

อิทธิพลของการพาความร้อนอิสระที่มีต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่น โดยใช้การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จี

Effect of free convection on rubber sheets drying process using energy and exergy analyses

ฐานวิทย์ แนมใส^{1*} จารุวัฒน์ เจริญจิต¹ และ วสันต์ จินธาดา¹
Thanwit Naemsai^{1*}, Jaruwat Jareanjit¹ and Wasan Jeentada¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งชนิดสภาวะเรือนกระจกเพื่อค้นหาอิทธิพลของการพาความร้อนอิสระที่มีต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่น เครื่องอบแห้งที่ออกแบบเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ภายในเครื่องอบแห้งมีแผ่นกั้นที่สามารถเปิดและปิดเพื่อให้อากาศร้อนไหลผ่านยางพาราแผ่นได้ ในการวิเคราะห์หาศักยภาพพลังงานเพื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบและค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของการอบแห้ง และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์เพื่อคำนวณเอกเซอร์จีที่ไหลเข้าเอกเซอร์จีที่ไหลออก เอกเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ผลการวิเคราะห์พบว่าอิทธิพลของการพาความร้อนอิสระที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งมีนัยสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่น เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบเพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์ ค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของการอบแห้งเพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จีเฉลี่ยมีค่าลดลง 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งที่ไม่มีการพาความร้อนอิสระ

คำสำคัญ : การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จี การพาความร้อนอิสระ เครื่องอบแห้งยางพาราแผ่น

Abstract

This research was concerned the energy and exergy analyses occurring in the greenhouse dryer in order to investigate the effect of free convection on the rubber sheets drying. The dryer was designed as the Triangular prism and the structure was covered by Polycarbonate sheets. Moreover, there were opened/closed partitions for flowing hot air through rubber sheets which were hanged inside the dryer. The energy conversion was applied to perform and calculate the system drying efficiency and to pick-up efficiency. The exergy analysis was determined for purposing of exergy inlet, exergy outlet, exergy losses and exergetic efficiency. The results from the analysis illustrated that the effect of the free convection was significantly parameter to dry rubber sheets .The system drying

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา 90000

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

* Corresponding author. E-mail: Thanwit.n@rmutsv.ac.th

efficiency was increased 6%, the pick-up efficiency was risen 5% while the average exergetic efficiency was decreased 4% comparing with the non-free convection dryer.

Keywords : energy and exergy analyses, free convection, rubber sheet dryer

บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet, ADS) เป็นยางแผ่นที่มีมูลค่าในท้องตลาดสูงสุด (Office of the rubber replanting aid fund, 2014) ซึ่งยางพาราแผ่นประเภทนี้ผลิตจากการใช้ความร้อนไหลผ่านแผ่นยางจนมีสภาพแห้งและสีมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มชุมชนขนาดเล็กซึ่งมีงบประมาณในการลงทุนไม่สูง ดังนั้นเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อการอบแห้งจึงควรใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตและเป็นพลังงานทดแทนที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้ในงานอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก (Mustayen *et al.*, 2014) คือ เครื่องอบแห้งแบบใช้แสงอาทิตย์โดยตรง (direct solar dryer) เครื่องอบแห้งแบบใช้แสงอาทิตย์โดยอ้อม (Indirect solar dryer) และเครื่องอบแห้งแบบใช้แสงอาทิตย์ผสม (mixed mode solar dryer) และ 2 ประเภทย่อยซึ่งแบ่งตามลักษณะการพาความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุอบแห้ง คือ เครื่องอบแห้งการพาความร้อนแบบอิสระโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (natural convection solar dryer) และเครื่องอบแห้งการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (forced convection solar dryer)

งานวิจัยนี้สนใจในรูปแบบของเครื่องอบแห้งชนิดใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบโดยตรงและ

การพาความร้อนเป็นแบบอิสระ เนื่องจากมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า และใช้งบประมาณการลงทุนต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งประเภทอื่นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (Mustayen *et al.*, 2014) งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวนิยมทำการอบแห้งในสภาวะเรือนกระจก (Serm *et al.*, 2011; Kaewkiew *et al.*, 2012; Prakash and Kumar, 2014) เนื่องจากสามารถทำความร้อนถึง 40-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมต่อสภาวะการอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรโดยเฉพาะยางพาราแผ่น (Ninchuewong *et al.*, 2012) และสามารถสะสมความร้อนได้ดีโดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานเสริมจากแผงเก็บรังสีแสงอาทิตย์ ในการอบแห้งยางพาราแผ่นประเภทนี้ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งของวัสดุอบแห้งคือผลจากการพาความร้อนอิสระที่เกิดขึ้นจากภายในเครื่องอบแห้ง ซึ่งงานวิจัยโดยส่วนใหญ่ (Mustayen *et al.*, 2014) จะแสดงออกมาในเชิงอัตราการอบแห้ง (drying rate) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในสมมุติฐานของการอนุรักษ์พลังงาน (energy conversion) แต่ถ้ามองในแง่ของประสิทธิภาพที่ได้จากการใช้งานได้จริงที่วิเคราะห์ในกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (irreversible process) การนำกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (exergy analysis) เข้ามาใช้เพิ่มเติมจากการวิเคราะห์แบบเดิมจะสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมการ

อบแห้งได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเช่น Prommas *et al.* (2010) ใช้การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีในกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนหลายชั้นโดยใช้ลมร้อน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน ที่มีต่อรูปแบบการอบแห้งแพคเบตวัสดุพูน F-C และ C-F และประยุกต์ใช้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้า เอ็กเซอร์จีที่ไหลออก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้ง จากการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ Aghbashlo *et al.* (2013) ได้รวบรวมการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีพบว่า การวิเคราะห์ทางเอ็กเซอร์จีแสดงค่าประสิทธิภาพออกมาน้อยกว่าค่าประสิทธิภาพการอบแห้งที่วิเคราะห์ในเชิงพลังงานอยู่ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการแสดงถึงค่าที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง จากงานวิจัยที่ผ่านมาการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีสามารถใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อหารูปแบบการอบแห้งที่เหมาะสมและหาค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้ แต่ในส่วนของงานวิจัยเกี่ยวกับยางพาราแผ่นยังไม่มีงานนำวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวเข้ามาช่วยในการหาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะการพาความร้อนแบบอิสระ

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีเพื่อศึกษาอิทธิพลของการพาความร้อนอิสระที่เกิดขึ้น

ภายในเครื่องอบแห้งสภาวะเรือนกระจก ที่มีต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งยางพาราแผ่นค่าเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าออกจากระบบ และค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปปรับปรุงเครื่องอบแห้งสภาวะเรือนกระจกแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงต่อไป

วิธีการศึกษา

การศึกษางานวิจัยนี้แบ่งหัวข้อที่จะศึกษาออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ 1) เครื่องอบแห้งยางพาราแผ่นที่ใช้ในการทดลอง 2) วิธีการทดลอง 3) การวิเคราะห์พลังงานของระบบ และ 4) การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของระบบ แสดงต่อไปนี้

1. เครื่องอบแห้งยางพาราแผ่น

เครื่องอบแห้งยางพาราแผ่นที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกติดตั้งที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาทำงานจัดอยู่ในประเภทของการอบแห้งโดยอาศัยการพาความร้อนแบบอิสระและรับแสงโดยตรงจากดวงอาทิตย์ (free-convection direct type) ลักษณะของเครื่องอบแห้งมีรูปทรงสามเหลี่ยมเนื่องจากสามารถช่วยเร่งกระบวนการระเหยความชื้นของผลิตภัณฑ์อบแห้งจากด้านล่างไปสู่ด้านบนได้ดี ขนาดห้องอบแห้งเท่ากับ 1x1.6x1.5 เมตร (กว้างxยาวxสูง) ภายในมีแผ่นอะคริลิกใสกันโดยเจาะช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กไว้สำหรับระบายอากาศร้อนจากห้องอุ่นอากาศ (pre-heating room) ไปยังห้องอบแห้ง (drying room) ผืนของเครื่องอบแห้งจะใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเนื่องจากมีคุณสมบัติ

การเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ง่ายต่อการติดตั้งและมีน้ำหนักเบาสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย ด้านล่างของเครื่องอบจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมพ่นสีดำเพื่อทำหน้าที่สะสมความร้อนและช่วยในการแผ่รังสีความร้อน รายละเอียดทั้งหมดแสดงดัง (Figure 1)

การทำงานของเครื่องอบแห้งจะอาศัยคุณสมบัติของแผ่นโพลีคาร์บอเนต ที่ยอมให้รังสีจากดวงอาทิตย์ ผ่านลงมายังห้องอบ จนอุณหภูมิอากาศ

ภายในห้องสูงขึ้น ส่งผลให้อากาศลอยตัวขึ้นไปสู่บริเวณส่วนบนของเครื่องอบผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งพาความชื้นระบายออกทางด้านบน ต่อจากนั้นอากาศจากภายนอกจะไหลเข้ามาแทนที่จากด้านล่างผ่านแหล่งความร้อนสะสมคือแผ่นอะลูมิเนียมสีดำ แล้วไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งครบวงจรการทำงาน

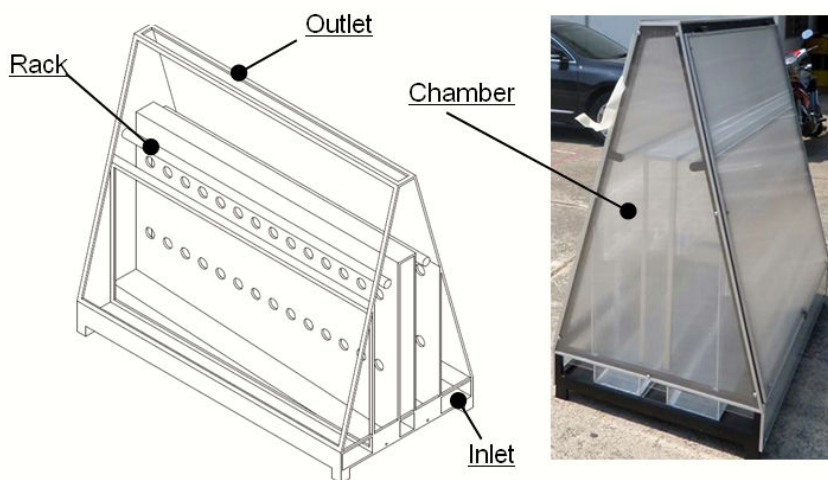


Figure 1 Schematic view of greenhouse dryer.

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของการพาความร้อนแบบอิสระที่มีต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่นโดยจะแยกการทดลองการออกเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ การปิดช่องลมภายในทุกช่องของเครื่องอบแห้งเพื่อไม่ให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์ และการเปิดช่องลมภายในทุกช่องของเครื่องอบแห้งเพื่อให้เกิดการพาความร้อนแบบอิสระไหลผ่านผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการทดลองโดยแขวนยางพาราแผ่น

จำนวน 4 แผ่นบนราวตาก ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ (dry-basis) ดำเนินการทดสอบในช่วงระหว่างเวลา 09.00-16.00 น. เป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวันและอบแห้งจนกระทั่งยางแผ่นมีความชื้นสุดท้ายที่ 2 เปอร์เซ็นต์ (dry-basis) เพื่อให้ได้คุณภาพทางกายภาพตามความต้องการของตลาด โดยติดตั้งหันไปทางทิศใต้ ทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ด้วย Pyranometer (Kipp & Zonen) model CM 11B ความละเอียด ± 2 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

ซึ่งมีความละเอียด ± 0.5 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลค่ารังสีและอุณหภูมิการทดลอง ทุกๆ 10 นาที โดยใช้ Data logger (Yokogawa) model MW 100 และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อ่านค่าจากเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Miras Sartorius ที่มีค่าความละเอียด 5 กรัม เก็บข้อมูลของน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง ทั้งสองกรณีศึกษาจะทำการทดลองซ้ำ (repeatability) 3 ครั้งเพื่อความแม่นยำของการทดลองแล้วนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการตากยางแผ่น โดยใช้ค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ซึ่งแสดงในสมการ (1) และเป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มการแห้งตัวของการตากยางในแต่ละกรณีศึกษาและการตากยางแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง

$$MR = \frac{MC_t - MC_{eq}}{MC_i - MC_{eq}} \quad (1)$$

เมื่อ MC_t คือ ค่าความชื้นที่เวลาใดๆ (%dry-basis) MC_i คือ ค่าความชื้นที่เวลาเริ่มต้น (%dry-basis) และ MC_{eq} คือ ค่าความชื้นสมดุล (%dry-basis) โดยการหาค่าของความชื้นสมดุลจะเลือกใช้สมการของ Halsey model (Tirawanichakul *et al.*, 2011) หลังจากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อเพื่อบ่งชี้ถึงความมีนัยสำคัญของการพาความร้อนแบบอิสระภายในเครื่องอบแห้งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3. การวิเคราะห์พลังงานของระบบ

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้อาศัยพื้นฐานจากหลักการที่ว่า พลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น เท่ากับปริมาณพลังงานความร้อนที่นำเข้า

สู่ระบบ ลบด้วยพลังงานที่สูญเสียไปเป็นงานของระบบที่กระทำต่อสิ่งแวดล้อม จึงนำมาประยุกต์ในการคำนวณ ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบ (system drying efficiency) และค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้น (pick-up efficiency)

ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์คำนวณได้จากสมการ (2) ซึ่งรายงานโดย Fudholi *et al.* (2013)

$$SEC = \frac{P_t}{W} \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kWh/kg) W คือ มวลของน้ำที่ระเหยไป (kg) และ P_t คือ พลังงานทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องอบแห้ง (kWh)

มวลของน้ำที่ระเหยไปจากผลิตภัณฑ์ (wet-basis) สามารถคำนวณได้จาก

$$W = \frac{m_o (MC_i - MC_f)}{100 - MC_f} \quad (3)$$

เมื่อ m_o คือ มวลเริ่มต้นทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ (kg) MC_i คือ ค่าความชื้นที่เวลาเริ่มต้น (%wet-basis) MC_f คือ ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ (%wet-basis)

ค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบ ซึ่งวิเคราะห์จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานทางความร้อนที่จ่ายให้เครื่องอบแห้ง (Fudholi *et al.*, 2012)

$$\eta_d = \frac{WL}{GA_c} \quad (4)$$

เมื่อ W คือ มวลของน้ำที่ระเหยไป (kg); L คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิของอากาศบริเวณทางออก (J/kg); A_c คือพื้นที่รับแสง (m^2)

ค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของการอบแห้งเป็นค่าที่มีประโยชน์สำหรับการประเมินการระเหยที่แท้จริงซึ่งจริงของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง โดยวิเคราะห์จากสัดส่วนของความสามารถในการสะสมความชื้นความสมบูรณ์ของอากาศในห้องอบแห้งต่อความสามารถในการสะสมความชื้นสมบูรณ์ของอากาศทางทฤษฎีแสดงดังสมการต่อไปนี้ (Banout et al., 2011)

$$\eta_p = \frac{h_0 - h_i}{h_{as} - h_i} \quad (5)$$

เมื่อ h_0 คือ ความชื้นสมบูรณ์ของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง (%); h_i คือ ความชื้นสมบูรณ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง (%); h_{as} คือ ความชื้นสมบูรณ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง adiabatic

$$\begin{aligned} \text{Exergy} = & \underbrace{(u - u_\infty)}_{\text{Internal}} - T_0 \underbrace{(s - s_\infty)}_{\text{Entropy}} + \underbrace{\frac{P_0}{J}(v - v_\infty)}_{\text{Work}} + \underbrace{\frac{V^2}{2gJ}}_{\text{Momentum}} + \underbrace{(z - z_\infty)\frac{g}{g_c J}}_{\text{Gravity}} + \underbrace{\sum_c (\mu - \mu_\infty)N_c}_{\text{Chemical}} \\ & + \underbrace{E_g A_g F_g (3T^4 - T_\infty^4 - 4T_\infty T^3)}_{\text{Radiation emission}} + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อตัวกำกับล่าง ∞ คือ สภาวะอ้างอิง ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์จินั้นเป็นการวิเคราะห์โดยเทียบกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้อ้างอิง โดยทั่วไปแล้ว

saturation (%); v คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s); ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3); t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

4. การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี้ของระบบ

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี้ของกระบวนการอบแห้งอย่างพาราแผ่นแบบการไหลธรรมชาตินั้น อยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ในการวิเคราะห์จะกำหนดสภาวะและขอบเขตทางเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้งให้อยู่ในสภาวะแบบคงตัว (steady state) เพื่อนำไปคำนวณหาเอ็กเซอร์จี้ที่ไหลเข้า (exergy inflow) เอ็กเซอร์จี้ที่ไหลออก (exergy outflow) และเอ็กเซอร์จี้ที่สูญเสีย (exergy loss) โดยเอ็กเซอร์จี้ที่คำนวณได้นั้นจะเป็นเอ็กเซอร์จี้ที่พิจารณา โดยที่ค่าเอ็กเซอร์จี้ี้สามารถคำนวณโดยใช้คุณลักษณะของสารทำงานตัวกลาง โดยอาศัยสมการสมดุลพลังงานของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (Midilli and Kucuk, 2003) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ในการวิเคราะห์การแปรเปลี่ยนเอ็กเซอร์จี้ของกระบวนการนั้น สามารถลดรูปของสมการลง โดยการตัดเทอมที่มีการแปรเปลี่ยนน้อยออก สำหรับระบบ

ที่มีการไหลแบบคงตัว (steady flow) และตัดอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง และไม่พิจารณาเทอมของเอนทัลปีในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความดันในระบบ จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจาก สมมติฐานที่ว่าอากาศเป็นก๊าซสมบูรณ์ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการ (7)

$$\text{Exergy} = \bar{c}_p \left[(T - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (7)$$

จากสมการ (7) ถู้นำไปใช้ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าและทางออกของกระบวนการอบแห้ง และสามารถหาการสูญเสียเอ็กเซอร์จี (exergy loss) โดยค่าทั้งหมดนั้นขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิของระบบการแห้งทั้งสิ้น ในการคำนวณเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าห้องอบแห้งและแพคเกจวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Ex}_{in} = \bar{c}_{pavg} \left[(T_i - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_i}{T_\infty} \right] \quad (8)$$

เมื่อ $\bar{c}_{pavg}$ คือ ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของลมร้อน ; T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง

สำหรับเอ็กเซอร์จีที่ไหลออกจากห้องอบแห้งและแพคเกจวัสดุพูนสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Ex}_{out} = \bar{c}_{pavg} \left[(T_o - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_o}{T_\infty} \right] \quad (9)$$

เมื่อ T_o คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกจากห้องอบแห้ง ปริมาณเอ็กเซอร์จีที่สูญเสีย (Ex_L) สามารถคำนวณได้โดยใช้ผลต่างของสมการ (8) และ (9)

$$\text{Ex}_L = \text{Ex}_{in} - \text{Ex}_{out} \quad (10)$$

ในการหาประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งนี้สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนเอ็กเซอร์จีของผลิตภัณฑ์ (หรือเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียของห้องอบแห้ง) ต่อเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าห้องอบแห้ง ดังนั้นรูปแบบทั่วไปของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกระบวนการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{\text{Ex}_L}{\text{Ex}_{in}} \quad (11)$$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาการหาค่าประสิทธิภาพของการพาความร้อนแบบอิสระที่มีต่อกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่น โดยใช้รูปแบบของเครื่องอบแห้งที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น สามารถแสดงผลการศึกษาออกเป็น 3 หัวข้อ คือ 1) ผลการอบแห้งยางพาราแผ่น 2) ผลจากการวิเคราะห์พลังงานและ 3) ผลจากการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

1. ผลการอบแห้งยางพาราแผ่น

ในการทดลองทั้งสองกรณีศึกษาทำการทดลอง 3 วันต่อเนื่องกันและทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งตั้งแต่วันที่ 25 มีนาคม 2557 ถึง 26 เมษายน 2557 ซึ่งผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องอบแห้งแต่ละกรณีศึกษาและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของทั้งสองกรณีศึกษาจะแสดงดัง (Figure 2)

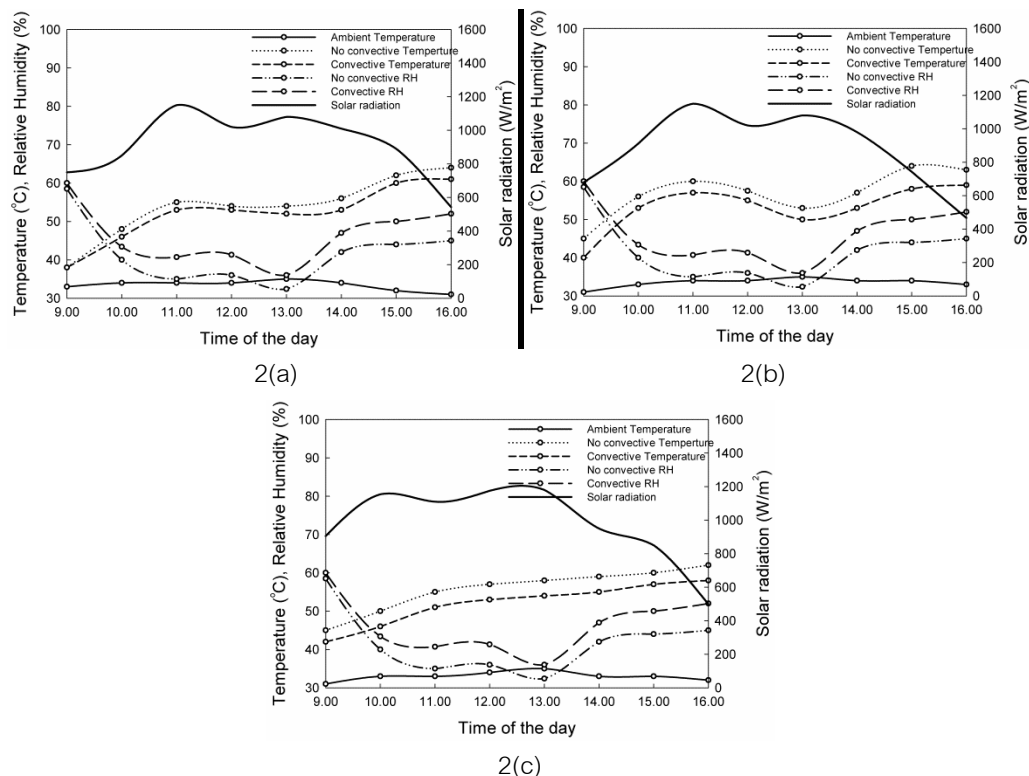


Figure 2 Variation of temperature, relative humidity and solar radiation; 2(a) First day, 2(b) Second day and 2(c) Third day.

(Figure 2) พบว่าค่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ทั้ง 3 วันของกรณีที่มีการพาความร้อนภายในจะน้อยกว่ากรณีไม่มีการพาความร้อนภายในซึ่งเป็นไปตามหลักการถ่ายเทความร้อนซึ่งส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของกรณีที่ไม่มีการพาความร้อนภายในจะสูงกว่าอีกกรณี ซึ่งเป็นไปตามหลักการไฮโครเมตริก และรังสี

ความร้อนจากดวงอาทิตย์เฉลี่ยในแต่ละวันมีค่าประมาณ 740, 780 และ 730 วัตต์ต่อตารางเมตรตามลำดับ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำกรณีศึกษาทั้งสองทำการเปรียบเทียบกับตารางแดดแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง โดยใช้ค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) เป็นตัวเปรียบเทียบแสดงดัง (Figure 3)

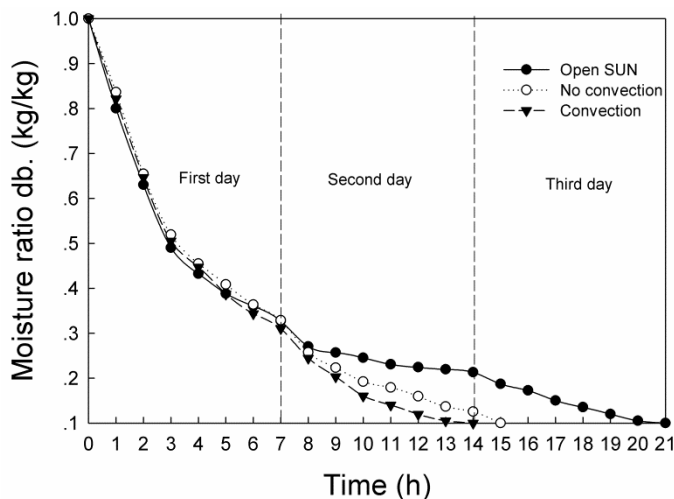


Figure 3 Variation of moisture ratio as a function of hours.

(Figure 3) เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ยางพาราแผ่นของกรณีที่มีการพาความร้อนภายในเร็ว ที่สุด ซึ่งใช้เวลา 14 ชั่วโมงของการอบแห้งและ 1 คืน สำหรับการตากทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งเร็วกว่ากรณีที่ไม่มีพาความร้อนภายในที่ใช้เวลา ในการอบแห้ง 15 ชั่วโมงของการอบแห้งและ 2 คืน สำหรับการตากทิ้งไว้ในสภาวะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และเร็วกว่าการตากแดดแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงถึง 7 ชั่วโมงการอบแห้งและ 1 คืนสำหรับการตากทิ้งไว้ใน สภาวะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม แต่ถ้าวิเคราะห์เฉพาะ วันแรกของการอบแห้งยางพาราแผ่นจะพบว่า การพาความร้อนผ่านแผ่นยางและการระบายความชื้น มีผลต่ออัตราส่วนความชื้นของยางแผ่นอย่างมาก

พิจารณาได้จากกรณีตากแดดโดยตรงและกรณีศึกษา ที่มีการพาความร้อนภายใน แนวโน้มของการแห้งตัวจะ เร็วกว่ากรณีที่ศึกษาที่ไม่มีพาความร้อนภายในอย่าง ชัดเจน จากนั้นผู้วิจัยนำตัวแปรการพาความร้อนใน ไปศึกษาต่อในการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จี

2. ผลจากการวิเคราะห์พลังงาน

ในการวิเคราะห์พลังงานจะใช้ตัวบ่งชี้ 3 ค่า คือ ค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าประสิทธิภาพ ของการอบแห้งของระบบ และค่าประสิทธิภาพการ สะสมความชื้น โดยใช้ข้อมูลการอบแห้งตลอด 3 วัน (Figure 2) ค่าทั้งสามคำนวณจากสมการ (2) (4) และ (5) ตามลำดับ โดยแสดงใน Table 1

Table 1 Performance evaluation of the rubber sheet drying.

parameters	no convection	convection	unit
average drying temperature (3 days)	54	50	°C
initial moisture content (dry-basis)	35-40	35-40	%
final moisture content (dry-basis)	1-2	1-2	%
average solar radiation	750	750	W/m ²
initial mass of rubber sheet (2 sheets)	2.77	2.80	kg
mass of water removed (14 h)	0.50	0.65	kg
specific energy consumption (14 h)	1.50	1.15	Kwh/kg
drying efficiency (to 2% dry-basis)	41.00	43.50	%
absolute humidity of air leaving the drying room	0.03	0.04	kg/m ³
pick-up efficiency (to 2% dry-basis)	30	31.50	%

จาก Table 1 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ของทั้งกรณีอบแห้งแบบมีการพาความร้อนอิสระ และกรณีอบแห้งแบบไม่มีการพาความร้อนอิสระพบว่า กรณีการพาความร้อนแบบอิสระนั้น ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องอบแห้งลดลง 4 องศาเซลเซียส แต่กลับส่งผลให้ค่ามวลน้ำที่ระเหยออกในกระบวนการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 18 เป็น 23 เปอร์เซ็นต์ ของมวลยางแผ่นเริ่มต้น ค่าประสิทธิภาพการอบแห้งและค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของการอบแห้งเพิ่มขึ้น 6 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากกรณีการพาความร้อนนั้นมีการเปิดช่องลมเพื่อให้ลมร้อนไหลผ่านแผ่นยางพาราทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่สะสมจึงส่งผลให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งลดลง อย่างไรก็ตามความชื้นที่สูญเสียออกไปนั้นได้พาความชื้นที่เกาะตามผิวยางพาราออกไปในเวลาเดียวกันจึงส่งผลให้มวลน้ำที่ระเหยออกมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการอบแห้งเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการ (4) และผลจาก

พฤติกรรมการอบแห้งของกรณีดังกล่าวยังส่งผลให้ค่าความชื้น-สัมบูรณ์ของอากาศที่ระบายออกจากห้องอบแห้งมีค่ามากขึ้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของการอบแห้งเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการ (5)

3. ผลจากการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีของระบบการอบแห้ง จุดประสงค์เพื่อต้องการทราบ เอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าระบบ เอ็กเซอร์จีที่ไหลออกจากระบบ เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียไปจากระบบ และประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของตัวแปรการพาความร้อนอิสระที่เกิดขึ้นภายในห้องอบแห้ง ยางพาราแผ่นโดยทำการวิเคราะห์เพียง 2 วันของการอบแห้งเท่านั้นเนื่องจากกระบวนการอบแห้งยางพาราแผ่นกรณีที่มีการพาความร้อนอิสระเสร็จสิ้นที่เวลาดังกล่าว ผลของเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าระบบ เอ็กเซอร์จี

ที่ไหลออกจากระบบและเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียไป
จากระบบของทั้งสองกรณีแสดงดัง (Figure 4) และผล

ของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีแสดงดัง (Figure 5)

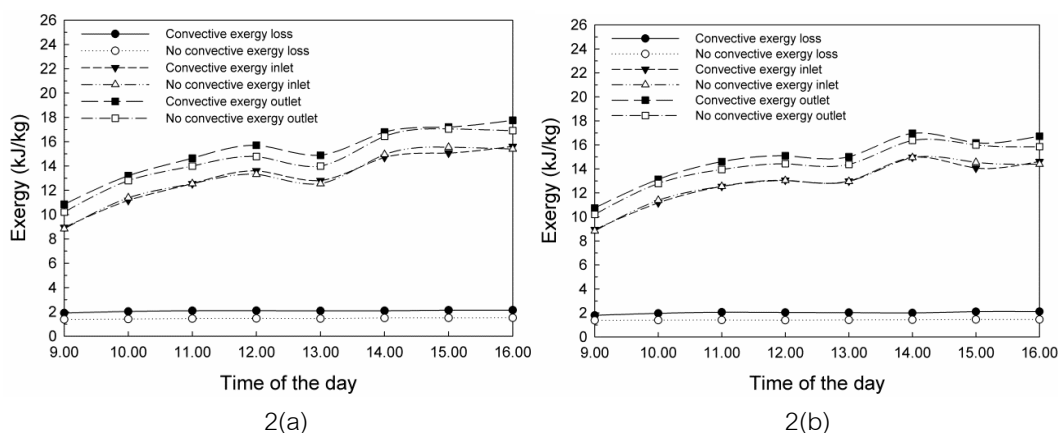


Figure 4 Variation of exergy inlet, exergy outlet and exergy loss; 2(a) First day and 2(b) Second day.

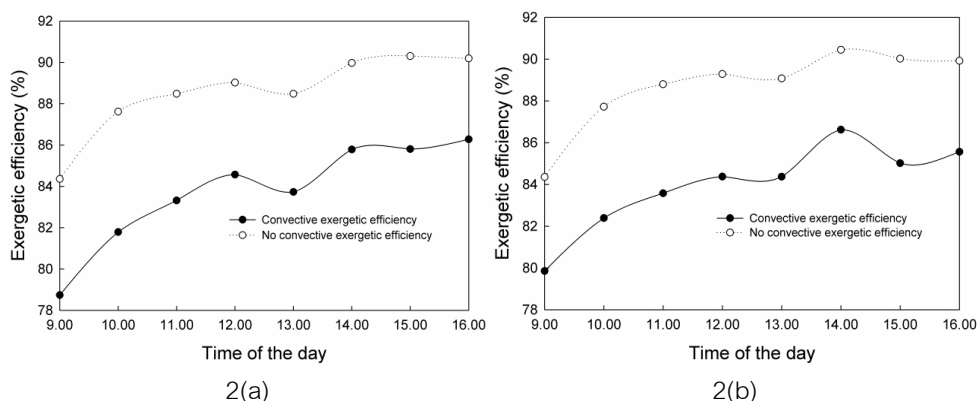


Figure 5 Variation of exergetic efficiency; 2(a) First day and 2(b) Second day.

(Figure 4) แนวโน้มของเอ็กเซอร์จีที่ไหลเข้าระบบ
ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากค่าอุณหภูมิ
ทางเข้ามีค่าไม่แตกต่างกัน และแนวโน้มของเอ็กเซอร์จี
ที่ไหลออกจากระบบของกรณีที่มีการพาความร้อน
จะน้อยกว่ากรณีไม่มีการพาความร้อนเนื่องจาก
ค่าอุณหภูมิที่ทางออกมีค่าต่ำกว่าซึ่งเป็นผลมาจาก
ความชื้นที่ผิวของพาราแผ่นได้ถูกนำพาออกมามากขึ้น
ซึ่งพิจารณาได้จาก (Figure 2) และ (Figure 3) ตามลำดับ

ส่วนเอ็กเซอร์จีที่สูญเสียจากระบบ สมการ (10)
ของกรณีการพาความร้อนมีค่ามากกว่ากรณี
ไม่พาความร้อนเนื่องจาก เอ็กเซอร์จีที่สูญเสียไป
ในระบบนั้นถูกนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้ง
ในขั้นตอนการระเหยน้ำในแผ่นยางพาราแผ่น
ซึ่งแสดงออกมาในรูปของอุณหภูมิทางออกของระบบ
และยังส่งผลให้แนวโน้มของค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี
ของกรณีที่มีการพาความร้อนมีค่าน้อยกว่ากรณี

ที่ไม่มีการพาความร้อนซึ่งแสดงดัง (Figure 5) ดังนั้นความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการอบแห้งและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีจึงมีรูปแบบที่ผกผันกัน ผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Prommas *et al.*, (2010)

สรุป

ในการศึกษาการวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของกระบวนการการอบแห้งยางพาราแผ่นเพื่อค้นหาความมีนัยสำคัญของอิทธิพลการพาความร้อนอิสระที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้งแบบสภาวะเรือนกระจก พบว่าที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 750 วัตต์ต่อตารางเมตร และค่าช่วงอุณหภูมิของการอบแห้ง 40-60 องศาเซลเซียส อิทธิพลการพาความร้อนอิสระสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งของระบบได้ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ และยังเพิ่มค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นของอากาศในการอบแห้งถึง 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพทั้งสองที่ได้จากเครื่องอบแห้งที่ไม่มีการพาความร้อนอิสระ แต่การพาความร้อนอิสระกลับส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีเฉลี่ยมีค่าลดลง 4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากค่าเอ็กเซอร์จีที่สูงสูญเสียภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้จะเป็นการเพิ่มพลังงานในการอบแห้งให้น้ำระเหยออกจากยางพาราแผ่นแทนจึงได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการอบแห้งและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จินั้นมีรูปแบบที่ผกผันกัน ส่วนค่าประสิทธิภาพของการอบแห้งและค่าประสิทธิภาพการสะสมความชื้นนั้นมีรูปแบบที่แปรผันตรงกัน ค่าประสิทธิภาพทั้งสามสามารถใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบการอบแห้งให้เพิ่มขึ้นได้ เนื่องจาก

ครอบคลุมทั้งด้านการวิเคราะห์พลังงานและการนำมาใช้จริง นอกจากนี้งานในอนาคตจะทำการศึกษาอิทธิพลของการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ต่อไป

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aghbashlo, M., H. Mobli, Sh. Rafiee and A. Madadlou. 2013. A review on exergy analysis of drying processes and systems. *Renew Sust energy Rev* 22: 1-22.
- Banout, J., P. Ehl, J. Havlik, B. Lojka, Z. Polesny and V. Verner. 2011. Design and performance evaluation of a double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annuum* L.). *Solar Energy* 85: 506-525.
- Fudholi, A., M.H. Ruslan, M.Y. Othman, M.S.M. Azmi, A. Zaharim and K. Sopian. 2012. Drying of palm oil fronds in solar dryer with finned double-pass solar collectors, *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer* 4 (7): 105-114.
- Fudholi, A., M.Y. Othman, M.H. Ruslan and K. Sopian. 2013. Drying of Malaysian *Capsicum annuum* L. (red chili) dried by open and solar drying. *Int J Photoenergy*. 1-9.
- Kaewkiew, J., S. Nabnean and S. Janjai. 2011. Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for

- drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering* 32: 433-439.
- Midilli, A. and H. Kucuk. 2003. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. *Energy* 28: 539-556.
- Mustayen, A.G.M.B., S. Mekhilef and R. Saidur. 2014. Performance study of different solar dryers: A review. *Renew Sust energ Rev* 34: 463-470.
- Ninchuewong, Th., A. Ekphon, S. Tirawanichakul and Y. Tirawanichakul. 2012. Drying of air dried sheet rubber using hot air dryer and solar dryer for small entrepreneurs and small rubber cooperatives. *Burapha Sci. J.* 17 (2): 50-59.
- Office of the rubber replanting aid fund. 2014. Current rubber price. (online). Available: [http://www.rubber.co.th/rubber 2012/menu5.php](http://www.rubber.co.th/rubber%2012/menu5.php) (20 May 2014).
- Prakash, O. and A. Kumar. 2014. Solar greenhouse drying: A review. *Renew Sust energ Rev* 29: 905-910.
- Prommas, R., Ph. Rattanadecho and D. Cholaseuk. 2010. Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air. *Int Commun Heat Mass* 37: 372-378.
- Tirawanichakul, Y., W. Suchonpanit and S. Tirawanichakul. 2011. Sorption isotherm and liquid diffusion model for unsmoked sheet rubber drying. pp. 167-173. *In: Proceeding the 2011 International conference on alternative energy in developing countries and emerging economies*, May 25-26, 2011. HatYai, Songkhla, Thailand.