

สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมของผลพลับ

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ^{1*} อารีย์ อัจฉริยวิริยะ² และธนิดา เกตุวิจิตรชัย³

siva@dome.eng.cmu.ac.th^{1*}, aree@dome.eng.cmu.ac.th², ni.ketwijitchai@gmail.com³

^{1*-3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Received : 30-Apr-2019
Revised : 8-Aug-2019
Accepted : 29-Aug-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งผลพลับที่เหมาะสม ด้วยการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 45°C, 55°C และ 65°C ที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 1 m/s ผลพลับที่ใช้มีขนาดของรัศมีเฉลี่ยในช่วง 2.9 ถึง 3.1 เซนติเมตร พลับมีความชื้นเริ่มต้น 470±10% มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนพลับมีความชื้นลดลงเหลือ 30±2 % มาตรฐานแห้ง จากการนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีที่สมมติให้พลับมีลักษณะเป็นทรงกลม และหาค่าคงที่การอบแห้งด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีรูปแบบต่าง ๆ และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ใช้การฟิตข้อมูลการทดลองเข้ากับสมการรูปแบบต่างดังกล่าวด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด การหาสมการจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยในการตัดสินใจ ซึ่งพบว่า สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการณ์การลดลงของความชื้นของพลับได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด

คำสำคัญ: พลับอบแห้ง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ค่าคงที่การอบแห้ง

Drying Kinetics Equations of Persimmon Fruit

Siva Achariyaviriya^{1*}, Aree Achariyaviriya², Thanida Ketwijitchai³
siva@dome.eng.cmu.ac.th^{1*}, aree@dome.eng.cmu.ac.th², ni.ketwijitchai@gmail.com³

^{1*,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University

Received	: 30-Apr-2019
Revised	: 8-Aug-2019
Accepted	: 29-Aug-2019

Abstract

The objective of this research is to develop the drying kinetics equations of persimmons fruits. The experiments were carried out at drying air temperatures of 45°C, 55°C and 65°C with a constant hot air velocity of 1 m/s. The average fruit radii varied between 2.9 and 3.1 cm. The initial moisture content was about 470±10% on a dry-basis. The drying process continued until the final fruit moisture content was about 30±2 % on a dry-basis. Drying kinetic equations such as the theoretical model, semi-theoretical model and empirical model were studied. The parameters of those equations such as the effective diffusion coefficients and the drying constant were determined and developed by the method of least squares. The values of the coefficient of determination, root mean square error and mean absolute percentage error were used for selecting the appropriate equation. For drying kinetics, the best fit with the experiment data was the Page equation.

Keywords: Dried persimmon, Drying kinetics, Effective moisture diffusivities, Drying constant.

1. บทนำ

พลับเป็นผลไม้ลักษณะค่อนข้างกลม ผิวเรียบ ผลพลับมีสีเหลืองจนถึงแดงส้มซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Diospyros kaki* L. สามารถแบ่งออกได้เป็นสองสายพันธุ์ใหญ่ๆ คือ พลับพันธุ์ฝาด (Astringent) ซึ่งผลพลับจะมีรสฝาดและพลับพันธุ์หวาน (Non-Astringent) ซึ่งผลจะมีรสหวาน พลับได้รับความนิยมในการบริโภคเนื่องจากมีรสชาติหวานหอม สีสันที่สวยงาม การบริโภคพลับมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ให้แคลอรีที่ต่ำ มีส่วนกากใยอาหารที่สูง [1] พลับยังมีวิตามินซี (Vitamin C) วิตามินเอ (Vitamin A) น้ำตาลฟรุคโทส (Fructose) และน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ในปริมาณที่สูง [2] ซึ่งล้วนเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายทั้งสิ้น จากคุณประโยชน์ของพลับที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจึงส่งผลให้พลับเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคสูงทั้งในทวีปเอเชีย ได้แก่ ประเทศจีน เกาหลี ญี่ปุ่น ไทย รวมไปถึงทวีปยุโรป การเพาะปลูกพลับในประเทศไทย ครั้งแรกอยู่ในช่วงปีพุทธศักราช 2471 โดยนำเข้ามาจากประเทศจีน พลับได้รับความนิยมเพาะปลูกในเขตภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากมีลักษณะภูมิประเทศที่เป็นเทือกเขาสูง มีสภาพอากาศที่หนาวเย็นเหมาะสมแก่การเพาะปลูก [3] สำหรับการเพาะปลูกพลับของชนเผ่าพื้นเมืองที่สูงในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่หมู่บ้านดอยสามหมื่น ซึ่งเป็นหมู่บ้านหนึ่งในเทือกเขาถนนธงชัย ตั้งอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติห้วยน้ำดัง ห่างจากตัวเมืองเชียงใหม่ประมาณ 150 กิโลเมตร หมู่บ้านดอยสามหมื่นได้นำพันธุ์พลับ ซึ่งเป็นพืชเมืองหนาวเข้าไปปลูกในพื้นที่ พบว่าพลับสามารถเพาะปลูกได้เป็นอย่างดี ให้ผลผลิตพลับที่มีคุณภาพ สีสันสวยงาม รสชาติหวานหอม แสดงดังรูปที่ 1 แต่หมู่บ้านดอยสามหมื่นกลับประสบปัญหาด้านการขนส่งผลผลิตพลับออกไปจำหน่ายในตัวเมืองเชียงใหม่และพื้นที่ใกล้เคียงเนื่องจากพลับจะออกผลผลิตและเก็บเกี่ยวได้

ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตรงกับช่วงฤดูฝนของประเทศไทย ประกอบกับเส้นทางเข้าออกหมู่บ้านสามหมื่นนั้นยังคงเป็นดินลูกรัง ลัดเลาะไปตามเทือกเขา จึงส่งผลให้การคมนาคมไม่สะดวก ถนนถูกตัดขาดเป็นบางช่วง ผลผลิตพลับที่เก็บเกี่ยวไว้ในหมู่บ้านจึงไม่สามารถนำออกมาจำหน่ายได้ จึงเกิดความเสียหายและเน่าเสียของผลผลิตพลับขึ้น ดังนั้นเพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าวพลับที่ถูกเก็บเกี่ยวไว้จะถูกนำออกมาแปรรูปเพื่อยืดอายุเวลาการเก็บรักษา และเพิ่มมูลค่า สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมในการแปรรูปพลับ ได้แก่ การทำพลับแห้ง



รูปที่ 1 ผลผลิตพลับในหมู่บ้านดอยสามหมื่น จ. เชียงใหม่

การทำพลับแห้ง เป็นวิธีแปรรูปเพื่อยืดอายุเวลาเก็บรักษาผลผลิตพลับให้นานขึ้น เป็นวิธีที่ทำกันมาตั้งแต่สมัยโบราณในประเทศจีน และประเทศญี่ปุ่น โดยจะทำการตากแห้ง และแขวนตากแห้ง แต่สำหรับวิธีการดังกล่าวนี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมขณะทำการตากแห้งได้ ส่งผลให้คุณภาพของพลับที่ทำการตากแห้งในแต่ละครั้งจึงไม่คงที่ ดังนั้นจึงมีการนำเครื่องอบแห้งเข้ามาใช้ในการอบแห้งพลับมากขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ชุมชนดอยสามหมื่นยังได้รับเครื่องอบแห้ง [4] เพื่อนำไปอบแห้งผลผลิตการเกษตรใน

พื้นที่สูงแต่ชาวบ้านยังขาดความรู้ด้านการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาด้านการอบแห้งเพื่อแนะนำชาวบ้านในชุมชนต่างๆต่อไป

สำหรับการอบแห้งนั้นมีพารามิเตอร์ที่จำเป็น ได้แก่ ความชื้นสมมูล ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ข้อมูลพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญในการนำไปวิเคราะห์และจำลองกระบวนการอบแห้งเพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจนถึงการนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและนำไปสู่การใช้พลังงานในการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องจะพบว่ายังไม่ปรากฏข้อมูลในส่วนของการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของพลับ สำหรับของสมการความชื้นสมมูล ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ธนิตาและคณะ [5] ได้นำเสนอในบทความเรื่องสมบัติทางกายภาพและเชิงความร้อนของพลับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของพลับเพื่อใช้ประโยชน์ในการทำพลับอบแห้งต่อไป

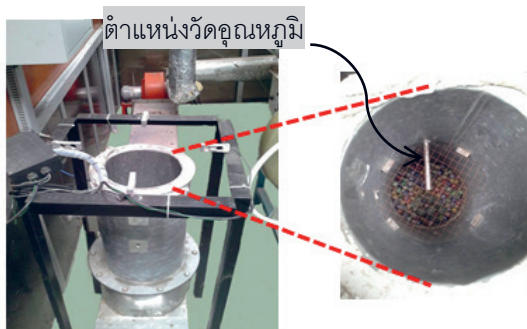
จลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์และจำลองกระบวนการอบแห้ง ซึ่งใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การลดลงของความชื้น โดยสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งนั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และมีความคงที่ของการอบแห้งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่อบแห้ง โดยค่าคงที่ดังกล่าวจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้ ญัฐพล และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้แบบชั้นบางโดยใช้เครื่อง

อบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบปิด มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ใช้ในการศึกษานั้นมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 4.50 – 5.20 dry basis ในการทดลองทำการสไลด์มะม่วงน้ำดอกไม้ออกเป็นชิ้น ๆ ขนาด 1.0 cm x 3.0 cm x 0.7 cm จากนั้นนำไปอบด้วยก๊าซร้อนชนิดต่างๆที่ใช้ในการพาความร้อนไปยังมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยก๊าซที่ใช้การศึกษาได้แก่ อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ทำการทดลองอบที่อุณหภูมิ 50 °C, 60 °C และ 70 °C ทดลองที่ความเร็วของก๊าซตัวกลางเท่ากับ 0.5 m/s ทำการอบแห้งจนกระทั่งมะม่วงน้ำดอกไม้สไลด์มีค่าความชื้นเท่ากับ 0.28 dry basis จากการทดลองพบว่า สมการที่สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการณ์การลดลงของความชื้นตามรูปแบบของ Page, Two-term และ Logarithmic สามารถใช้ทำนายการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สไลด์ที่ทำกรอบแห้งโดยใช้ตัวกลางเป็นก๊าซต่าง ๆ นั้น มีค่าการลดลงที่ไม่แตกต่างกัน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งต่ำที่สุด Doymaz [7] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งพลับสไลด์แบบชั้นบางด้วยลมร้อนทางทฤษฎี เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและผลของการทำ blanching ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D) โดยการนำชิ้นพลับที่สไลด์ไปการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 70 °C ที่เวลา 2 min แล้วทำให้ชิ้นพลับสไลด์เย็นลงโดยใส่ลงในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 50 °C 60 °C และ 70 °C ที่ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 2±0.1 m/s ความชื้นเริ่มต้นของชิ้นพลับสไลด์เท่ากับ 75.2 % มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งจนความชื้นของชิ้นพลับสไลด์มีค่าเท่ากับ 20 % มาตรฐานเปียก ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นพลับสไลด์ที่ผ่านการทำ

blanching จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D) มีค่าสูงกว่า ส่วนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งขึ้นพลัสไลต์นั้น มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น Zhu and Shen [8] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพืชสไลต์ที่ความเร็วในการอบแห้ง และความหนาของพืชสไลต์ต่างๆ ด้วยลมร้อน ในทดลองจะใช้พืชที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.81 dry basis ทำการทดลองโดยสไลต์พืชให้มีขนาดเท่ากับ 0.04 x 0.02 x 0.002 m , 0.04 x 0.02 x 0.003 m และ 0.04 x 0.02 x 0.004 m ตามลำดับ ซึ่งความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 0.423 m/s 0.598 m/s 0.733 m/s 0.946 m/s 1.120 m/s อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 60 °C 65 °C 70 °C 75 °C และ 80 °C จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่สูง โดยที่มีความหนาของขึ้นพลัสไลต์บางสุด มีระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่ำสุด สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งตามรูปแบบของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการลดลงของอัตราส่วนความชื้นของพืชสไลต์ที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 60 - 80 °C ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านที่ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งเช่น Thanutyot *et. al.* [9] ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด Paradorn *et. al.* [10] ศึกษาแบบจำลองและจลนพลศาสตร์การอบแห้งของลำไยทั้งลูกโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน สารภี และคณะ [11] ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง Kritsna and Siva [12] ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการ

พลัสที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้เป็นพลัสพันธุ์ชื่อโจหรือชีชู (P2) โดยจัดซื้อจากมูลนิธิโครงการหลวง ตำบลสุเทพ จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำพลัสที่ผ่านกระบวนการลดความฝาดเรียบร้อยแล้ว ซึ่งการลดความฝาดใช้วิธีพื้นบ้าน กล่าวคือใช้ใบไม้ใส่ไว้ในถุงพลัสแล้วปิดปากถุงทิ้งไว้ค้างหนึ่งคืน จากนั้นทำความสะอาดพลัสด้วยการล้างน้ำแล้วจึงปอกเปลือกทิ้งผลแต่ไม่ตัดขั้ว พลัสที่เตรียมเสร็จมีระดับความสุกปานกลาง มีน้ำหนักลูกละ 90 ± 3 กรัม ความชื้นเริ่มต้น $470 \pm 10\%$ มาตรฐานแห้งกำหนดความชื้นสุดท้ายที่ $30 \pm 2\%$ มาตรฐานแห้ง ทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องทดสอบการอบแห้งชั้นบาง ดังรูปที่ 2 ที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 45°C, 55°C และ 65°C ความเร็วลมร้อน 1 ± 0.1 m/s วัดโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิตอลของ Digicon Model. DA-40 ขณะทำการทดลองทำการบันทึกน้ำหนัก และรัศมีของตัวอย่างพลัส ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด ± 0.001 g ของ Sartorius CP 323s และเวอร์เนียร์ดิจิตอลความละเอียด ± 0.01 mm ของ Mitutoyo CD-8' csx พร้อมกับทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมโดยใช้อุปกรณ์วัดของ Testo 650 ความละเอียดของการวัดอุณหภูมิเท่ากับ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ และความละเอียดของการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของลมเท่ากับ 0.1% อบแห้งจนพลัสมีความชื้น 30% มาตรฐานแห้ง จากนั้นทำการหามวลแห้งโดยอบแห้งตัวอย่างพลัสต่อที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h จะได้น้ำหนักแห้งของพลัสเพื่อใช้คำนวณหาค่าความชื้น โดยที่แต่ละอุณหภูมิทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการอบแห้งชิ้นบาง

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งจะถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (MR) ของพลับที่เวลาการอบแห้งต่างๆ โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

อัตราส่วนความชื้น นั้น นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นที่เวลาใดๆ (M) และความชื้นเริ่มต้น (M_{in}) แล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับความชื้นสมดุล (M_{eq}) อีกด้วย โดยสามารถคำนวณหาความชื้นสมดุลได้จากสมการความชื้นสมดุลของพลับที่พัฒนาโดย ธนิตา และคณะ [5] ดังสมการที่ (2)

$$M_{eq} = (0.39557 - 0.00338T) \left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right)^{\frac{1}{1.974396}} \quad (2)$$

ความชื้นสมดุลจะมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิ (T หน่วยเป็นองศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน (ϕ หน่วยเป็นทศนิยม)

เมื่อได้ข้อมูลผลการทดลองในส่วนของอัตราส่วนความชื้นและรัศมีของตัวอย่างพลับที่เวลาต่างๆ แล้วจะทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของพลับโดยใช้สมการทั้ง 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการทางทฤษฎีที่สมมุติให้พลับมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยใช้ 500 เทอมแรกซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วน

ความชื้นเริ่มต้นมีค่าละเอียดเพียงพอ (MR มีค่าประมาณเท่ากับ 1) มีรูปแบบดังสมการที่ (3), สมการกึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton ดังสมการที่ (4) รูปแบบของ Henderson and Pabis ดังสมการที่ (5), รูปแบบของ Logarithmic ดังสมการที่ (6) และสมการเอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page ดังสมการที่ (7)

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{i=1}^{500} \left[\left(\frac{1}{i^2} \right) \exp \left(\frac{-3600 i^2 \pi^2 D t}{r^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$MR = \exp(-kt) \quad (4)$$

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5)$$

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (6)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (7)$$

โดยที่พารามิเตอร์ในสมการต่างๆ มีดังนี้
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2 / s
 t คือ เวลา, h

3600 จำนวนแปลงหน่วยเวลา ชั่วโมงเป็นวินาที

r คือ รัศมีของตัวอย่างพลับ, mm

k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

a, c, n คือ ค่าคงที่

การหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละสมการนั้นจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองปัดเข้ากับสมการต่างๆ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจะนำไปหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของสมการต่างๆ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) และคงที่ของการอบแห้ง (k) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9) สำหรับค่าคงที่ a, c และ n จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่เฉลี่ยไม่แปรผันตามอุณหภูมิของลมร้อนเพื่อเป็นการลดจำนวนพารามิเตอร์ลง

$$D = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{R(T+273.15)} \right) \quad (8)$$

$$k = d \exp (eT) \quad (9)$$

เมื่อ D_0 คือ Arrhenius factor, m^2 / s

E_a คือ พลังงานการกระตุ้น, kJ/mol

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ, $kJ/mol \cdot K$

d, e คือ ค่าคงที่

บรรทัดฐานในการตัดสินใจความแม่นยำของสมการต่างๆ ในการทำนายผลนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, $RMSE$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, $MAPE$) ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณได้จากสมการที่ (10), (11) และ (12) ตามลำดับ

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2}{m}} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ $\bar{y}$ คือ ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยผลการทดลอง

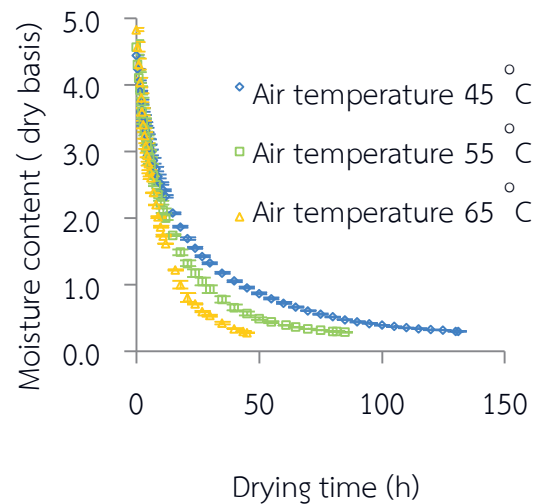
y_i คือ พารามิเตอร์จากสมการทางคณิตศาสตร์

$\hat{y}_i$ คือ พารามิเตอร์ที่ได้ตามผลการทดลอง

m คือ จำนวนข้อมูล

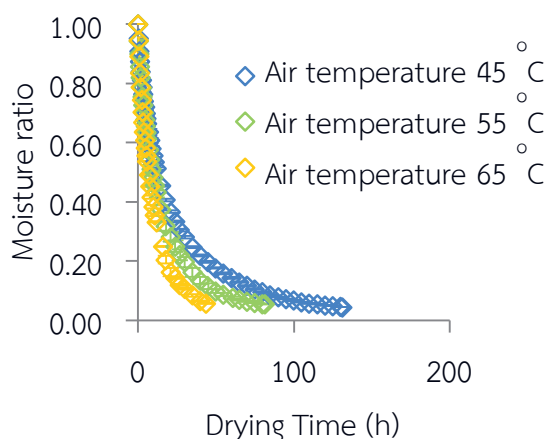
3. ผลและวิจารณ์

จากการทดลองอบแห้งพลับด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ $45^\circ C$, $55^\circ C$ และ $65^\circ C$ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ให้ผลพลับอบแห้งมีคุณภาพที่รับได้ [13] ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1 m/s ได้ผลการทดลองของการลดลงความชื้นพลับของการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิลมร้อนเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการทดลองหาการลดลงของความชื้นพลับที่อุณหภูมิลมร้อนต่างๆ

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้ความชื้นของพลับลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิที่ต่ำซึ่งให้ผลทำนองเดียวกับผลไม้ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้าง จึงแปลงความชื้นให้อยู่ในรูปความชื้นไร้หน่วยโดยใช้สมการที่ (1) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาได้ดังรูปที่ 4

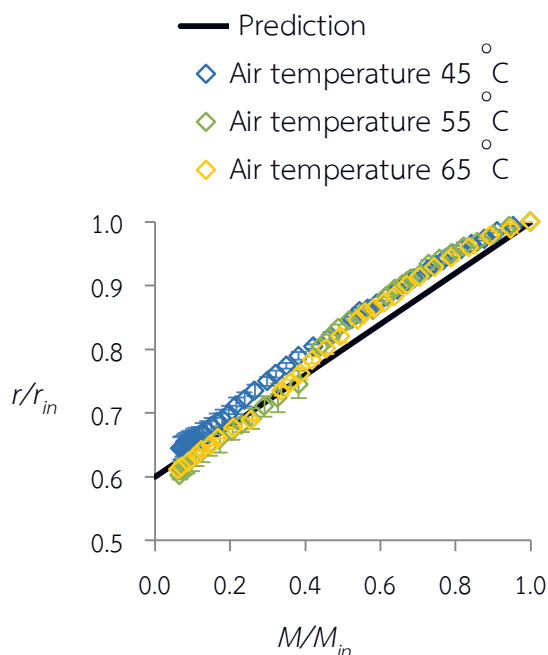


รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นของผลพลับด้วยเวลาที่เวลาอบแห้งต่างๆ

เนื่องจากระหว่างการอบแห้ง พลั้บจะมีการหดตัวและการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี จำเป็นต้องใช้รัศมีในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาสมการการหดตัวของพลั้บระหว่างการอบแห้งซึ่งพบว่าพลั้บจะเกิดการหดตัว ส่งผลให้รัศมีของพลั้บลดลง จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้น ($\frac{r}{r_{in}}$) กับสัดส่วนความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น ($\frac{M}{M_{in}}$) ของพลั้บได้ดังสมการที่ (13)

$$\frac{r}{r_{in}} = 0.40 \frac{M}{M_{in}} + 0.60 \quad (13)$$

เมื่อนำผลการทดลองเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ (13) มาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า พลั้บที่ความชื้นเดียวกัน ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิร้อน 45°C, 55°C และ 65°C จะมีการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน สมการที่ (13) สามารถทำนายค่าสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลผลการทดลอง จากการวิเคราะห์ความแม่นยำด้วยหลักการทางด้านสถิติ พบว่าค่า R^2 , $RMSE$ และ $MAPE$ เท่ากับ 0.852 0.027 และ 2.894 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้นกับสัดส่วนความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น

3.1 สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งพลั้บทางทฤษฎีนั้นจะใช้ข้อมูลการทดลองของแต่ละอุณหภูมิที่เวลาการอบแห้งใดๆ เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการที่ (1) และคำนวณหารัศมีของพลั้บโดยใช้สมการที่ (13) เพื่อพิตข้อมูลเข้ากับสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี [สมการที่ (3)] โดยมีสมมติฐานที่ว่า พลั้บมีขนาดคงที่ในช่วงเวลาการอบแห้งสั้นๆ การพิตข้อมูลนี้ใช้ช่วงเวลาเท่ากับ 0.5 ชั่วโมง จากการพิตข้อมูลสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแต่ละการทดลอง จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิโดยให้ความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการที่ (8) ได้ผลดังสมการที่ (14)

$$D = 7.72 \times 10^{-5} \exp \left[\frac{-32.641}{R(T+273.15)} \right] \quad (14)$$

3.2 สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีและเอมพิริคัล

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลพลับที่ทฤษฎีและเอมพิริคัลนั้นจะใช้ข้อมูลการทดลองของแต่ละอุณหภูมิที่เวลาการอบแห้งใดๆ เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการที่ (1) เพื่อฟิตข้อมูลเข้ากับสมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton [สมการที่ (4)] ตามรูปแบบของ Henderson and Pabis [สมการที่ (5)] ตามรูปแบบของ Logarithmic [สมการที่ (6)] และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลรูปแบบของ Page [สมการที่ (7)] จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่การอบแห้งของแต่ละรูปแบบกับอุณหภูมิโดยให้ความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการที่ (9) ได้ผลดังสมการที่ (15) ถึง สมการที่ (18) ตามลำดับ

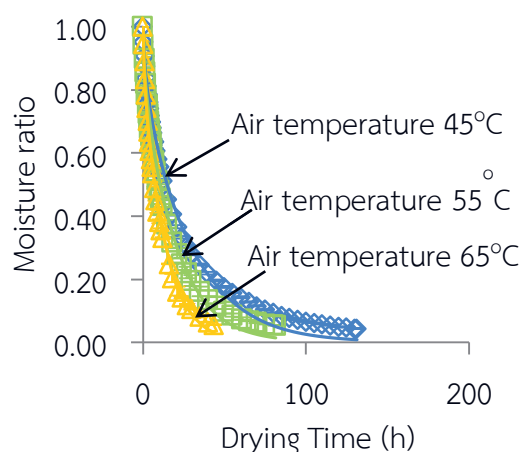
$$k = 0.010682 \exp(0.034050T) \quad (15)$$

$$k = 0.007871 \exp(0.036395T) \quad (16)$$

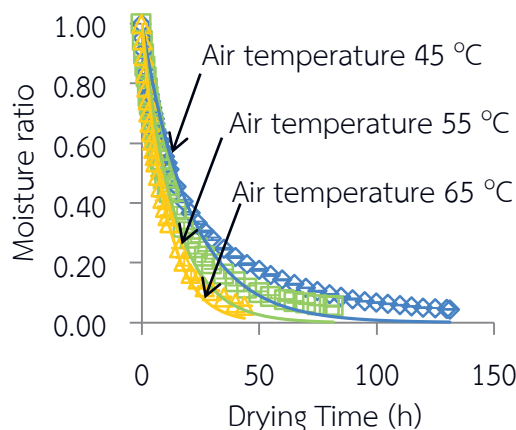
$$k = 0.0012082 \exp(0.033180T) \quad (17)$$

$$k = 0.029304 \exp(0.026516T) \quad (18)$$

การหาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลพลับที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Newton สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Henderson and Pabis สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Logarithmic และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลของ Page ตามลำดับ แสดงได้ดัง รูปที่ 6 ถึงรูปที่ 10



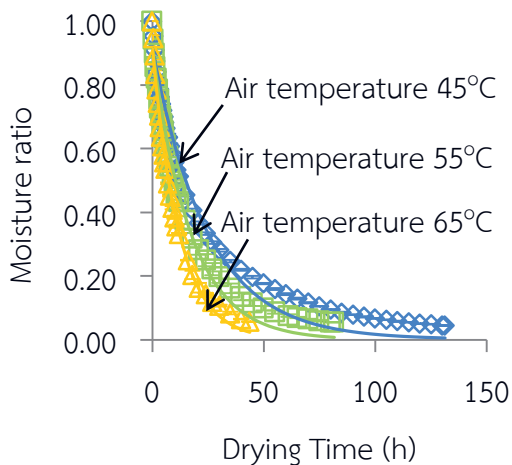
รูปที่ 6 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการทางทฤษฎี



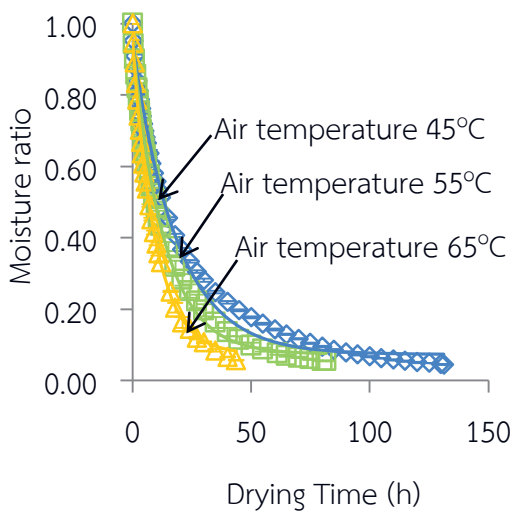
รูปที่ 7 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Newton

พิจารณารูปที่ 6 ถึงรูปที่ 10 จะเห็นว่าผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page (รูปที่ 10) ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดของทุกๆ อุณหภูมิลมร้อน และจะเห็นได้ว่าผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton (รูปที่ 7) ให้ผลการทำนายคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองมากที่สุด สำหรับผลการทำนายที่ใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ช่วงอุณหภูมิลมร้อนต่ำๆ (45°C) จะเห็นได้

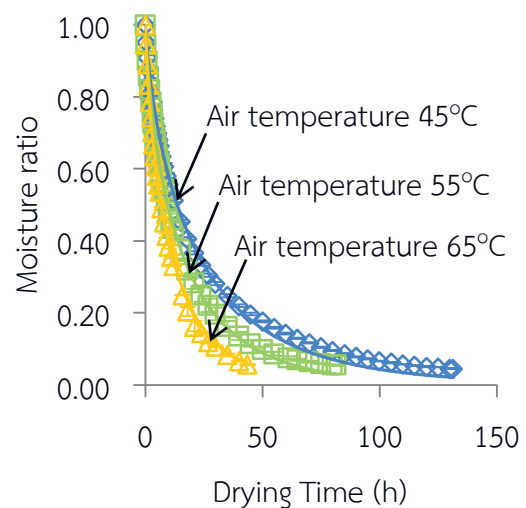
ชี้ว่าที่ช่วงเวลาการอบแห้งที่ 30 ถึง 60 ชั่วโมง จะให้ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นต่ำกว่าผลการทดลองและช่วงท้ายของเวลาการอบแห้งจะให้ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าผลการทดลอง



รูปที่ 8 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Henderson and Pabis



รูปที่ 9 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic



รูปที่ 10 การทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการเอมพิริคัลของ Page

จากการวิเคราะห์หาค่าความแม่นยำด้วยหลักการทางด้านสถิติได้ค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย ($MAPE$) ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 R^2 , $RMSE$ และ $MAPE$ รูปแบบต่าง ๆ

สมการรูปแบบ	R^2	$RMSE$	$MAPE$
ทางทฤษฎี	0.96	0.029	17.12
กึ่งทฤษฎี Newton	0.75	0.054	30.23
กึ่งทฤษฎี Henderson and Pabis	0.90	0.041	22.99
กึ่งทฤษฎี Logarithmic	0.99	0.025	10.35
เอมพิริคัล Page	0.98	0.019	10.24

พิจารณาจากตารางที่ 1 พบว่าสมการเอมพิริคัลของ Page ให้ค่า $RMSE$ และ $MAPE$ ได้ต่ำที่สุด คือเท่ากับ 0.019 และ 10.24 ตามลำดับ แม้ว่าสมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic นั้นจะสามารถให้ค่า R^2 ได้สูงกว่าเล็กน้อย แต่เนื่องจากสมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic นั้นมีค่าคงที่จำนวนมากกว่าสมการของ Page [ดูตั้งสมการที่ (6) และ (7)] ส่งผลให้จำนวนระดับความอิสระ (Degree of freedom) ของสมการของ Logarithmic มีค่าสูงกว่าทำให้ไม่สามารถใช้ค่า R^2 ในการตัดสินใจได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า $RMSE$ และ $MAPE$ จะเห็นว่าสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page นั้นคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งฟิซโซไลต์ [8]

จากรูปแบบสมการทั้งสามรูปแบบจะเห็นได้ว่าสมการทางทฤษฎีเท่านั้นที่แปรผันไปตามขนาดของผลพลับ ดังนั้นถ้าต้องการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่มีขนาดผลพลับแตกต่างจากขนาดในช่วงของการทดลองจะมีเพียงสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ทำนายหาอัตราส่วนความชื้นได้

4. สรุปผลการทดลอง

สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page เป็นสมการสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมการลดลงของความชื้นผลพลับได้เหมาะสมที่สุด โดยผลพลับควรมีขนาดรัศมีเฉลี่ยในช่วง 2.9 ถึง 3.1 เซนติเมตรอุณหภูมิร้อนที่ใช้อบแห้งอยู่ในช่วง 45°C ถึง 65°C อย่างไม่รู้ก็ตามถ้าผลพลับมีขนาดไม่อยู่ในช่วงของการทดลองนี้ สมการเอมพิริคัลและสมการอื่นๆจะไม่สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ แต่สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท NHK-SPRING (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การ

สนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบพระคุณ นายสามารถ สุ่มโนจิตรภรณ์ ช่วยประสานงานในการเข้าพื้นที่ปลูกพลับที่ต๋อยสามหมื่น จังหวัดเชียงใหม่

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Med Thai. "34 Health and Nutrition Benefits of Persimmon" [Cited 31 Oct 2018]. Available from: <https://medthai.com/persimmon>.
- [2] Karakasova L, Babanovska-Milenkovska F, Lazov M, Karakasov B, Stojanova M. Quality properties of solar dried persimmon (*Diospyros kaki*). Journal of Hygienic Engineering and Design. 2013; 4: 54-59.
- [3] Kirdsaeng P. Development of a quality of the Persimmon in Hyakuma variety for sale as Non Astringent Persimmon. Journal of Kasetsart News. 2010; .56(1): 1-12. (in Thai)
- [4] Achariyiviriya S, Achariyiviriya A, Chunkaew P. Evaluation of technology transfer to rural communities for drying using LPG and solar energy cabinet dryer. International Journal of Agricultural Technology. 2014; 10(5): 1139-1150.
- [5] Chunthaworn S, Achariyaviriya A, Achariyaviriya S. Physical and thermal properties of persimmon fruit. Engineering Journal Chiangmai University. 2016; 23(1): 73-84
- [6] Poomsa-ad N, Wiset L, Tipsanprom W, Rudchapo T. Thin-layer drying equations of Mango (Nam Dok Mai) under hot air drying Using Air Carbon Dioxide and Nitrogen Gas

- Agricultural Science Journal. 2009; 40(1): 445-448. (in Thai)
- [7] Doymaz, I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slice (*Diospyros kaki* L.) Energy Conversion and Management, Vol 56: 199-205.
- [8] Zhu A, Shen X, The model and mass transfer characteristics of convection drying peach slices. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014; 72: 345-351.
- [9] Somjai T, Namsanguan Y, Achariyaviriya S, Achariyaviriya A. Drying kinetics and quality of longan dried by two-stage superheated steam and hot air dryers. The proceedings of the 5th asia-pacific drying conference, Hong Kong China. 13 – 15 August 2007; 1: 166-171.
- [10] Nuthong P, Achariyaviriya A, Namsanguan K, Achariyaviriya S. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. Journal of Food Engineering. 2011; 102(3): 233-239.
- [11] Chunthaworn S, Achariyaviriya S, Achariyaviriya A, Namsanguan K. Drying Kinetic of longan flesh Using high temperature. The 6th Conference on Energy Network of Thailand, Phetchaburi, Thailand. May 5-7, 2010: ENETT6-1020. (in Thai)
- [12] Mongkolkerd K, Achariyaviriya S. Effective diffusion coefficient of okra during hot air drying. Journal of Interdisciplinary Networks. 2013; 2 (Special Issue No. 1): 19-25.
- [13] Ketwijitchai T. Development of mathematical model of Persimmon fruit drying parameters. Master thesis of Engineering (Energy Engineering), Chiangmai university. 2016.