan berakibat menurunkan efisiensi sistem pengeringan dan peningkatan konsumsi energi spesifik.

Dari hasil pemodelan matematik diperoleh hasil variasi kecepatan putar rak tidak berpengaruh terhadap kondisi suhu pada penyimpan panas maupun kondisi suhu pada ruang pengering. Variasi kecepatan putaran rak hanya berpengaruh terhadap keragaman suhu bahan maupun keragaman kadar air pada masing-masing rak pengering. Hal tersebut juga sesuai dengan hasil data observasi. Dari hasil validasi, didapatkan model persamaan matematik yang telah dibangun dapat menggambarkan dengan tepat perubahan suhu atap, suhu lantai, suhu air tangki penyimpan panas, suhu air keluar penukar panas, suhu dan RH ruang pengering, suhu bahan maupun penurunan kadar air. Model persamaan matematik yang telah dikembangkan dapat dipergunakan untuk melakukan simulasi proses pengeringan pada kondisi dan kapasitas pengeringan yang berbeda. Dengan peningkatan kapasitas pengeringan sebesar 35 kg akan meningkatkan efisiensi total sistem pengeringan dan menurunkan kebutuhan energi spesifik.

Kata kunci : pengering surya, efek rumah kaca, pemanas tambahan, rak berputar vertikal, pemodelan matematik

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a system of greenhouse effect (GHE) solar dryer integrated with heat storage systems, using a vertical rotating tray to obtain uniform drying rate. This research contains several specific objectives, namely: (a) Obtain a thin layer drying characteristics, equilibrium moisture content, thin layer drying models and drying rate constant at various temperature and humidity in thin layer drying experiment. (b) Evaluate the performance of greenhouse effect solar dryer (GHE) without additional heating and with additional heating, as well as determine the effect variations speed of rotating tray on the diversity of product temperature and moisture content (c) Determine the effect of drying systems without additional heating and additional heating on the energy consumption in greenhouse effect solar dryer (GHE) and (d) Formulate a mathematical model to predict changes in temperature, RH, and moisture content during the drying process at various rotational tray, perform validation of the model and simulations for several conditions.

Study of thin layer drying was conducted at temperatures of 40, 50 and 60° C, and relative humidity 20, 40 and 60% by using a laboratory air dryer. Five mathematical models (Lewis, Henderson & Pabis, Page, Two-term exponential and logarithm) are used to predict the drying curve. The accuracy of the model was evaluated by comparing the value of the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE) between the experimental results and the predicted value of the moisture ratio (MR) using nonlinear regression analysis. Performance test of GHE were conducted to evaluate the drying systems. Performance test was done without additional heating and with additional heating. To find out the effect of rotational speed variations on the diversity of product temperature as well as a decrease in water content, five experimental variation speed of tray were conducted (1, 4, 7, 10) rpm and without rotation. In this research, energy analysis also were conducted to determine the efficiency of drying systems and the specific energy consumption. Mathematical modeling based on heat and mass transfer and a thin layer drying approaches were conducted to simulate the performance of the dryer. Equations solved numerically using the finite difference Euler with Visual Basic Application (VBA) program on Excel. Validation is done by comparing the calculation results of mathematical modeling (data prediction) with measurement data (data observation). Criterion validity is determined by the value of the coefficient of determination (R^2), the value of RMSD and MAPD value. Materials used in the test is a local cardamom (*Amomum cardamomum* Wild).

The results showed that thin layer drying of local cardamom, drying temperature affected to drying time. Local cardamom drying takes place at falling rate period. The most suitable equation of Equilibrium Moisture Content (M_e) model for local cardamom is a modified of Chung-Pfost model, while for thin layer drying models is the logarithmic equation model.

Average temperatures that can be reached on testing without additional heating for roof temperatures is between 34,1 - 41,8°C, floor temperature is 35,9 -

43,6°C, drying chamber temperature is between 35,1 - 41,9°C and RH drying chamber is between 40,0 – 59,7%. While on testing with additional heating, the average temperature of the hot water storage tank reaches 50,0 - 55,0°C, air temperature exit heat exchanger between 45,2 - 53,5°C. Air temperature drying chamber ranged between 38,9 - 45,9°C with RH ranged from 32,1 to 47,4%. From the results obtained with the addition of the heating system will increase the temperature and lower RH drying chamber and can reduce the drying time of between 13-14%. From the analysis results obtained that variation of rotational speed affects on the uniformity of temperature and water content in each tray drying. At rotation 1(one) rpm (experiment II), obtained best condition (product temperature and moisture content of each tray are most uniform). Increasing rotational speed of tray causes increasing in standard deviation of product temperature and moisture content. Rotational speed variation of tray does not affect the drying rate. The drying rate is affected by temperature and drying time. Variation of rotational speed of tray only affects on the uniformity of drying rate of each tray.

Based on the analysis of the results obtained energy efficiency drying system on test without additional heating ranges between 15,8 – 28,7%, while in testing with an additional heater ranges from 4,2 to 8,8%. Specific energy consumption (SEC) on testing without additional heaters ranges from 8,6 to 15,7 MJ / kg H₂O, whereas in the test with an additional heater ranged from 28.4 to 59,8 MJ/kg H₂O. The use of additional heating drying systems result in lower efficiency and an increase in specific energy consumption.

The results of mathematical modeling showed that tray rotation speed variation does not affect the temperature conditions in heat storage and drying chamber. Tray rotation speed variation only affect on diversity of the product temperature as well as the diversity of the moisture content on each tray dryer. It is also in accordance with the results of observational data. From validation results, obtained that the mathematical models that have been developed can be described precisely the temperature roof changes, temperature of the floor, temperature of the hot water storage tank, temperature of the water exit heat exchanger, temperature and RH drying chamber, temperature of the product as well as a moisture content decrease. Mathematical models that have been developed can be used to simulate the drying process in the drying conditions and different capacities. Increasing the drying capacity of 35 kg would increased the total efficiency of the drying system and decreasing requirement of specific energy.

Keywords: solar dryer, greenhouse effect, additional heating, vertical rotating tray, mathematical modeling