

ผลของการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อการหดตัว และการคืนกลับความชื้นของมะม่วงสุก  
Effect of temperature control in hot air drying on shrinkage and rehydration of ripe mango

กรชนก ชมพิกุล<sup>1</sup>, วิฐู ชูศรี<sup>2</sup>, ธัชพงศ์ ชูศรี<sup>3</sup>

Email:bamboo121137@hotmail.com

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร

<sup>2</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

<sup>3</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้ง 2 วิธี คือการทำแห้งแบบอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ กับอุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C และความเร็วลม 2 m/s ต่อจลนพลศาสตร์ของการทำแห้งการหดตัวและการคืนกลับความชื้น (Rehydration) จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Effective moisture diffusivity:  $D_{eff}$ ) จากการควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า  $D_{eff}$  สูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำโดยค่า  $D_{eff}$  จากการทำแห้งแบบอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ และอุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 50 60 และ 70 °C มีค่า (1.49, 1.85, 2.20, 1.38, 1.79, 2.15) × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s ตามลำดับผลิตภัณฑ์จากการทำแห้งทั้ง 2 วิธีมีการหดตัวเท่ากัน แต่กลไกการหดตัวแตกต่างกันโดยการหดตัวที่อุณหภูมิตัวอย่างคงที่ที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆตลอดกระบวนการทำแห้งในขณะที่การหดตัวที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำแห้งและเกิดเล็กน้อยในช่วงท้าย มีผลทำให้โครงสร้างผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันพิจารณาได้จากการคืนกลับความชื้นของตัวอย่างจากการทำแห้งแบบอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ที่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างจากการทำแห้งแบบอุณหภูมิลมร้อนคงที่ โดยค่าการคืนกลับความชื้นของตัวอย่างจากการทำแห้งแบบอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ และอุณหภูมิลมร้อนคงที่ ที่ 50, 60 และ 70 °C มีค่า 3.26, 4.70, 5.21 และ 2.74, 3.24, 3.80 ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าตัวอย่างจากการทำแห้งด้วยอุณหภูมิตัวอย่างคงที่จะมีโครงสร้างเป็นรูพรุนมากกว่าจึงมีผลทำให้มีค่าการคืนกลับความชื้นที่สูงกว่า

**คำสำคัญ:** การทำแห้งด้วยลมร้อน, การหดตัว, การคืนกลับความชื้น

### Abstract

This study aimed to investigate the effect of drying temperature control on drying kinetics, shrinkage and rehydration. The drying temperature control consisted of two methods; constant sample temperature and constant hot air temperature which performed at 50, 60 and 70 °C and 2 m/s air velocity. The results found that the effective moisture diffusivity ( $D_{eff}$ ) from this two methods was not significant differences ( $P < 0.05$ ). However, the  $D_{eff}$  at high temperature drying was higher than that of low temperature drying. The  $D_{eff}$  of sample temperature and constant hot air temperature at 50, 60 and 70 °C and 2 m/s air velocity was (1.49, 1.85, 2.20, 1.38, 1.79, 2.15) × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s, respectively. The products of both drying methods possessed the same shrinkage. Conversely, the shrinkage mechanism was

different which the shrinkage at constant sample temperature occurred slowly throughout the drying process whereas the shrinkage at constant hot air temperature occurred rapidly in first stage and slightly shrunk at the end of the process. This results affected to material structure that determined by the rehydration of the sample. The rehydration of constant sample temperature was higher than that of constant hot air temperature. The rehydration of constant sample temperature and constant hot air temperature at 50, 60 and 70°C and 2 m/s air velocity was 3.26, 4.70, 5.21 and 2.74, 3.24, 3.80, respectively. The result revealed that the sample structure of constant sample temperature was more porous, resulting in a higher rehydration.

**Keywords:** Hot air drying, Shrinkage, Rehydration

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรม เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิประเทศที่อุดมสมบูรณ์ เหมาะแก่การเพาะปลูก การปลูกผักและผลไม้ของไทยจึงมีอยู่ทั่วทุกภูมิภาค ทำให้ประเทศไทยมีผลไม้ตามฤดูกาลรับประทานและขายภายในประเทศ นอกจากนี้จะปลูกผักผลไม้ไว้ขายภายในประเทศแล้ว ยังมีการนำผักผลไม้เป็นสินค้าส่งออกของไทยอีกด้วย แต่เนื่องจากหลายๆครั้งที่สินค้าส่งออกของไทยอย่างผลไม้หรือผักสดมักจะพบปัญหาในเรื่องของสินค้าล้นตลาด รวมทั้งผลิตผลเหล่านั้นมีอายุสั้นหากขายไม่หมดก็ต้องทิ้งทำให้เกิดการขาดทุน เพราะเหตุนี้จึงทำให้มีสินค้าส่งออกของไทยที่เป็นผักและผลไม้อบแห้ง เนื่องจากมีสารอาหารสูง กลิ่น รสดี และที่สำคัญคือ มีอายุการเก็บรักษานานขึ้นเนื่องจากการลดความชื้นและค่าแอกติวิตีของน้ำ (water activity:  $a_w$ ) ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ให้อยู่ในระดับที่ทำให้อาหารปลอดภัย เพื่อให้สามารถเก็บรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้นานขึ้น (Zotarelli, 2012) โดยอาหารแห้งนั้นยังช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและถือเป็นอีกทางเลือกให้กับผู้บริโภค โดยมะม่วงมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Mangifera indica* L. การปลูกมะม่วงพบกระจายอยู่ตามประเทศในเขตร้อนและแพร่หลายไปทั่วโลก มะม่วงถือเป็นผลไม้เศรษฐกิจของประเทศไทยโดยส่งออกเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากฟิลิปปินส์และเม็กซิโก จัดเป็นผลไม้ที่มีเนื้อที่ปลูกมากที่สุดในประเทศปี 2559 จึงกลายเป็นผลไม้หลักที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรไทยจากการส่งออกไปตลาดโลกทั้งจากผลดิบและผ่านการแปรรูป โดยเฉพาะมะม่วงอบแห้งเนื่องจากในปัจจุบันตลาดโลกมีความต้องการอย่างมาก วิธีการทำมะม่วงอบแห้งที่นิยมคือการทำแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานง่ายและมีต้นทุนในการดำเนินงานต่ำแต่การทำแห้งด้วยวิธีนี้ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงและขึ้นอาหารได้รับความร้อนเป็นเวลานานแต่หากต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง ทั้งในด้านของลักษณะปรากฏ รสชาติและคุณค่าทางโภชนาการ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งถือเป็นกระบวนการทำแห้งที่ดีที่สุดแต่เนื่องด้วยวิธีการทำแห้งแบบระเหิดเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการแปรรูปสูง จึงไม่เหมาะกับการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่มีมูลค่าไม่สูงมากผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการทำแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนซึ่งถือเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน โดยการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การทำแห้ง คุณภาพด้านการหัดตัวและการคืนกลับความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกในระหว่างการทำแห้ง เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการให้มีให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่และการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพด้านการหดตัวและการคืนกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่กับแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่

## ขอบเขตการวิจัย

### 1. ขอบเขตประชากร

ประชากร คือ มะม่วงสายพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง เลือกซื้อจากตลาดปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม ที่มีระดับความแก่-อ่อนเท่ากันโดยพิจารณาจาก ขนาด สีมี่ความสม่ำเสมอ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid) ที่เป็นองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน คือ 18 °Brix

### 2. ขอบเขตตัวแปร

ตัวแปรต้น คือ การทำแห้งด้วยลมร้อน 2 วิธีคือ ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างที่กับแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70° C ความเร็วลม 2 m/s ตัวแปรตาม คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น อัตราส่วนการหดตัวและอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นของมะม่วง

### 3. ขอบเขตเวลา

ทำการวิจัยภายในระยะเวลา 12 เดือน คือ ระหว่างวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2561

## การทบทวนวรรณกรรม

การทำแห้งอาหาร (food dehydration) หรือการดึงน้ำออก อาจเรียกว่า drying มีจุดประสงค์เพื่อลดค่าแอกติวิตีของน้ำ ที่เป็นองค์ประกอบในอาหารเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทุกชนิดที่เป็นสาเหตุให้อาหารเสื่อมเสีย (microbial spoilage) ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีซึ่งมีน้ำเป็นส่วนร่วมและเป็นเหตุให้อาหารเสื่อมอีกทั้งการทำแห้งยังเป็นการทำให้อาหารมีน้ำหนักเบา ลดปริมาตร ทำให้สะดวกต่อการขนส่ง การบริโภค หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการแปรรูปกระบวนการอื่น รวมทั้งยังเป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นทางเลือกของผู้บริโภคได้มากขึ้น

กระบวนการทำแห้งอาหารเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเนื่องจากปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลและความร้อน ซึ่งจะเกิดควบคู่กันตลอดเวลาในระหว่างการทำแห้งอาหาร (Passos, 2000) โดยการแห้งของอาหารเกิดขึ้นจากการที่ความชื้นภายในของอาหารเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของวัตถุ จากนั้นจะระเหยออกไปสู่บรรยากาศที่ล้อมรอบชิ้นอาหารในรูปของไอ จนความชื้นทั้งชิ้นอาหารมีค่าคงที่

การพัฒนากระบวนการทำแห้งเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยสนใจอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการทำแห้งอาหารนั้น นอกจากวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาแล้วนั้น ยังคงต้องคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งและต้นทุนในการผลิตที่ต่ำเพื่อให้ผู้บริโภคสามารถยอมรับได้ โดยในปัจจุบันการทำแห้งที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการทำแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งจะใช้เวลาในการทำแห้งนาน และมีประสิทธิภาพในการทำแห้งต่ำจึงส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี-กายภาพด้านต่างๆของอาหารทำให้มีคุณภาพต่ำลง เช่น อาหารมีสีคล้ำขึ้น เนื้อสัมผัสแข็งขึ้น การหดตัวมากขึ้น และมีการสูญเสียสารอาหารในระหว่างการทำแห้งสูง (Unal, 2011; An, 2016; Dehghannya, 2018). Sturm (2012) จึงสนใจศึกษา

พารามิเตอร์พื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อการทำแห้ง โดยพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นอาหาร หลังการทำแห้งมากที่สุด Sturm (2014) จึงพัฒนากระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างแทนการควบคุมอุณหภูมิของอากาศ พบว่า การควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างส่งผลให้มีอัตราการแห้งที่สูงกว่า ใช้เวลาในการทำแห้งที่สั้นกว่าการควบคุมอุณหภูมิของอากาศและเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ทางด้านสีและการหดตัวน้อยกว่าแต่อย่างไรก็ตามการศึกษาการทำแห้งโดยการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างยังมีข้อมูลไม่เพียงพอ ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาเพิ่มเติมในด้านของจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพด้านการหดตัวในการทำแห้งโดยการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง โดยการติดตามค่าการหดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจากระบบ Computer Vision System (CVS) ซึ่งเป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างด้วยภาพถ่าย โดยอาศัยวิธีการประมวลผลภาพ (Image processing) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าหดตัวที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการทำแห้งได้อย่างต่อเนื่อง

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการทำแห้ง คุณภาพด้านการหดตัวและการคืนกลับความชื้นของมะม่วงสุกสายพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง ในการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ เปรียบเทียบกับแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C และความเร็วลม 2 m/s

### 2. ขั้นตอนการวิจัย

#### 2.1 การคัดเลือกมะม่วงสุก

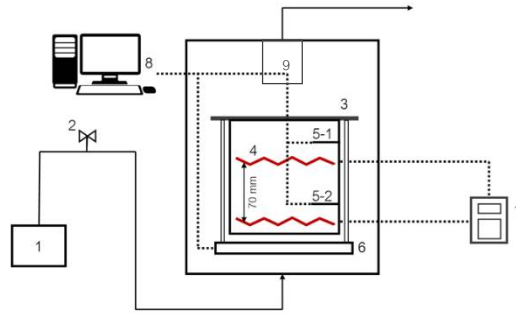
ทำการคัดเลือกมะม่วงสุกจากคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของมะม่วงสุกให้มีความใกล้เคียงกันทางด้านปริมาณความชื้น, ความแน่นเนื้อ, ค่าแอกติวิตีของน้ำ, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

#### 2.2 การเตรียมตัวอย่างมะม่วงสุกสำหรับการทำแห้ง

นำมะม่วงสุกมาล้างผลมะม่วงด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกผิวงให้แห้ง จากนั้นจึงปอกเปลือก และหั่นชิ้นมะม่วงให้มีขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร และหนา 1.0 เซนติเมตร

#### 2.3 การทำแห้งชิ้นมะม่วง

นำตัวอย่างมะม่วงสุกไปวางบนตะแกรงสำหรับอบแห้ง และชั่งน้ำหนักก่อนอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลจากนั้นนำไปวางในเครื่องทำแห้งด้วยลมร้อนที่มีสภาวะคงที่ตามที่ต้องการ (อุณหภูมิและความเร็วลม) โดยเครื่องทำแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 2 รูปแบบคือ ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างและการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนในระหว่างการทำแห้งได้ โดยส่วนประกอบของเครื่องทำแห้งด้วยลมร้อนในงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 1 เมื่อวางตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจะเริ่มบันทึกค่าทันที โดยน้ำหนักของตัวอย่าง, ภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่าง, ความเร็วลม และอุณหภูมิจะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องทุกๆ 30 วินาที จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ จึงนำตะแกรงที่มีชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องทำแห้งแล้วนำชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังอบทันที จากนั้นจึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การทำแห้งและคุณภาพต่อไป



ภาพที่ 1: ส่วนประกอบของเครื่องทำแห้งด้วยลมร้อน (1) เครื่องกำเนิดลม (2) วาล์วควบคุมความเร็วลม (3) ช่องวางตัวอย่าง (4) เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (5-1) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ตัวอย่างชนิดอินฟราเรด (5-2) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ (6) โพลดเซลล์ (7) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (PID) (8) หน่วยแสดงค่าน้ำหนักและอุณหภูมิ (9) กล้องถ่ายภาพ

## 2.4 การวิเคราะห์

### 2.4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{eff}$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกระบวนการทำแห้งนี้สามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่สองของ Fick ซึ่งแสดงในสมการที่ 1

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขในการศึกษาครั้งนี้ได้ดังสมการที่ 2

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left( - \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L_0^2} D_{eff} t \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $MR$  คืออัตราส่วนความชื้น,  $M$  คือปริมาณความชื้นของชิ้นมะม่วงที่เวลา  $t$   $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (d.b.),  $M_e$  คือปริมาณความชื้นสมดุลของชิ้นมะม่วง,  $M_0$  คือปริมาณความชื้นเริ่มต้นของชิ้นมะม่วง  $L_0$  คือความหนา และ  $D_{eff}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

### 2.4.2 อัตราส่วนการหดตัว

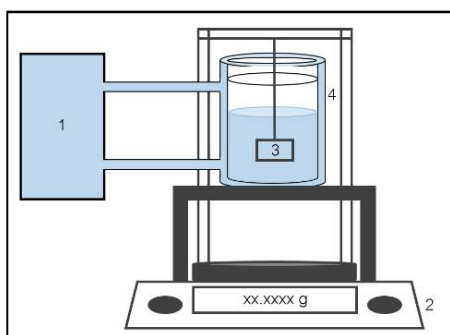
ในการวิเคราะห์ค่าการหดตัว จะใช้ระบบการติดตามด้วยภาพถ่ายตลอดการทดลอง และนำไปวิเคราะห์ค่าด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยโปรแกรมประมวลผลภาพใช้หลักการในการเปลี่ยนสีรูปภาพจากภาพสีปกติเป็นสีเทา เพื่อให้รูปภาพมีความต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้สามารถตัดพื้นหลังออกได้ จึงได้พื้นที่ที่เราสนใจ แล้วนำค่าจำนวนพิกเซลไปคำนวณเพื่อเปลี่ยนมาเป็นค่าพื้นที่ โดยมีกราฟเทียบมาตรฐานไว้สำหรับคำนวณค่า จากนั้นนำไปหาค่าอัตราส่วนการหดตัว ดังสมการ (3)

$$\text{อัตราส่วนการหดตัว}(S) = \frac{\text{พื้นผิวตัวอย่างในระหว่างการทำแห้ง}}{\text{พื้นผิวตัวอย่างก่อนการทำแห้ง}} \quad (3)$$

### 2.4.3 อัตราส่วนการคืนกลับความชื้น

วิเคราะห์การคืนกลับความชื้นของมะม่วงสุกอบแห้งศึกษาจากอัตราส่วนการคืนกลับความชื้น ด้วยเครื่องวิเคราะห์การคืนตัวดังภาพที่ 2 โดยการใส่ตัวอย่างลงในตะแกรง ณ ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งจะแช่อยู่ในน้ำกลั่นที่ใส่ไว้ภายในกระบอกอลูมิเนียม ที่มีการควบคุมอุณหภูมิน้ำภายในให้เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส โดยการหล่อด้วยน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิโดยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 1 และมีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างอย่างต่อเนื่องโดยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปจากนั้นนำมาหาอัตราส่วนการคืนกลับความชื้น ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\text{อัตราส่วนการคืนกลับความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างในระหว่างการคืนตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}} \quad (4)$$



ภาพที่ 2: เครื่องวิเคราะห์การคืนกลับความชื้น (1) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (2) เครื่องชั่งน้ำหนักชั่งน้ำหนักดิจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (3) ตะแกรงใส่ตัวอย่าง (4) กระบอกอลูมิเนียม

### 3. สถานที่ทำวิจัย/เก็บรวบรวมข้อมูล

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 034 219361

### 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเรื่องผลของสภาวะในการทำแห้งต่อจลนพลศาสตร์ในการทำแห้ง และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพด้านต่างๆของผลิตภัณฑ์จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design) หรือ CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรม SPSS version 18.0

### ผลการวิจัย

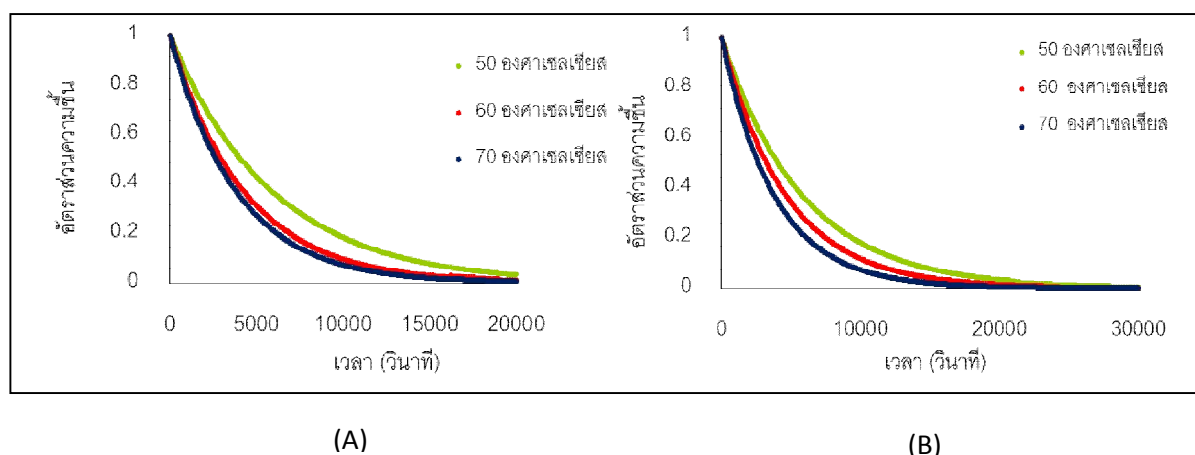
ในการศึกษานี้ สมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{eff}$ ) เป็นค่าพารามิเตอร์การทำแห้งที่สำคัญเพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการทำแห้งของชิ้นมะม่วงที่เกิดขึ้น จากตารางที่ 1พบว่า การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งทั้ง 2 วิธี มีค่า  $D_{eff}$  ไม่แตกต่างกันแต่การทำแห้งทั้งสองรูปแบบที่อุณหภูมิต่างกัน มีค่า  $D_{eff}$  แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 1 ค่า  $D_{eff}$  ในการทำแห้งทั้งสองรูปแบบ ภายใต้อุณหภูมิการทำแห้งที่ 50, 60, 70 องศาเซลเซียส

รูปแบบการทำแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ( $D_{eff}$ ) $\times 10^{-9}$
1. การควบคุมอุณหภูมิลมร้อน	50	$1.38 \pm 0.05^c$
	60	$1.74 \pm 0.04^b$
	70	$2.18 \pm 0.11^a$
2. การควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง	50	$1.49 \pm 0.02^c$
	60	$1.84 \pm 0.06^b$
	70	$2.20 \pm 0.18^a$

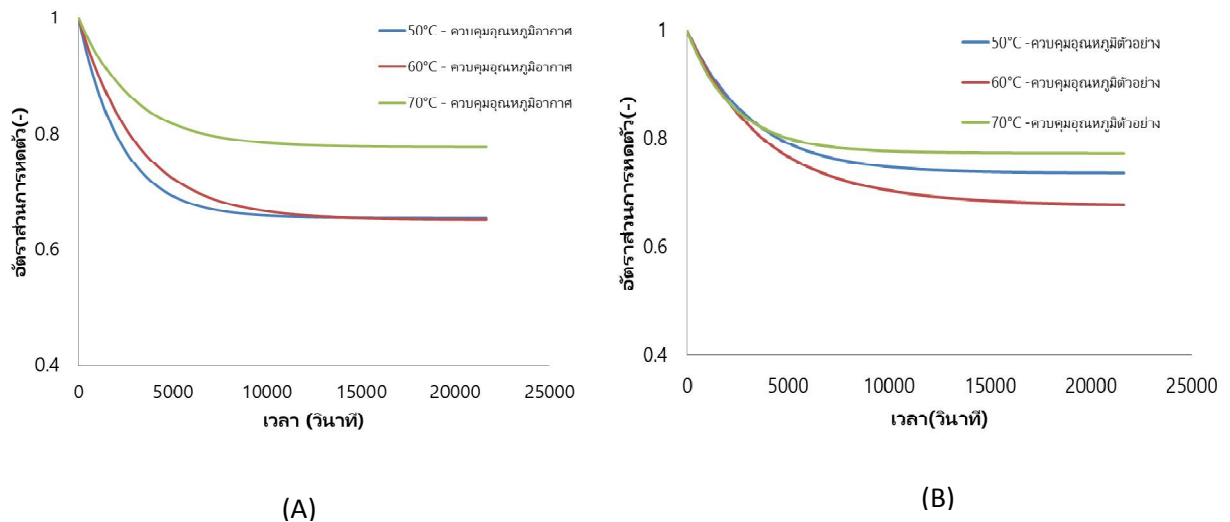
หมายเหตุ: <sup>a b c</sup> แสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ( $P < 0.05$ )

โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า  $D_{eff}$  มากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังภาพที่ 3 อัตราการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C แบบการควบคุมอุณหภูมิลมร้อน (A) แบบการควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง (B) จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้มีอัตราการทำแห้งที่สูงขึ้นในการทำแห้งทั้ง 2 รูปแบบ



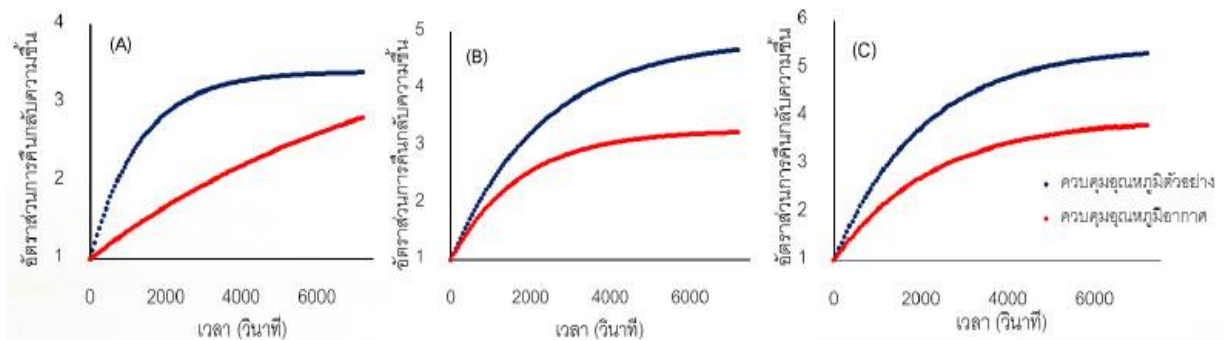
ภาพที่ 3: อัตราการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C แบบการควบคุมอุณหภูมิลมร้อน (A) แบบการควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง (B)

โดยเมื่อสังเกตค่าการหดตัวของกรอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แสดงเป็นกราฟเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราส่วนการหดตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อน (A) และการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง (B) ดังภาพที่ 4 พบว่าลักษณะของกราฟมีลักษณะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคงที่ ซึ่งคล้ายกับจลนพลศาสตร์ของการทำแห้งในรูปแบบของสมการเอ็กโปเนนเชียล เมื่อเวลาผ่านไปการหดตัวจะค่อยๆ ลดน้อยลงจนกระทั่งคงที่และจะเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้ง 2 วิธีมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันคือ ที่อัตราส่วนความชื้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งเพิ่มสูงขึ้นการหดตัวจะลดน้อยลง



ภาพที่ 4: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนการหดตัวในระหว่างกระบวนการการทำแห้งตัวอย่างด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนอากาศ (A) และแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง (B)

และเมื่อศึกษาสมบัติการคืนกลับความชื้นซึ่งคาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับการหดตัว พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้มะม่วงสุกอบแห้งมีอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นที่ดีกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อสังเกตจะพบว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างส่งผลให้มะม่วงสุกอบแห้งมีอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นที่สูงกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนในทุกอุณหภูมิ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5: ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นและเวลา ในการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนเทียบกับแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50°C(A) 60°C(B) 70°C(C)

### สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

การทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิในการทำแห้งทั้ง 2 วิธี คือแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ กับแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และความเร็วลม 2 m/s อัตราการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้ง 2 วิธี ที่แสดงในภาพที่ 3 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าช่วงท้ายๆของการอบแห้งเนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งนั้น น้ำที่ผิวบนอกและภายในของชิ้นมะม่วงมีมาก เมื่อได้รับความร้อนจากอากาศร้อนส่งผลให้การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำที่ผิวบนอกและภายในของชิ้นมะม่วงมีปริมาณลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทมวลของน้ำในชิ้นมะม่วงเกิดขึ้นช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ (จารูวรรณ, 2550)

ค่า  $D_{eff}$  ของการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างกันแต่การทำแห้งทั้ง 2 วิธี ที่อุณหภูมิต่างกันมีค่า  $D_{eff}$  ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า  $D_{eff}$  สูง

กว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากในสถานะที่ขึ้นอาหารได้รับความร้อนสูงจะก่อให้เกิดแรงขับเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับน้ำในขึ้นอาหารมาก ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว จึงสามารถลดเวลาในการทำแห้งได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น และสอดคล้องกับผลของ (Velic, 2004)

การหัตถ์มีลักษณะคล้ายกับจลนพลศาสตร์ของการทำแห้งในรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล โดยเมื่อเวลาผ่านไปการหัตถ์จะค่อยๆลดน้อยลงจนกระทั่งคงที่ เนื่องจากปริมาตรลดลงจนถึงจุดที่น้ำภายในขึ้นอาหารไม่สามารถออกจากขึ้นอาหารได้หรือออกได้น้อยมาก จึงทำให้ช่วงท้ายของการทำแห้งอัตราส่วนการหัตถ์เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจะเห็นได้ว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้ง 2 วิธีมีการหัตถ์เท่ากัน แต่กลไกการหัตถ์แตกต่างกันโดยการหัตถ์ที่อุณหภูมิตัวอย่างคงที่ที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆตลอดกระบวนการทำแห้ง ในขณะที่การหัตถ์ที่อุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำแห้งและเกิดเล็กน้อยในช่วงท้าย มีผลทำให้โครงสร้างผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันพิจารณาได้จากสมบัติการคืนกลับความชื้น พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้มะม่วงสุกอบแห้งมีอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นที่ดีกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับการหัตถ์ และอัตราส่วนการคืนกลับความชื้นในการทำแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่าง มีค่าสูงกว่าการทำแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิลมร้อนอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากหากควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่ที่  $70^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่างจะมีอุณหภูมิเท่ากับ  $70^{\circ}\text{C}$  อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการทดลองต่างจากการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนคงที่ ตัวอย่างจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  ในช่วงแรกของการทดลองและค่อยๆเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน เกิดการหัตถ์ ทำให้มีรูพรุนน้อยกว่า เนื่องจากโครงสร้างถูกทำลายมากกว่าในช่วงแรกจึงมีผลทำให้มีค่าการคืนกลับความชื้นต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างคงที่

### ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำให้ทราบข้อมูลทางจลนพลศาสตร์การทำแห้งและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านการหัตถ์ในระหว่างการทำแห้ง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพในการทำแห้งอาหารด้วยลมร้อนให้ดียิ่งขึ้นอย่างไรก็ตามการทำแห้งอาหารยังคงต้องคำนึงถึงคุณภาพในหลายๆด้าน เช่นการเปลี่ยนแปลงด้านสีหรือการเสื่อมสลายสารอาหาร จึงยังต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมในขั้นต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- จารุวรรณ กุลวิศ, สมเกียรติ ปรีชญาวารกร และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2550). ผลของอุณหภูมิต่ำที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. วิจัยและพัฒนา มจร. 30(4), 611-621.
- สวนิตอิชยาวิชย์. (2013). ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสรานสีขึ้นระหว่างการอบแห้งกับคุณภาพของอาหารแห้งที่ผลิตได้. วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(1), 241-249.
- สุวรรณภูริระวิชย์กุล, สากีนา ลาแมปะ และยุทธนา ภูริระวิชย์กุล. (2012). การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟและลมร้อน : จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. วิทยาศาสตร์บูรพา. 17(1), 117-129.
- An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y. and Xiao, G. (2016). Comparison of different drying method on Chinese ginner (*Zingiberofficinale* Roscoe): changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. Food chem. 197, 1292-1300.

- Aprajeeta, J. and Gopirajah, R. (2015). Shrinkage and Porosity on Heat and Mass Transfer During Potato Drying. *Journal of Food Engineering*. 144, 119-128.
- Chen, X.D. and Mujumdar, M.S. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell Publishing. 118-120.
- Dehghannya, J., Hosseinlar, S-H. and Heshmati, M.K. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit couple with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Food sci*. 45, 132-151.
- Passos, M.L. and Mujumdar, A.S. (2000). Effect of Cohesive Forces on Fluidized and Spouted Beds of Wet Particles. *Powder Technol*. 110, 222-238.
- Sturm, B., Werner, C., Hensel, H. and Hensel, O. (2012). Optimizing the Drying Parameters for Hot Air Dried Apples. *Drying Technology*. 30(14), 1570-1582.
- Sturm, B., Vega, A.M.N. and Hofacker, W.C. (2014). Influence of Process Control Strategies on Drying Kinetics, Colour and Shrinkage of Air Dried Apples. *Applied Thermal Engineering*. 62, 455-460.
- Unal, H.G. and Sacilik, K. (2011). Drying characteristics of hawthorn fruit in convective hot air dryer. *Food process. Preserv*. 35, 272-279.
- del Valle, J.M. and Aguilera, J.M. (1998). Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food research International*. 3, 191- 204.
- Velić, D., Tomas, M.P. and Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*. 64(1): 97-102.
- Zotarelli, M.F., Porciuncula, B.D.A. and Laurindo, J.B. (2012). A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. *Food Eng*. 8, 523-531.