

Fruit Drying Using Heat Pump

Somchart Soponronnarit*, Adisak Nathakaranakule*,
Somboon Wetchacama*, Thanit Swasdisevi*, and Prathan Rukprang**

* School of Energy and Materials, ** Former Graduate Student

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

Suksawat 48 Road, Bangkok

THAILAND

ABSTRACT

The purposes of this research were to design, construct, evaluate performance and conduct cost analysis of a heat pump fruit dryer. The dryer consisted of a cabinet dryer and heat pump. Product capacity of the cabinet dryer was 100 kg to 132 kg with 12 trays and the heat pump capacity was 3.5 kW refrigeration. In this work, papaya glace' was dried in close loop air with drying temperature of 50°C, air flow rate of 0.45 kg/s and bypass air of 63%. Drying operation was divided into two steps. In the first step, papaya glace' with dimension of 6.35 x 15 x 2.5 cm³ and initial moisture content of 74% dry-basis was dried. In the second step, papaya glace' dried in the first step was cut into 0.98 x 0.98 x 0.98 cm³ and dried to a moisture content of 23% dry basis. The results were as follows: drying rate 0.686 kg water/h, moisture extraction rate from evaporator 0.78 kg water/h and drying time of the two steps approximately 80 h (40 h in each step). Energy consumption was 9.93 MJ/kWh or SMER (specific moisture extraction rate) 0.363 kg water evaporation/kWh at specific air flow rate of 21.42 kg dry air/h-kg dry papaya glace'. The coefficient of performance for the heat pump (COP_h) varied between 3.71 to 3.85. For the quality of papaya glace' after drying in terms of color, it was found that the color of papaya glace' was light reddish-orange (code 34-C from R.H.S. color chart). Cost evaluation found that cost of papaya glace' drying was 12.8 Baht/kg water evaporation of which 5.3 was energy cost, 1.4 was maintenance cost and 6.1 was fixed cost (US\$ 1 = 40 Baht).

1. INTRODUCTION

Dried fruit is a modified agricultural product which is in high demand in both domestic and international markets. The drying process is an important step of the production process as it has high operating costs. Cabinet dryers are suitable for drying fruit. Drying temperatures typically used in dryers are approximately 60°C to 70°C. If the drying temperature is higher, the product will be dark colored and its surface is withered and wrinkled. If the drying temperature is lower, the product quality will be acceptable but it requires long drying time. Small dryers use electricity, LPG or solar energy for heating air. Solar energy has limitations in terms of inconsistent energy availability. This research proposes a choice of using heat from heat pump for drying fruit. Fruit drying using heat pump could reduce energy cost with fairly low air temperature and relative humidity. This can be achieved by condensing moisture from the drying air and followed by reheating. Product quality in terms of color and smell could be improved.

การอุบแห้งมะลอกข้าวอิ่มโดยใช้อีดบีม*

สมชาย ไสเกณร์ลุกธ์**

ประธาน รักปรางค์

อดีตักดิ้น นาอกรณกุล และ สมบูรณ์ เวชกานา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งผลไม้โดยใช้อีดบีม โดยทำการออกแบบ สร้าง ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย เครื่องอบแห้งประกอบด้วยตู้อบแห้ง ชั้นบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จำนวน ๑๒ ตาด (น้ำหนักผลิตภัณฑ์ ๑๐๐-๑๓๖ กิโลกรัม) และอีดบีมขนาด ๑ ตันความเย็น ทดลองอบแห้งมะลอกข้าวอิ่มแบบบรรบบปิด อุณหภูมิอบแห้ง ๔๐ องศาเซลเซียส อัตราการไอน้ำเชิงมวลของอากาศ ๐.๔๕ กิโลกรัมต่อวินาที สัดส่วนลมเลี่ยง (by pass air) ร้อยละ ๖๓ แบ่งการอบแห้งออกเป็น ๖ ชั่ว คือ ช่วงแรก อบแห้งมะลอกชั้นใหญ่ขนาด ๖.๓๕ x ๑๕ x ๖.๕๕ ถูกน้ำคั่งเซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ ๘๔ ของมาตรฐานแห้ง และ ช่วงที่สอง นำมะลอกข้าวอิ่มอบแห้งจากช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น ๐.๕๕ x ๐.๕๕ x ๐.๕๕ ถูกน้ำคั่งเซนติเมตร และนำไปอบแห้งต่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ ๖๓ ของมาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งสามารถทำได้ถึง ๐.๖๘๖ กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อชั่วโมง อัตราการความแปรหุ้นของน้ำจากเครื่องระเหยสามารถทำได้ถึง ๐.๗๘ กิโลกรัมน้ำความแปรหุ้นต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้ง ๖ ช่วงรวมกันประมาณ ๘๐ ชั่วโมง (ใช้เวลาช่วงละ ๔๐ ชั่วโมง) ความสัมเปลี่ยนพลังงานเจ้าเพรษของระบบเท่ากัน ๕.๙๓ เมกะจูลต่อ กิโลกรัมน้ำที่ระเหย หรือ specific moisture extraction rate (SMER) เท่ากัน ๐.๓๖๓ กิโลกรัมน้ำที่ระเหยต่อ กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่อัตราการไอน้ำเพรษของอากาศ ๒๑.๔๒ กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัม มะลอกแห้ง ตั้งประสิทธิสมรรถนะอีดบีม (coefficient of performance for heat pump-COP_{hp}) มีค่าระหว่าง ๓.๗๙-๓.๘๕ คุณภาพของมะลอกข้าวอิ่มอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งทั้ง ๖ ช่วง พบว่ามีสีสันปนแดงค่อนข้างอ่อน (code ๓๔-C ตามมาตรฐานเทียบสีของ R.H.S colour chart)

จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการอบแห้งมะลอกข้าวอิ่ม พบว่าเท่ากับ ๑๒.๕ บาทต่อ กิโลกรัมน้ำที่ระเหย โดยแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากัน ๕.๓ บาทต่อ กิโลกรัมน้ำที่ระเหย ค่าใช้จ่ายด้านการนำรุ่งรักษากลางเท่ากัน ๑.๔ บาทต่อ กิโลกรัมน้ำที่ระเหย และค่าใช้จ่ายในการสร้าง เครื่องอบแห้งเท่ากับ ๖.๑ บาทต่อ กิโลกรัมน้ำที่ระเหย

* บรรยายในงานประชุมสัมมนาวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน เมื่อวันที่ ๖ สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๔๐

** ภาควิชาน้ำดื่มและน้ำเสีย คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สำนักวิทยาศาสตร์; ภาควิชาจารย์ คณะพัฒนาและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

๔๔
รายงานการวิจัย ปีที่ ๒๓ ฉบับที่ ๒ จุฬาลงกรณ์-พญาไท ๒๕๔๑

ABSTRACT : PAPAYA GLACÉ DRYING USING HEAT PUMP*

Somchart Soponronnarit**, Prathan Rukprang,

Adisak Nathakaranakule and Somboon Wetchacama

* Paper Presented at the Royal Institute, Bangkok, August 6, 1997.

** Associate Fellow of the Royal Institute; Professor, School of Energy and Materials,

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.

The purposes of this research are to design, construct, evaluate performance and conduct cost analysis of heat pump fruit dryer. The dryer consists of cabinet dryer and heat pump. Product capacity of the cabinet is 100-132 kg with 12 trays and the capacity of the heat pump is 1 ton refrigeration. In this experiment, papaya glace' already is dried in close-loop air with drying temperature 50 °C, air flow rate 0.45 kg/s and by pass air 63 %. Drying operation is divided into 2 steps. In the first step, papaya glace' with dimension 6.35 × 15 × 2.5 cm³ and initial moisture content 74 % db. is dried. In the second step, papaya glace' already dried in the first step is cut into 0.98 × 0.98 × 0.98 cm³ and dried to final moisture content 23 % db. The results are as follows: drying rate 0.686 kg water/h, moisture extraction rate from evaporator 0.78 kg water/h, drying time of two steps is approximately 80 h (40 h in each step). Energy consumption is 9.93 MJ/kW-h or SMER (Specific moisture extraction rate) is 0.363 kg water evap./kW-h at specific air flow rate 21.42 kg dry air/h-kg dry papaya glace'. The coefficient of performance of heat pump (COP_{hp}) varies between 3.71-3.85. For the quality of papaya glace' after drying in terms of color, it is found that color of papaya glace' is light orange-red (code 34-C from R.H.S colour chart).

For cost evaluation from this experiment, it is found that the cost of papaya glace' drying is 12.8 bath/kg water evap. of which 5.3 is energy cost, 1.4 is maintenance cost and 6.1 is fixed cost.

ค า น า

ผลไม้แห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรนิคหนึ่งซึ่งตลาดทั่วโลกในและภายนอกประเทศไทยมีความต้องการสูง การอบแห้งเป็นกระบวนการการผลิตขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญและเสียค่าใช้จ่ายสูง เครื่องอบแห้งแบบถูเป็นเครื่องอบแห้งแบบหนึ่งซึ่งมีความเหมาะสมในการอบแห้งผลไม้ โดยทั่วไปจะใช้อุตสาหกรรมร้อนประ摹 ๖๐-๗๐ องศาเซล-

เซียส ถ้าใช้อุตสาหกรรมร้อนกว่านี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้ม ไม่สวยงาม ผิวเสียหาย พลังงานที่ใช้สูงอากาศในเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมักได้จากไฟฟ้าและแก๊สแอดเพรส ส่วนพลังงานรังสีอาทิตย์ ใช้ในการถูนอากาศได้เช่นกัน แต่เนื่องจากพลังงานรังสีอาทิตย์มีข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอนจึงมักใช้เป็นพลังงานเสริมเท่านั้น งานวิจัยนี้เสนอทางเลือกการใช้ความร้อนจากระบบอีตัน ในการอบแห้งผลไม้โดยใช้

PAPAYA GLACE' DRYING USING HEAT PUMP

Somchart Soponronnarit¹, Somboon Wetchacarna¹, Adisak Nathakaranakule¹,
Thanit Swasdisevi¹, and Prathan Rukprang²

¹ School of Energy and Materials, 2 Former Graduate Student
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi
Suksawas 48 Rd., Bangkok, Thailand

Key words : Fruit drying, heat pump, papaya glace'

ABSTRACT

The purposes of this research are to design, construct, evaluate performance and conduct cost analysis of heat pump fruit dryer. The dryer consists of cabinet dryer and heat pump. Product capacity of the cabinet dryer is 100-132 kg with 12 trays and capacity of heat pump is 1 ton refrigeration. In this experiment, papaya glace' is dried in close loop air with drying temperature of 50°C, air flow rate of 0.45 kg/s and bypass air of 63 %. Drying operation is divided into two steps. The results are as follows: drying rate 0.686 kg water evaporation/h, moisture extraction rate from evaporator 0.78 kg water evaporation/h and drying time of the two steps approximately 80. Energy consumption is 9.93 MJ/kW-h or SMER 0.363 kg water evaporation/kW-h at specific air flow rate of 21.42 kg dry air/h-kg dry papaya glace'. The coefficient of performance for heat pump varies between 3.71-3.85. For the quality of papaya glace' after drying in terms of color, it is found that color of papaya glace' is light reddish-orange. For cost evaluation from this experiment, it is found that cost of papaya glace' drying is 12.8 bath/kg water evaporation of which 5.3 is energy cost, 1.4 is maintenance cost and 6.1 is fixed cost (US\$ 1 = 34 baht).

INTRODUCTION

Dried fruit is a type of agricultural modified product which is in high requirement in both domestic and international markets. Drying process is an important step of production process which uses high cost for operating. This research proposes a choice of using heat from heat pump for drying fruit. Fruit drying using heat pump could reduce energy cost with fairly low air temperature and relative humidity. Product quality in terms of color and smell is limited changed and is accepted by consumer.

SIMULATION OF HEAT PUMP DRYER

Siva Achariyaviriya¹ and Somchart Soponronnarit²

¹Doctoral student

²School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suksawat 48 Road, Bangkok 10140, Thailand

Keywords : simulation ; heat pump dryer ; modeling

ABSTRACT

A mathematical model of a heat pump dryer was developed to study the performance of an open loop, a closed loop and a partially closed loop heat pump dryers. The criteria for evaluating the performance were specific moisture extraction rate and drying rate. The effects on the performance of ambient conditions, the fraction of evaporator bypass air, specific air flow rate, and drying air temperature were described. It was found that ambient conditions and the fraction of evaporator bypass air slightly affected the performance of the open loop and the partially closed loop heat pump dryers. Specific air flow rate and drying air temperature affected significantly the performance of all heat pump dryers. The results from the simulation of papaya glace' drying using closed loop heat pump dryer were close to the experimental results. From this simulating data, the best conditions were specific air flow rate of 4.3 kg-dry air/h- kg dry papaya and the fraction of evaporator bypass air of 75%. The specific moisture extraction rate was 0.42 kg-water/kW-h.

1. INTRODUCTION

Drying of fruits has been found in various applications. Basically, conventional hot air dryers are used for drying. The main problem is that the conventional hot air dryer results in low product quality due to high drying air temperature. Drying using a heat pump dryer can use lower drying air temperature since moist air leaving the drying chamber can be dehumidified and recirculated.

Chou et al. (1994) developed a mathematical model of a heat-pump-assisted dryer to study the performance of a heat-pump-assisted dryer assuming the coefficient of performance of 8, the effectiveness of outdoor air preheat of 0.7, generator heat losses of 60 %, and transmission losses of 20 %. Jolly et al. (1990) reported a meticulous mathematical model of a heat-pump-assisted continuous dryer. This model was used by Jia et al. (1990) to investigate the performance of a heat-pump-assisted continuous dryer. The criteria were specific moisture extraction rate, coefficient of performance, and product throughput. Parameters which affected the performance were the fraction of evaporator bypass air, the heat transfer area of evaporator and condenser, compressor speed, total air mass flow rate and vented air mass flow rate. Clements et al. (1993) used the model developed by Jolly et al. (1990) to predict the performance of a heat-pump-assisted continuous dryer. The results showed that specific moisture extraction rate increased when air relative humidity was increased. Moreover, the optimum total air mass flow rate of 0.63 kg/s and the optimum fraction of evaporator

การอบแห้งผักและผลไม้ด้วยปั๊มความร้อน

ศิวะ อัชชาริยวิริยะ¹ และ สมชาติ โซภณรัตน์²

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาชนิดผักและผลไม้ที่มีศักยภาพในการทำแห้ง ตลอดจนศึกษา ข้อมูลการออกแบบระบบปั๊มความร้อนที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนและลดความร้อนอากาศสำหรับการ อบแห้ง โดยพิจารณาสารทำงาน R-22, R-123, R-124, R-134a, และ R-152a โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ ที่สำคัญคืออัตราส่วนการอัด อุณหภูมิความแห้ง อุณหภูมิแทรกต่างรวม และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของ แรงดันทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอัด สัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของแรงดันทางทฤษฎี กับอุณหภูมิแทรกต่างรวมที่อุณหภูมิความแห้ง 70 °C และ 85 °C

Drying of Vegetables and Fruits by Heat Pumps

Siva Achariyaviriya and Somchart Soponronnarit

Abstract

The objectives of this study are to investigate some vegetables and fruits which have drying potential and to determine theoretically some design parameters for dryer using heat pump systems operating on R-22, R-123, R-124, R-134a, and R-152a. The essential design parameters are the compression ratio (CR), the condensing temperature (T_{CO}), the gross temperature lift ($T_{CO} - T_{EV}$), and the theoretical Rankine coefficient of performance (COP_R). The relationship between compression ratio, the theoretical Rankine coefficient of performance, and the gross temperature lift for this group of working fluids for condensing temperature 70 °C and 85 °C were determined.

¹ นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชามาก สำนักวิทยาศาสตร์ ประมงวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบราาร์ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งผลไม้ โดยใช้ปั๊มความร้อน

Development of a Mathematical Model for Heat Pump Fruit Drying

วราภรณ์ รัตตานองพิสัตย์¹ สาขาวิชาระบบสารและกระบวนการผลิต สถาบันเทคโนโลยี
เทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จังหวัดสิงห์บุรี¹ และ ธนิต สวัสดิเสวี¹

Waraporn Rattanongpisat Somchart Soponronnarit and Thanit Swasdisevi

ABSTRACT

A mathematical model for papaya glace' drying using heat pump has been developed. It comprises of drying rate equation, mass and energy balance equations, thermo-physical property of papaya glace' equations and heat exchanger equations. Successive substitution method was used for finding the solution. It was found that the model was fairly accurate for predicting final moisture content, air temperature at various parts in the system and temperature of refrigerant especially at low moisture level of papaya glace'.

The mathematical model was then used to find out strategy for drying papaya glace' with a specific air flow rate of 29.8 kg/h-kg dry papaya glace'. Simulated results showed that drying time and energy consumption decreased when the drying air temperature increased. In addition, the appropriate by-pass air ratio was in the range of 86-90 %.

Keywords : drying, mathematical model, fruit, heat pump

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งมะละกอเมชอั่มโดยใช้ปั๊มความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยสมการที่ใช้ในแบบจำลองคือ สมการอัตราการอบแห้ง สมการรบกวนคุณภาพและห้องงาน สมการคุณสมบัติทางกายภาพของมะละกอเมชอั่ม และสมการการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องแยกปลีบความร้อน วิธีการค้นวิธีแบบการเห็นค่าอย่างต่อเนื่องถูกนำมาใช้ในการหาค่าตอบ จากการหาค่าตอบโดยวิธีนี้พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าได้ค่อนข้างถูกต้อง ทั้งความชื้นสุกทั้ง ชุดและอุณหภูมิอากาศที่ค่านานกว่าต่าง ๆ ในระบบ และอุณหภูมิของสารทำความชื้น โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้นของมะละกอเมชอั่มค่า

¹ คณะพัฒนาและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว

School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand.

111

Development of a Mathematical Model for Heat Pump Fruit Drying

Somchart Soponronnarit,* Thanit Swasdisevi*
and Waraporn Rattanongpisat **

* School of Energy and Materials ** Graduate Student
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi
Suksawat 48 Road, Bangkok 10140
THAILAND

ABSTRACT

A mathematical model for papaya glace' drying using heat pump has been developed. It comprises of drying rate equation, mass and energy balance equations, thermo-physical property of papaya glace' equations and heat exchanger equations. Successive substitution method was used for finding the solution. It was found that the model was fairly accurate for predicting final moisture content, air temperature at various parts in the system and temperature of refrigerant especially at low moisture level of papaya glace'.

The mathematical model was then used to find out strategy for drying papaya glace' with a specific air flow rate of 29.8 kg/h-kg dry papaya glace'. Simulated results showed that drying time and energy consumption decreased when the drying air temperature increased. In addition, the appropriate by-pass air ratio was in the range of 86-90 %.

1. INTRODUCTION

Britnell et al.[1] studied drying of ginger and potato by using heat pump. They found that quality of agricultural product, dried by heat pump, in terms of smell, taste and color was better than those dried by rotary drying. Clement et al. [2] studied continuous drying of rubber using heat pump. They found that COP increased with air relative humidity and suitable by pass air ratio was 60-70 %. Meyer and Greyvenstein[3] studied economic grain drying using heat pump. They found that heat pump drying which operated along with other purpose such as heating water was more economical than drying using electric hot wire and diesel fuel. Soponronnarit et al. [4] studied suitable strategy for papaya glace' drying in thermal tunnel and developed a mathematical model. Main assumption of the model was heat equilibrium between

Seed Drying Using a Heat Pump

Somchart Soponronnarit, Somboon Wetchacama, and Tanin Kanphukdee

School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

The objectives of this research were to design, construct and test a heat pump dryer for paddy seed working with a mixed flow (LSU type) dryer. In this study, paddy seed was dried in an open air-loop from initial moisture content of 13.50 - 22.15 %w.b. to final moisture content about 12 %w.b., inlet drying air temperature was 43 °C, specific air flow rate was 9 m³/min-m³ paddy and evaporator bypass air ratio was 0 %, 30 % and 50 %. The effects of evaporator bypass air ratio on specific energy consumption, COP_{hp}, SMER, and MER were investigated. Experimental results showed that COP_{hp} and SMER increased to maximum at evaporator bypass air ratio of 0 % and decreased with increasing bypass air ratio. Quality of paddy seed was very good with mean germination of sun drying and heat pump drying of 98 % and 97 % and mean vigour of sun drying and heat pump drying of 96 % and 95 % respectively. From cost evaluation of paddy seed drying with an initial moisture content of 22.15 %w.b. and final moisture content of 12.45 %w.b., it was found that total cost of seed drying was 2.81 baht/kg water evap. (US\$ 1 = 40 baht) of which 0.63 was energy cost, 0.41 was maintenance cost and 1.77 was fixed cost.

Keywords: Grain drying / Seed / Heat pump

INTRODUCTION

Seed production should be managed to maintain good quality of original seed that is good in germination and vigour [1]. Drying process is one of seed producing processes