



## รายงานการวิจัย

ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจาก  
กระบวนการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์  
(Drying characteristics and quality attributes of waste from  
crab stick by product)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจาก  
กระบวนการผลิตปูอัด  
(Drying characteristics and quality attributes of waste from  
crab stick by product)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อ. ดร. ไตรภพ พาหอม  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร  
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2561

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2563

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผ่านทุนพัฒนาศักยภาพอาจารย์ใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความร่วมมือ และความช่วยเหลือจากหลายภาคส่วน ได้แก่ บริษัทหลักทรัพย์เนียน ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี 3 และ รศ.ดร.จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาส นี้

ผู้วิจัย

มีนาคม 2563



## บทคัดย่อภาษาไทย

ผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์ แต่ไม่ผ่านข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ซึ่งผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีปริมาณความชื้นที่สูงทำให้ง่ายต่อการเสื่อมเสีย ดังนั้นกระบวนการทำแห้งจึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทอรัม (Desorption isotherm) ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง (Drying characteristics) และลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์ ดีซอร์พชันไอโซเทอรัมของปุ๋ยมูลสัตว์จะถูกศึกษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 20 35 และ 50 °C ข้อมูลของดีซอร์พชันไอโซเทอรัม ได้แก่ ความชื้น (3.25 – 280 % dry basis) และค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (Water activity) (0.36 – 0.99) จะถูกนำมาฟิต (Fit) กับสมการซอร์พชันไอโซเทอรัม ทั้ง 14 สมการ และจากการทดลองพบว่า Double Log Polynomial model คือสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายดีซอร์พชันไอโซเทอรัมของปุ๋ยมูลสัตว์ เน็ตไอโซสเทอริกฮีท (Net isosteric heat;  $q_{st}$ ) ของดีซอร์พชันไอโซเทอรัมของปุ๋ยมูลสัตว์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดลง

สำหรับการทำแห้งตัวอย่างปุ๋ยมูลสัตว์จะถูกทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความเร็วลมที่ใช้ คือ 1 m/s โดยลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง และลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์ ได้แก่ ค่าสี ลักษณะทางโครงสร้าง คุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ และคุณสมบัติทางความหนืด จะถูกนำมาศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการทำแห้ง ได้แก่ ปริมาณความชื้น และเวลาการทำแห้ง จะถูกนำมาฟิตกับสมการการทำแห้งแบบแผ่นบาง (Thin layer drying model) 5 สมการ โดยพบว่าสมการ Approximation of diffusion คือสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมของการทำแห้งของปุ๋ยมูลสัตว์ อัตราการทำแห้งแบบลดลง (Falling rate period) ถูกพบในการทดลองนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (Moisture diffusivity;  $D_{eff}$ ) ระหว่างการทำแห้งของตัวอย่างอยู่ในช่วง  $5.32 \times 10^{-8}$  ถึง  $8.83 \times 10^{-8}$   $m^2/s$  และการเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้น การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าคุณสมบัติทางด้านสีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายดีที่สุด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านความเป็นสีน้ำตาล และความแตกต่างของสีโดยรวมน้อยที่สุด การยุบตัวของโครงสร้างตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C มีขนาดใกล้เคียงกัน การยุบตัวของโครงสร้างพบมากที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ ได้แก่ ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Weight gain) อัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับ (Rehydration ratio) และสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of reconstitution) ของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิทำแห้งที่ 60 และ 70 °C มีค่าสูงกว่าการทำแห้งที่ 50 °C สมการ Peleg เป็นสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมของการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของตัวอย่างในการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างแห้งอยู่ในช่วง  $3.90 \times 10^{-7}$  ถึง  $4.38 \times 10^{-7}$   $m^2/s$  การศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เหมาะสมที่จะใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปุ๋ยมูลสัตว์ เนื่องจากให้ค่าคุณภาพ (ค่าสี ลักษณะทางโครงสร้าง คุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ และคุณสมบัติทางความหนืด) ที่ดีกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C

## Abstract

Crab stick by-product is the underspecification product from crab stick production. The by-product contains high moisture content inducing a short shelf life. Therefore, drying is considered as a food preservation technique to extend its shelf life. This study is focused on an investigation of desorption isotherms, drying characteristics and quality attributes of crab stick by-product. Desorption isotherms were determined at three different temperatures (20, 35 and 50 °C). The experimental data obtained were modeled by fourteen sorption isotherm models for water activity ranging from 0.36 to 0.99 and Double Log Polynomial model was found to be the best-describing model. The net isosteric heat ( $q_{st}$ ) of desorption increased continuously with decreasing of equilibrium moisture content.

The crab stick by-products were dried at 50, 60 and 70 °C with a constant air velocity of 1 m/s. Drying characteristics and quality attribute of crab stick by-products including color values, structural properties, rehydration properties and pasting properties were determined. The drying data were fitted with five thin layer drying models and Approximation of diffusion model was the best-describing model. The drying curves showed only falling rate period. Moisture diffusivities ( $D_{eff}$ ) of the by-product drying were ranging from  $5.32 \times 10^{-8}$  to  $8.83 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s and increasing drying air temperature led to increase  $D_{eff}$ . Dried crab stick by-products at 60 °C gave the best color properties due to provide the lowest value of delta browning index ( $\Delta BI$ ) and total color difference ( $\Delta E^*$ ). There were less changes of dried product structure from drying temperature of 60 and 70 °C but the great changes were observed in the dried product at 50 °C. Rehydration properties including weight gain (%), rehydration ratio and co-efficient of reconstitution of dried sample at 60 and 70 °C were higher than those sample at 50 °C. Peleg model was the best fit with rehydration data. The  $D_{eff}$  of moisture absorption was in the range from  $3.90 \times 10^{-7}$  to  $4.38 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. Conclusion, drying temperature at 60 °C was an appropriate condition to produce dried crab stick by product due to provide better quality attribute including color values, structural properties, rehydration properties and pasting properties than those of drying at 50 and 70 °C.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	จ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
ขอบเขตของการวิจัย .....	2
ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี.....	9
การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณ.....	10
ดิซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋อัด .....	12
การทำแห้งด้วยลมร้อน .....	12
ลักษณะทางคุณภาพของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง.....	12
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยประมาณ.....	15
ดิซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋อัด .....	15
การทำแห้งด้วยลมร้อน .....	19
ลักษณะทางคุณภาพของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง.....	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
สรุปผลการวิจัย .....	30
บรรณานุกรม .....	31
ประวัติผู้วิจัย .....	36

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทิร์ม การทำแห้ง และการดูดคืนน้ำกลับ	8
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของปุ๋ยมัด	15
ตารางที่ 4.2 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทิร์มกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	16
ตารางที่ 4.2 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทิร์มกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)	17
ตารางที่ 4.3 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	22
ตารางที่ 4.4 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของความชื้น ระหว่างการทำแห้งกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	23
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สี่ของปุ๋ยมัดหลังจากการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ	24
ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของปุ๋ยมัดที่ทำแห้ง	27
ตารางที่ 4.7 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของการดูดคืนน้ำกลับกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	28
ตารางที่ 4.8 ผลของการพืตสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของความชื้น ระหว่างการดูดคืนน้ำกลับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	29

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 (a) และ (b) แสดงถึงซอร์พชันไอโซเทอร์มของอาหารชนิดต่างๆ	4
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง	7
รูปที่ 2.3 เครื่องทำแห้งแบบถาด	7
รูปที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของดีซอร์ชันไอโซเทิร์มปุ๊อตโดยใช้สมการ Double Log Polynomial ที่ อุณหภูมิ 25 35 และ 50 °C	18
รูปที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของเน็ตไอโซสเทอริกฮิทของดีซอร์พชันปุ๊อตที่ระดับความชื้นต่างๆ	18
รูปที่ 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของลมร้อนระหว่างการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 50, 60 and 70 °C	20
รูปที่ 4.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของปุ๊อตโดยใช้สมการการทำแห้ง Approximation of diffusion	21
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางโครงสร้างของปุ๊อตสด (a) ปุ๊อตที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C (b) 60 °C (c) และ 70 °C (d) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ สเตอริโอที่กำลังขยาย 0.5 เท่า (กำลังขยายต่ำสุด)	26
รูปที่ 4.6 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของปุ๊อตโดยใช้สมการ Peleg model	29



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กระบวนการผลิตปูอัดนั้นเริ่มต้นจากการนำปลามาตัดแต่งและแยกส่วนที่เป็นหนัง ก้าง และหัวออก จากนั้นเนื้อปลาจะถูกนำมาล้างให้สะอาดจากนั้นบดให้ละเอียดแล้วล้างอีกครั้งด้วยน้ำเกลือและน้ำ แล้วบดผสมกับสารป้องกันการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน เช่น โซรบิทอล และ ฟอสเฟต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกเรียกว่า ซูริมิ (Surimi) จากนั้นซูริมิจะถูกอัดให้เป็นก้อนและนำไปทำให้อุณหภูมิต่ำลงถึง  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วเก็บแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อต้องการใช้งาน ก้อนซูริมิแช่แข็งจะถูกทำมาละลายและบดผสมกับส่วนประกอบต่างๆ เช่น แป้ง ไข่ขาว น้ำ เกลือ น้ำตาล และสารแต่งสี และกลิ่น หลังจากนั้นเนื้อปลาจะถูกทำให้สุกโดยการแผ่ออกเป็นแผ่นบางและม้วนพับเป็นแผ่นเกลียว แล้วดัดยัดแผ่นปูอัดที่สุกแล้วให้เป็นแท่ง แท่งปูอัดจะถูกตัดเป็นแท่งตามขนาดมาตรฐานที่โรงงานที่ตั้งค่าไว้ แท่งปูอัดที่ผ่านมาตรฐานจะถูกนำไปบรรจุในถุงที่ปิดสนิท และนำไปผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป โดยแท่งปูอัดที่มีขนาดไม่ตรงตามมาตรฐานจะถูกจัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต และจะถูกนำไปกลับไปใช้ในกระบวนการผสมต่อไป แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งมีจำนวนมาก (10 – 15 ตัน/วัน) และการนำกลับไปผสมใหม่นั้นมีข้อจำกัดเรื่องอัตราส่วนที่สามารถนำไปผสมทำให้สามารถใช้ผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งได้เพียงบางส่วน ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งยังคงเหลือเป็นจำนวนมาก หากเก็บไว้เป็นเวลานานย่อมส่งผลกระทบต่อคุณภาพ กล่าวคือ ค่าคุณภาพนั้นก็จะเสื่อมลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งทางผู้ประกอบการได้จำหน่ายผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งให้แก่โรงงานผลิตอาหารสัตว์ แต่ราคาผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งที่จำหน่ายไปนั้นมีราคาค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาหาวิธีการแปรรูปที่จะสามารถเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปูอัด ซึ่งการวิจัยครั้งนี้เป็นการเลือกเทคโนโลยีการทำแห้งมาใช้ในการแปรรูป เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ และเพื่อเป็นความรู้พื้นฐานในการหาแนวทางที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปูอัด และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำแห้งต่อลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้ง
3. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้ง เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งต่อไป
4. ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายลักษณะเฉพาะในการทำแห้งของผลิตภัณฑ์

5. เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปู้ดให้สามารถนำไปต่อยอดได้ทั้งในเชิงการวิจัย และเชิงพาณิชย์

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทำแห้งที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปู้ด เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการทำแห้งที่ใช้คือกระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนที่แตกต่างกัน จากนั้นเลือกเอาตัวอย่างที่ได้จากสภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมผลิตเป็นตัวอย่างแห้งที่จะสามารถเอาไปใช้ต่อไปทั้งในแง่ของการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือแม้กระทั่งการลดขนาดเป็นผงเพื่อนำกลับไปรวมใช้ในกระบวนการผลิตปู้ดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปู้ด ซึ่งข้อมูลการทำแห้งของผลิตภัณฑ์จะถูกนำมาใช้ศึกษาหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำนายจุดยุติที่เหมาะสมของกระบวนการทำแห้ง โดยค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ใช้เป็นเกณฑ์การเลือกสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการดูดน้ำกลับ ค่าสี และลักษณะทางโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ โดยระยะเวลาดำเนินการวิจัยคือ 1 ปี

### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

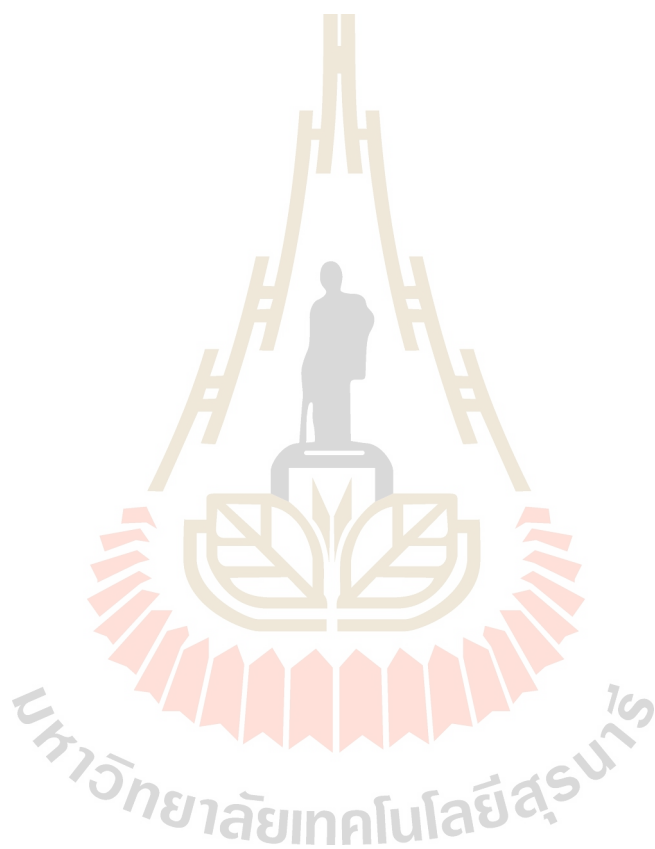
เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับการแปรรูป และเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปู้ดยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญเกี่ยวกับการศึกษาหากระบวนการแปรรูปที่เหมาะสมมาปรับใช้กับผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปู้ดในรูปแบบของกระบวนการทำแห้ง เพื่อเป็นการกำจัดน้ำในอาหารซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเสื่อมเสียคุณภาพ อีกทั้งการใช้เทคโนโลยีการทำแห้งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้ยาวนานขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกรอบแนวความคิดของการวิจัยสามารถแสดงดังนี้

1. ศึกษาส่วนประกอบของปู้ดเพื่อประโยชน์ในการกำหนดสภาวะการแปรรูป
2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปด้วยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาคุณลักษณะการทำแห้งของตัวอย่าง และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายจุดยุติการทำแห้งที่เหมาะสมได้
4. ศึกษาค่าคุณภาพของตัวอย่าง และคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างแห้งเพื่อประโยชน์ของการนำไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ หรือต่อยอดการวิจัยต่อไป

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสม
2. ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตปู้ด

3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบของงานวิจัยต่อไปได้ เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์
4. ได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายกระบวนการทำแห้ง
5. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปเผยแพร่ลงในวารสารวิชาการ

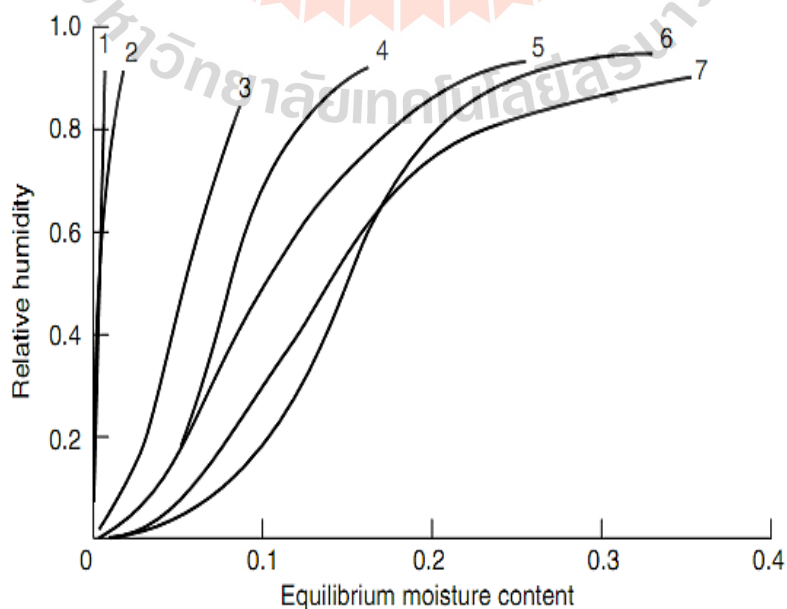


## บทที่ 2

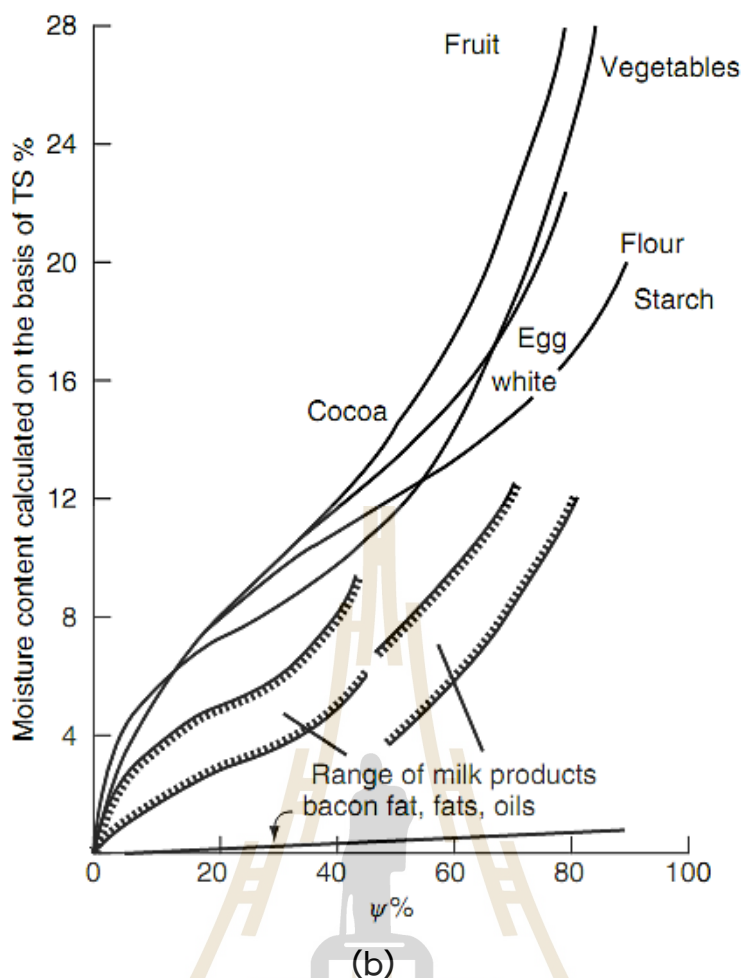
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตปูอัดนั้นเริ่มต้นจากการนำปลามาตัดแต่ง และแยกส่วนที่เป็นหนัง ก้าง และหัวออก จากนั้นเนื้อปลาจะถูกนำมาล้างให้สะอาดจากนั้นนำมาบดให้ละเอียดแล้วล้างอีกครั้งด้วยน้ำเกลือ และน้ำ แล้วบดผสมกับสารป้องกันการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน เช่น โซรบิทอล และฟอสเฟต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกเรียกว่า ซูริมิ (Surimi) จากนั้นซูริมิจะถูกอัดให้เป็นก้อนและนำไปทำให้อุณหภูมิต่ำลงถึง  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วเก็บแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อต้องการใช้งานก้อนซูริมิแช่แข็งจะถูกทำมาละลายและบดผสมกับส่วนประกอบต่างๆ เช่น แป้ง ไข่ขาว น้ำ เกลือ น้ำตาล และสารแต่งสี และกลิ่น หลังจากนั้นเนื้อปลาจะถูกทำให้สุกโดยการแผ่ออกเป็นแผ่นบางและม้วนพับเป็นแผ่นเกลียว แล้วดัดยัดแผ่นปูอัดที่สุกแล้วให้เป็นแท่งแท่งปูอัดจะถูกตัดเป็นแท่งตามขนาดมาตรฐานที่โรงงานที่ตั้งค่าไว้ แท่งปูอัดที่ผ่านมาตรฐานจะถูกนำไปบรรจุในถุงที่ปิดสนิท และนำไปผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจากนั้นก็จะถูกขนส่งไปยังศูนย์จำหน่ายต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium relative humidity, ERH) และ ความชื้นสมดุลภายในอาหาร (Equilibrium moisture content,  $X_e$ ) ถูกสร้างขึ้นมาใช้ในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสำคัญในการออกแบบกระบวนการกำจัดน้ำเพื่อทำนายจุดยุติของกระบวนการทำแห้ง และเพื่อการประเมินความคงตัวของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา โดยความสัมพันธ์ของ ERH -  $X_e$  เป็นความสัมพันธ์ที่แปรผันกับอุณหภูมิ (Ramaswamy and Marcotte 2005) จากความสัมพันธ์ของ ERH -  $X_e$  ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถนำมาพล็อตในรูปของกราฟซึ่งเรียกว่า ซอร์พชันไอโซเทิร์มของความชื้น (Moisture sorption isotherm) แสดงดังรูปที่ 2.1



(a)



รูปที่ 2.1 (a) และ (b) แสดงถึงซอร์พชันไอโซเทิร์มของอาหารชนิดต่างๆ (Mujumdar 1995)

การศึกษาซอร์พชันไอโซเทิร์มของอาหาร ตัวแปรสำคัญที่นิยมนำมาพิจารณาคือ ความค่าขึ้นสัมพัทธ์ ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำมาเขียนแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังตารางที่ 2.1

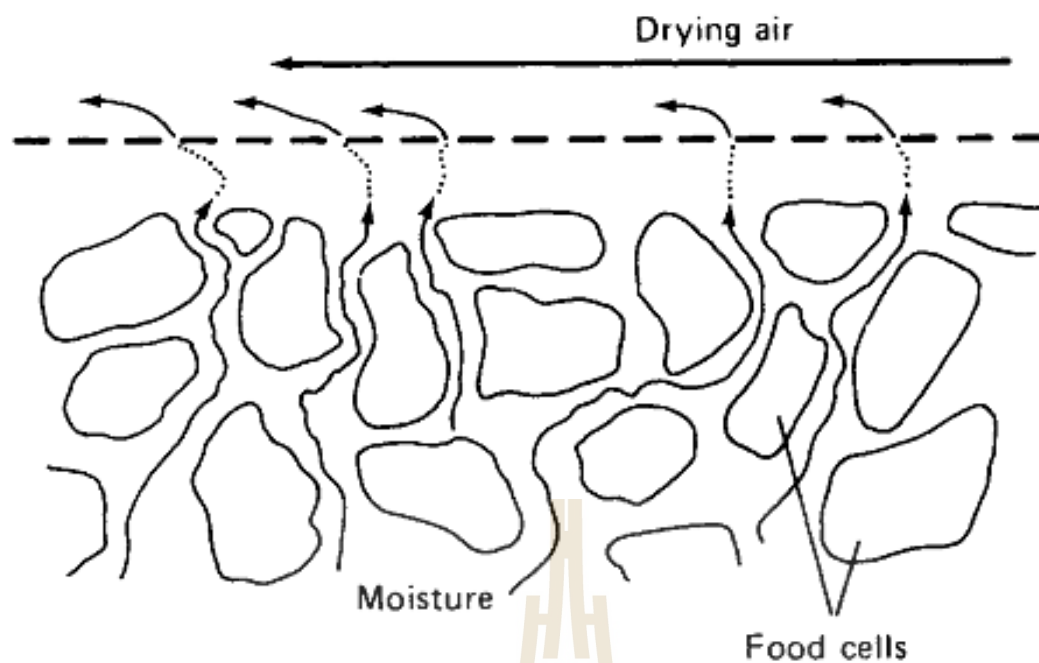
การทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ถูกนำมาใช้อย่างยาวนาน เนื่องจากกระบวนการทำแห้งนั้นถูกใช้ในการกำจัดน้ำออกจากอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารให้ยาวนานขึ้น อีกทั้งกระบวนการทำแห้งช่วยลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการบรรจุ การเก็บรักษา และการขนส่ง เนื่องจากน้ำหนักและปริมาตรตัวอย่างอาหารที่ลดลง (Potisate และคณะ 2014) การทำแห้งด้วยลมร้อน (รูปที่ 2.2) เริ่มต้นจากลมที่ไหลเข้าสู่อาหารจะถูกทำให้ร้อนด้วยตัวทำความร้อน (Heater) การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำของลมร้อนจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการระเหยของน้ำในอาหาร โดยลมร้อนจะเคลื่อนที่โดยรอบอาหาร และลมร้อนก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ภายในอาหารทำให้น้ำในอาหารเกิดการระเหยเริ่มจากที่ผิวหน้าอาหารไปยังภายในอาหาร ความร้อนที่ถ่ายเทจากลมร้อนไปยังอาหารเรียกว่า การพาความร้อน (Convection) และความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวหน้าอาหารไปยังภายในเซลล์อาหารเรียกว่า การนำความร้อน (Conduction) ซึ่งกระบวนการทำแห้งจะมีกลไกหลักสำหรับการเคลื่อนที่ของความชื้นคือ การซึมผ่านตามรูเล็ก (Capillary action) และการแพร่ (Diffusion) เครื่องทำแห้งที่อาศัยหลักการทำแห้งด้วยลมร้อนมีอย่าง

หลายหลาย เช่น เครื่องทำแห้งแบบถาด (Tray dryer) แสดงดังรูปที่ 2.3 เครื่องทำแห้งแบบลดความชื้นโดยใช้เครื่องสูบลม (Heat pump dehumidified dryer) และเครื่องทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum dryer) เป็นต้น เครื่องทำแห้งแบบถาดประกอบไปด้วย ถาดใส่ตัวอย่าง พัดลม เครื่องทำความร้อน ซึ่งอุปกรณ์ที่ควบคุมอุณหภูมิความร้อน เรียกว่า เทอร์โมสแตท (Thermostat) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 50 ถึง 70 °C

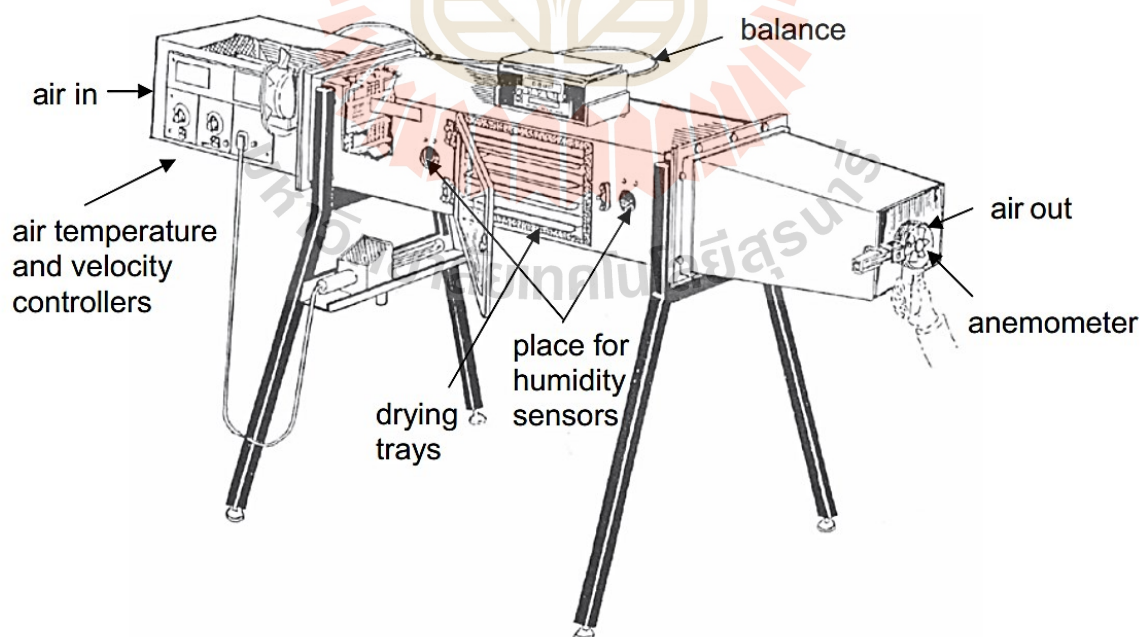
ข้อดีของเครื่องทำแห้งแบบถาดคือ การใช้งานไม่ซับซ้อน ราคาถูก แต่ก็อาจจะมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้อุณหภูมิสูง และเวลาในการทำแห้งที่นานจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวได้ ดังนั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้ง

สมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการทำแห้งเพื่อช่วยในการรักษาค่าคุณภาพต่างๆ ของผลิตภัณฑ์อาหาร ด้วยการทำนายคุณลักษณะของการทำแห้ง และเวลาในการทำแห้ง ใช้ออกแบบและพัฒนาเครื่องทำแห้ง และใช้ควบคุมกระบวนการทำแห้ง (Phahom and Phoungchandang 2018) สมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งแบบแผ่นบางสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ สมการทางคณิตศาสตร์สร้างจากทฤษฎี (Theoretical model) สมการทางคณิตศาสตร์สร้างจากทฤษฎีร่วมกับผลการทดลอง (Semi-theoretical model) และสมการทางคณิตศาสตร์สร้างจากผลการทดลอง (Empirical model) ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์นี้ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของการทำแห้งในอาหารจากข้อมูลการทำแห้งที่ได้จากการทดลอง โดยสมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งที่นิยมใช้คือ Approximation of diffusion Newton Zero Henderson and Pabis และ Weibull distribution II ซึ่งสามารถแสดงในตารางที่ 2.1

ในปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับการทำแห้งของผลิตภัณฑ์ปู้อัดยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาองค์ประกอบของปู้อัด ดีซอร์พชันไอโซเทิร์ม ลักษณะเฉพาะในการทำแห้ง ลักษณะทางคุณภาพหลังจากการทำแห้งของปู้อัด ตลอดจนอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์แห้ง เพื่อเป็นข้อมูลในการต่อยอดงานวิจัย และเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ปู้อัดต่อไป



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง (Fellows 2009)



รูปที่ 2.3 เครื่องทำแห้งแบบถาด (Ramos and others 2010)

ตารางที่ 2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทอร์ม การทำแห้ง และการดูดคืนน้ำกลับ

Model name	Model	Equation
Brunauer-Emmett-Teller; BET	$M_e = baa_w / [(1 - a_w)(1 + (a - 1)a_w)]$	(1)
Lewicki #2	$M_e = a[(1/a_w) - 1]^{b-1}$	(2)
Henderson	$M_e = [-\ln(1 - a_w)/a]^{1/b}$	(3)
Oswin	$M_e = a(a_w/1 - a_w)^b$	(4)
Modified Henderson	$M_e = [\ln(1 - a_w)/(-a(T + b))]^{1/c}$	(5)
Modified Halsey	$M_e = [-\exp(a + bT)/\ln(a_w)]^{1/c}$	(6)
Modified Chung-Pfost	$M_e = (1 - c) \ln[(T + b) \ln(a_w) / -a]$	(7)
Modified Oswin	$M_e = a + bT / ((1/a_w) - 1)^{1/c}$	(8)
Guggenheim-Anderson-Boer; GAB	$M_e = bca_w / (1 - ca_w)(1 - ca_w + ca_w)$	(9)
Pickett-Modified BET	$M_e = a_w(1 - a_w^c) / [(a + ba_w)(1 - a_w)]$	(10)
Lewicki #1	$M_e = c\{[1/(1 - a_w)^b] - [1/(1 + a_w)^a]\}$	(11)
Mujica	$M_e = 1 / [(aT + b) - (cT + d)a_w]$	(12)
Double Log Polynomial	$M_e = a + b[\ln(-\ln a_w)] + c[\ln(-\ln a_w)]^2 + d[\ln(-\ln a_w)]^3$	(13)
Adam and Shove	$M_e = a + ba_w + ca_w^2 + da_w^2$	(14)
Clausius-Clayperon	$q_{st} = -R(\ln(a_w)/(1/T))$	(15)
Modified Tsami	$q_{st} = q_0 \exp(-M_t/M_0) + B$	(16)
Approximation of diffusion	$MR = A \exp(-kt) + (1 - A) \exp(-k_B t)$	(17)
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(18)
Zero	$M_t/M_0 = \exp(-kt)$	(19)
Henderson and Pabis	$MR = A \exp(-kt)$	(20)
Weibull distribution-II	$MR = A - B \exp(-kt^n)$	(21)
Moisture diffusivity; $D_{eff}$	$MR = (8/\pi^2) \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2)$	(22)
Activation energy, $E_a$	$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a/RT)$	(23)
Phoungchandang	$W_g = a + (bt) + (ct^2) - (dt^3)$	(24)
Peleg	$M_t = M_0 + [t/(k_1 + k_2 t)]$	(25)
First order kinetic	$M_t = M_e + (M_0 - M_e) \exp(-k_3 t)$	(26)
Exponential	$M_t = M_e (1 - \exp(-k_4 t))$	(27)
Weibull	$M_t = M_e + (1 - M_e) \exp(-t/b)^a$	(28)

a, b, c, d, n, A, B and C: parameters of the equation,  $a_w$ : water activity, k: drying constant ( $\text{min}^{-1}$ ),  $k_1$ : Peleg rate constant ( $\text{min g d.b./ g H}_2\text{O}$ ),  $k_2$ : Peleg characteristic constant ( $\text{g d.b./ g H}_2\text{O}$ ),  $k_3$ : rehydration kinetic constant ( $\text{min}^{-1}$ ),  $k_4$ : kinetic constant ( $\text{min}^{-1}$ ),  $M_0$ : moisture content at  $t = 0$  of fresh or rehydrated sample (% d.b. or  $\text{g H}_2\text{O/g d.b.}$ ),  $M_e$ : equilibrium moisture content of fresh or rehydrated sample (% d.b. or  $\text{g H}_2\text{O/g d.b.}$ ), MR: moisture ratio ( $M_t - M_e / M_0 - M_e$ ),  $M_t$ : moisture content at any time of fresh or rehydrated sample (% d.b. or  $\text{g H}_2\text{O/g d.b.}$ ), t: drying or rehydration time, T: temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

- Moisture can
- กระดาษกรอง Whatman no.1
- Kjeldahl flask ขนาด 800 mL
- Kjeldahl digestion apparatus
- Erlenmeyer flask ขนาด 250 mL
- Cellulose extraction thimble
- Goldfish extraction chamber
- Desicator
- Beaker ขนาด 250 mL
- Crucible
- ตู้อบลมร้อน (UF450, Memmert, Germany)
- เครื่องกลั่น (Gerhardt, Vapodest, Germany)
- ตู้อบแบบสูญญากาศ (Binder, Germany)
- เตาเผา (OAF1000, Carbolite, Germany)
- เครื่องทำแห้งแบบถาด (Armfield Ltd, Ringwood, UK)
- เครื่องวัดสี (Color Quest XE, Hunter lab, USA)
- กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (SMZ-U, Nikon, Florida, USA)
- Sulfuric acid ( $\geq 97\%$ , AR grade)
- Boric acid (AR grade)
- Hydrochloric acid (37%, AR grade)
- Petroleum ether (AR grade)
- Sodium hydroxide (AR grade)
- Ethanol (95%, AR grade)

สำหรับสถานที่ทำการทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วนตามลักษณะของการทดลอง ส่วนแรกเป็นส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ และการแปรรูปจะทำการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ส่วนที่สองเป็นส่วนวัดคุณภาพด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปจะทำการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือ 11 (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

### 3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

#### 3.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content analysis)

นำตัวอย่างป้อนตามขนาดจากนั้นนำตัวอย่างป้อน 5 g ใส่ลงใน Moisture can จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อน (UF450, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง และนำตัวอย่างมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังจากการอบ (AOAC, 2000) โดยความชื้นของตัวอย่างสามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นร้อยละฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง}} \times 100 \quad (29)$$

#### 3.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (Protein content analysis)

ชั่งตัวอย่างป้อน 1 g ลงบนกระดาษกรองจากนั้นห่อ และใส่ลงใน Kjeldahl flask ขนาด 800 mL เติมน้ำแอมโมเนียปริมาณ 2 เม็ด แล้วเติม Sulfuric acid เข้มข้น ปริมาตร 20 mL ลงใน Kjeldahl flask สำหรับ blank ให้ทำวิธีเดียวกันกับตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่าง และ blank ไปย่อยใน Kjeldahl digestion apparatus ที่ อุณหภูมิ 400 °C จนกว่าจะได้สารละลายใส ทั้งตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 75 mL ลงใน Kjeldahl flask แล้วนำ Kjeldahl flask เข้าเครื่องกลั่น (Gerhardt, Vapodest, Germany) พร้อมทำการเติมน้ำละลาย Sodium hydroxide ความเข้มข้นร้อยละ 40 (w/v) ปริมาตร 50 mL และ สำหรับการเตรียม Receiving flask เติมน้ำละลายบอริกร้อยละ 4 (w/v) ปริมาตร 25 mL ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 mL พร้อมหยด Mixed indicator จำนวน 4 – 5 หยด ทำการกลั่นเป็นเวลา 7 – 10 นาที เพื่อให้ได้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 150 mL นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตด้วยสารละลาย Hydrochloric acid ความเข้มข้น 0.1 N โดยการไทเทรตจะยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง (AOAC, 2000) โดยปริมาณร้อยละโปรตีนคำนวณได้จาก

$$\%N = N \text{ of HCL} \times \frac{(\text{mL of std. acid for sample} - \text{mL of std. acid for blank})}{\text{g of sample}} \times \frac{14 \text{ g N}}{\text{mol}} \times 100 \quad (30)$$

$$\text{ร้อยละโปรตีน} = \%N \times 6.25 \quad (31)$$

#### 3.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Fat content analysis)

ชั่งตัวอย่างป้อน 2 g ลงบนกระดาษกรอง จากนั้นห่อ และนำตัวอย่างใส่ลงใน Cellulose extraction thimble และทำการปิดด้วย Glass wool นำ Thimble ที่บรรจุตัวอย่างแล้วใส่ลงใน Goldfish condenser bracket เติมน้ำมัน Petroleum ether ปริมาตร 50 mL ลงใน Goldfish extract chamber ปิดปาก Chamber ด้วย Gasket และ Metal ring เปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ Condenser และตั้ง Chamber บนแผ่นให้ความร้อน และให้ความร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการควบแน่น 6 – 7 หยดต่อวินาที หลังจากสกัดเสร็จแล้ว นำ Cellulose extraction thimble ไปทำให้แห้งโดยตั้งทิ้งไว้ในเครื่องดูดควัน นาน 1 คืน และ

นำเข้าสู่ตู้อบแบบสุญญากาศ (Binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำให้เย็นใน โถดูดความชื้น และบันทึกน้ำหนัก (AOAC, 2000) การคำนวณหาปริมาณไขมัน แสดงดังสมการ

$$\text{ปริมาณร้อยละไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังสกัดไขมัน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนสกัดไขมัน}} \times 100 \quad (32)$$

### 3.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย (Fiber content analysis)

ชั่งตัวอย่างปู้ด 1 g ใส่ลงในปิកเกอร์ทรงสูงขนาด 250 mL จากนั้นเติม Sulfuric acid ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 (v/v) ปริมาตร 150 mL ทำการย่อยเป็นเวลา 30 นาที กรองตัวอย่างที่ย่อยได้ผ่านกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว ทำการล้างตัวอย่างโดยใช้น้ำปราศจากไอออนที่ถูกทำให้ร้อน จำนวน 3 ครั้ง นำกากที่ได้ใส่ลงในปิกเกอร์เดิม แล้วเติมสารละลาย Sodium hydroxide ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 (w/v) ปริมาตร 150 mL ใช้เวลาในการย่อยตัวอย่าง 30 นาที จากนั้นทำการกรองตัวอย่างที่ย่อยได้ด้วยกระดาษกรองแผ่นเดิม และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ถูกทำให้ร้อน จำนวน 3 ครั้ง นำตัวอย่างมาล้างต่อด้วย Ethanol ความเข้มข้นร้อยละ 95 (v/v) ปริมาตร 10 mL นำตัวอย่างที่ย่อยได้พร้อมกระดาษกรองใส่ลงใน Crucible อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ นำออกจากตู้อบ ปล่อยให้เย็นลงในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักแล้วเข้าเตาเผา (OAF1000, Carbolite, Germany) ที่ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำ Crucible ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากการเผา (AOAC, 2000) โดยปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณร้อยละของเยื่อใย} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (33)$$

### 3.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content analysis)

ชั่งตัวอย่างปู้ด 2 g บรรจุลงใน Crucible จากนั้นนำเข้าเตาเผา (OAF1000, Carbolite, Germany) ที่ 550 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำ Crucible ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากการเผา (AOAC, 2000) โดยปริมาณเถ้าในตัวอย่างคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณร้อยละของเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (34)$$

### 3.1.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate content analysis)

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของตัวอย่างจะคำนวณจากการคิดปริมาณส่วนประกอบของอาหารทั้งหมดเป็นร้อยละ 100 จากนั้นปริมาณคาร์โบไฮเดรตจะคำนวณได้จากการนำ 100 ลบออกด้วยปริมาณร้อยละของความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า (AOAC 2000) ซึ่งแสดงดังสมการ

$$\text{ปริมาณร้อยละคาร์โบไฮเดรต} = 100 - (\text{ร้อยละของปริมาณความชื้น} + \text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เยื่อใย} + \text{เถ้า}) \quad (35)$$

### 3.2 ดีซอร์พชันไอโซเทอร์มของปุ๋ยมัด

ตัวอย่างปุ๋ยมัดถูกนำมาทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบถาด (Armfield Ltd, Ringwood, UK) ที่อุณหภูมิ 50°C ในระหว่างการทำแห้งตัวอย่างจะถูกสุ่มออกมาเพื่อให้ได้ระดับความชื้นของตัวอย่างที่แตกต่างกัน 7 ระดับ (Phahom และคณะ 2017) จากนั้นค่ากิจกรรมของน้ำอิสระในตัวอย่างจะถูกวัดที่อุณหภูมิ 20 35 และ 50 °C จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปฟิต (Fit) กับสมการซอร์พชันไอโซเทิร์ม ทั้ง 14 สมการ แสดงดังตารางที่ 2.1 (สมการที่ 1 ถึง 14) เพื่อหาสมการที่เหมาะสมสำหรับอธิบายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของตัวอย่างปุ๋ยมัด โดยสมการที่เหมาะสมจะเลือกจากสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) สูงสุด และให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard error of estimate, SEE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ต่ำที่สุด

### 3.3 การทำแห้งด้วยลมร้อน

นำตัวอย่างปุ๋ยมัด 400 g มาเรียงให้เต็มถาดจากนั้นทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาด (Armfield Ltd, Ringwood, UK) ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความเร็วลมที่ 0.5 m/s (Phahom และคณะ 2017) ทำการวัดความชื้นภายนอกและภายในห้องทำแห้ง และบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 5 นาที ตลอดการทำแห้ง การทำแห้งจะสิ้นสุดเมื่อค่ากิจกรรมของน้ำอิสระในตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 0.6 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

#### 3.2.1 ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 3 มาฟิตกับสมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งได้แก่ Approximation of diffusion Newton Henderson and Pabis และ Weibull distribution II แสดงดังตารางที่ 2.1 (สมการที่ 17 -21) โดยสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายกระบวนการทำแห้งของปุ๋ยมัดจะเลือกจากสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) สูงสุด และให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard error of estimate, SEE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ต่ำที่สุด จากนั้นนำข้อมูลไปศึกษาการแพร่ของความชื้น (Moisture diffusivity) (สมการที่ 22) และพลังงานกระตุ้น (Activation energy) (สมการที่ 23) ของการทำแห้ง

### 3.4 คุณลักษณะทางคุณภาพของตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้ง

#### 3.3.1 การวัดค่าสี

ตัวอย่างปุ๋ยมัดที่ผ่านการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C ถูกนำมาบดให้ละเอียดจากนั้นนำผงปุ๋ยมัดที่ได้บรรจุลงใน cuvette เพื่อใช้ในการวัดสีด้วยเครื่องวัดสี (Color Quest XE, Hunter lab, USA) โดยใช้ระบบ CIELab ในการระบุค่าพารามิเตอร์สี โดยค่าพารามิเตอร์สีที่ได้จะถูกรายงานเป็นค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  โดยค่า  $L^*$  เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่าง (Lightness) ของตัวอย่าง ค่า  $a^*$  เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นสีเขียว

(Greenness) หรือ สีแดง (Redness) และ  $b^*$  เป็นค่าที่แสดงถึงความเป็นสีเหลือง (Yellowness) หรือ สีน้ำเงิน (Blueness)

ค่าสีหลัก (Hue;  $H^*$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงโดเมนสีของตัวอย่างว่ามีสีใด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$H^* = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (36)$$

ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (Total color difference;  $\Delta E^*$ ) ถูกใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของสีของตัวอย่างควบคุม กับสีของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่แสดงดังต่อไปนี้

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2} \quad (37)$$

เมื่อ  $\Delta E^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม

$L^*_1$   $a^*_1$  และ  $b^*_1$  คือ ค่าสีของตัวอย่างควบคุม

$L^*_2$   $a^*_2$  และ  $b^*_2$  คือ ค่าสีของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแปรรูป

ค่าดัชนีความเป็นสีน้ำตาล (Browning index; BI) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความเป็นสีน้ำตาลของตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$BI = \frac{[100x(x-0.31)]}{0.172} \quad (38)$$

เมื่อ

$$x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad (39)$$

### 3.3.2 คุณสมบัติทางโครงสร้าง (Structural properties)

ตัวอย่างปุ๋ยมัด และแห้งจะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแตอริโอ (SMZ-U, Nikon, Florida, USA) โดยกำลังขยายที่ใช้คือ 0.5 เท่า (กำลังขยายต่ำที่สุด)

### 3.3.3 คุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ (Rehydration properties) และจลนพลศาสตร์ของการดูดน้ำกลับ (Rehydration kinetic)

วิธีการทดลองของ Phahom และคณะ (2017) ถูกนำมาดัดแปลงเพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของปุ๋ยมัดที่ผ่านการทำแห้ง โดยอัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายความสามารถในการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างอบแห้ง โดยการศึกษาคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างปุ๋ยมัดอบแห้งจำนวน 5 g ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 L ซึ่งบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 500 mL ที่อุณหภูมิ 30 °C น้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการดูดคืนน้ำกลับจะถูกบันทึกทุก 5 นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยในแต่ละสภาวะการทำแห้งจะถูกทำการศึกษาคูณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ สภาวะละ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ้อมมาคำนวณหาอัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับ (Rehydration ratio; RR) น้ำหนักที่

เพิ่มขึ้น (Weight gain; WG) และสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of reconstitution; CER) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Dehydration ratio (DR)} = \frac{M_p}{M_d} \quad (40)$$

$$\text{RR} = \frac{M_r}{M_d} \quad (41)$$

$$\text{WG(\%)} = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100 \quad (42)$$

$$\text{CER} = \frac{\text{RR}}{\text{DR}} \quad (43)$$

เมื่อ  $M_p$ ,  $M_d$ ,  $M_r$  and  $M_t$  คือ น้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างก่อนการทำแห้ง ตัวอย่างอบแห้ง ตัวอย่างที่ผ่านการดูดคืนน้ำกลับ และตัวอย่างที่ผ่านการดูดคืนน้ำกลับ ณ เวลาใดๆ ตามลำดับ

ค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้น และน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการดูดคืนน้ำกลับจะถูกนำมาศึกษาจลนพลศาสตร์ของปุ๋ยมอดแห้ง โดยนำข้อมูลดังกล่าวของปุ๋ยมอดแต่ละสภาวะการอบแห้งไปพิตกับสมการการดูดคืนน้ำกลับ (สมการที่ 24 – 28) แสดงดังตารางที่ 2.1



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของปุ๋ยมัดแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของปุ๋ยมัดประกอบไปด้วย น้ำ คิดเป็นร้อยละ 73.13 ของน้ำหนักเปียก รองลงมาคือ คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (ร้อยละ 17.79) โปรตีน (ร้อยละ 6.11) เถ้า (ร้อยละ 1.83) ไขมัน (ร้อยละ 1.05) และเยื่อใย (ร้อยละ 0.06) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของปุ๋ยมัด

Moisture content (g/100g f.w.)	Protein (g/100g f.w.)	Lipid (g/100g f.w.)	Fiber (g/100g f.w.)	Ash (g/100g f.w.)	CHO (g/100g f.w.)
73.17±0.04	6.11±0.04	1.05±0.08	0.06±0.02	1.83±0.02	17.78±0.12

#### 4.2 ดิสซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมัด

ดิสซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมัด ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 20 35 และ 50 °C ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าดิสซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมัดถูกจัดเป็นไอโซเทิร์มชนิดที่ 3 ตามหลักการจำแนกของ Al-Muhtaseb และคณะ (2002) จากรูปที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของปุ๋ยมัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อตัวอย่างมีค่ากิจกรรมน้ำอิสระสูงกว่า 0.6 ซึ่งน้ำในช่วงนี้คือน้ำที่มีการยึดเกาะกันอย่างหลวม (Loosely bound water) ในขณะที่ปริมาณความชื้นจะค่อยๆลดลงในช่วงที่ค่ากิจกรรมน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในช่วงของน้ำในแคพิลลารี (Capillary water) และน้ำโมโนเลเยอร์ (Monolayer water) โดยจัดเป็นน้ำที่ยากต่อการกำจัดออก นอกจากนี้ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่ากิจกรรมน้ำอิสระเพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยของ Ponwiboon และ Rojanakorn (2017) ปริมาณความชื้น และค่ากิจกรรมน้ำอิสระที่ได้จากการทดลองถูกนำมาพิตกับ 14 สมการของซอร์พชันไอโซเทิร์มแสดงดังตารางที่ 2.1 ( สมการที่ 1 – 14) เพื่อหาสมการที่ดีที่สุดในการทำนายพฤติกรรมดิสซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมัด ผลการพิตแสดงดังตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่า Henderson model Pickett-Modified BET model และ Double log polynomial model คือสมการที่ดีที่สุดสำหรับการอธิบายดิสซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมัดสำหรับ สมการ 2 พารามิเตอร์ สมการ 3 พารามิเตอร์ และ สมการ 4 พารามิเตอร์ ตามลำดับ และพบว่า Double log polynomial model คือสมการที่ดีที่สุดจากทั้ง 14 สมการ เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) สูงที่สุด และให้ค่าไคสแควร์ (Chi-square;  $\chi^2$ ) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root mean square error; RMSE) และความคาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard error of estimate; SEE) ต่ำที่สุด

เน็ตไอโซสเตอร์ริกฮีท (Net isosteric heat;  $q_{st}$ ) ของดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของปุ๋ยมูล ๓ ปริมาณความชื้นแตกต่างกัน สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ Clausius-Clayperon (สมการที่ 15 ในตารางที่ 2.1) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_{st}$  และปริมาณความชื้นจะถูกแสดงดังรูปที่ 4.2 เพื่อให้กระบวนการพิตระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับสมการ Tsami มีความแม่นยำในการทำนายมากขึ้น พารามิเตอร์ B จึงถูกเพิ่มขึ้นมาเพื่อเพิ่มภาวะรูปสมการ (Goodness of fit) ซึ่งพบว่า หลังจากตัดแปลงสมการ Tsami แล้วได้ผลจากการพิตที่เป็นที่น่ายอมรับ กล่าวคือสมการที่ถูกตัดแปลงให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.94 จากรูปที่ 4.2 ค่า  $q_{st}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าที่ระดับความชื้นต่ำพลังงานที่ต้องการในการกำจัดน้ำออกจากอาหารนั้นมากขึ้น เนื่องจากในช่วงความชื้นสูงน้ำส่วนใหญ่ในอาหารจะมีการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงทำให้ปริมาณพลังงานที่ต้องการในการกำจัดน้ำยังไม่สูงมาก แต่เมื่อปริมาณน้ำอิสระส่วนใหญ่ถูกกำจัดแล้วที่ปริมาณความชื้นต่ำน้ำที่เหลืออยู่ในอาหารส่วนใหญ่จึงเป็น น้ำในแคพิลลารี (Capillary water) และน้ำโมโนเลเยอร์ (Monolayer water) ซึ่งมีการยึดเกาะที่แข็งแรงกว่าน้ำอิสระ ดังนั้นการกำจัดน้ำในช่วงนี้จึงต้องใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของผลิตภัณฑ์ ปลาชนิดแผ่น (Ponwiboon and Rojanakorn 2017) และ Tunisian Sardine (Hadrich et al. 2008)



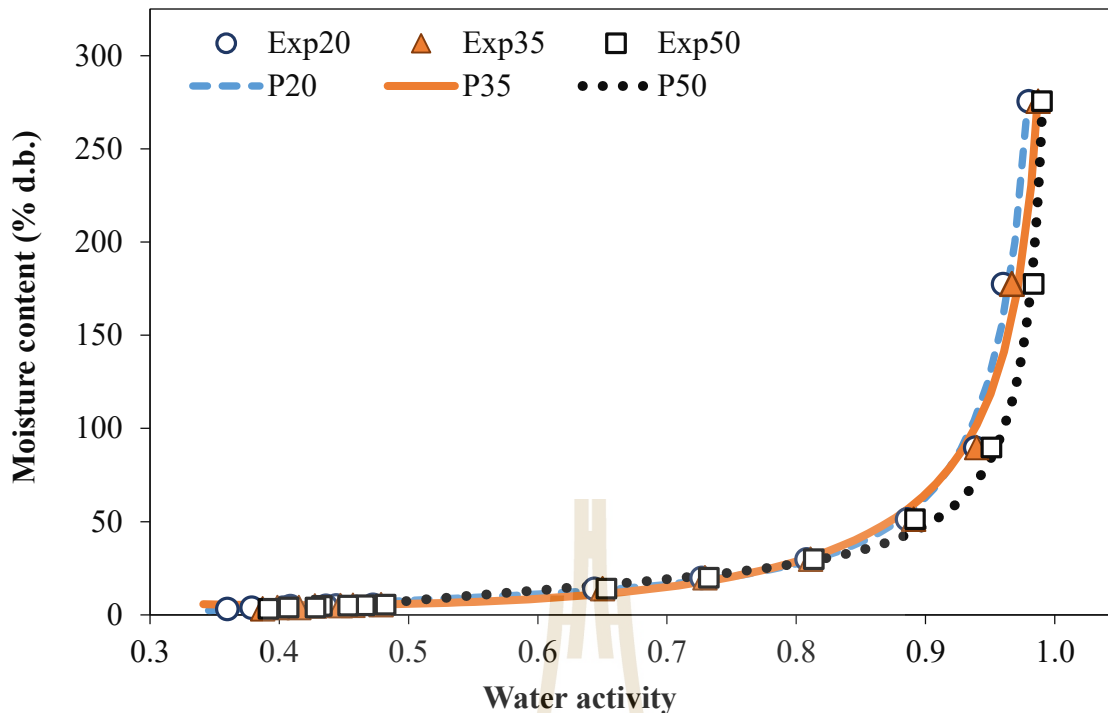


ตารางที่ 4.2 ผลของการฟิตสมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทิร์มกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

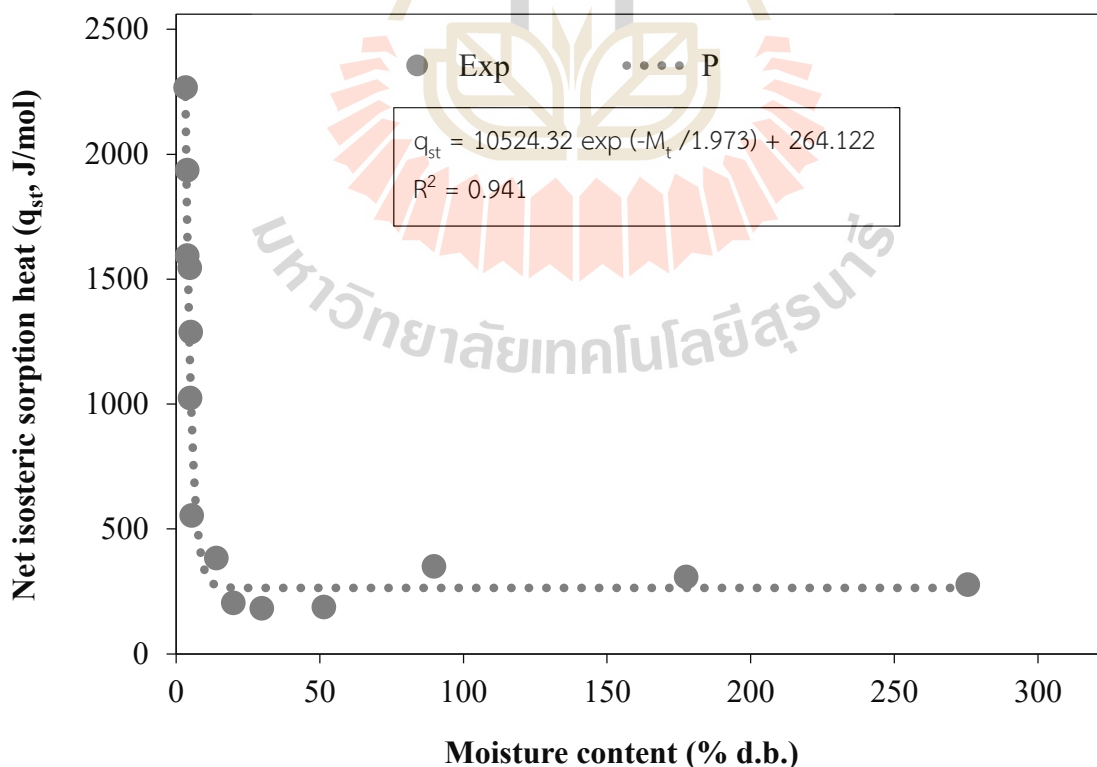
Model	Statistical parameters				Model constants
	R <sup>2</sup>	$\chi^2$ (%d.b.)	RMSE (%d.b.)	SEE (%d.b.)	
BET20°C	0.985	87.328	77.054	9.048	a = 2.822; b = 5.937
BET35°C	0.940	358.372	316.210	18.330	a = 3.02E06; b = 3.938
BET50°C	0.976	142.194	125.465	11.546	a = 3.39E06; b = 2.86
Lewicki#2 20°C	0.989	62.676	55.302	7.665	a = 9.069; b = 0.112
Lewicki#2 35°C	0.980	118.615	104.660	10.545	a = 12.223; b = 0.272
Lewicki#2 50°C	0.996	23.372	20.622	4.681	a = 9.271; b = 0.266
<b>Henderson 20°C</b>	<b>0.989</b>	63.558	56.081	7.719	<b>a = 0.498; b = 0.366</b>
<b>Henderson 35°C</b>	<b>0.993</b>	42.732	37.705	6.329	<b>a = 0.368; b = 0.439</b>
<b>Henderson 50°C</b>	<b>0.989</b>	67.113	59.218	7.932	<b>a = 0.436; b = 0.424</b>
Oswin20°C	0.989	62.676	55.302	7.665	a = 9.069; b = 0.888
Oswin35°C	0.980	118.615	104.660	10.545	a = 12.223; b = 0.728
Oswin50°C	0.996	23.372	20.622	4.681	a = 0.927; b = 0.734
Modified Henderson	0.989	63.734	59.985	7.822	a = 0.003, b = 135.556, c = 0.409
Modified Halsey	0.981	104.415	98.273	10.012	a = 3.411, b = -0.023, c = 1.22
Modified Chung-Pfost	0.862	769.088	723.847	27.172	a = 130.96, b = 150.525, c = 0.019
Modified Oswin	0.984	88.054	82.874	9.194	a = 16.717, b = -0.181, c = 1.288

ตารางที่ 4.2 ผลของการฟิตสมการทางคณิตศาสตร์ของซอร์พชันไอโซเทิร์มกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

Model	Statistical parameters				Model constants
	R <sup>2</sup>	$\chi^2$ (%d.b.)	RMSE (%d.b.)	SEE (%d.b.)	
GAB20°C	0.986	90.778	74.758	8.912	a = 1.14E03, b = 6.486, c = -1132.16
GAB35°C	0.987	85.198	70.163	8.634	a = 1.19E03, b = 6.728, c = -1173.73
GAB50°C	0.992	52.289	43.062	6.764	a = 5.93E02, b = 4.485, c = -586.982
Pickett-Modified BET 20°C	<b>0.992</b>	48.204	39.698	6.495	<b>a = -0.234, b = -0.232, c = 1.901</b>
Pickett-Modified BET 35°C	<b>0.995</b>	29.643	24.412	5.093	<b>a = 0.29, b = -0.284, c = 2.559</b>
Pickett-Modified BET 50°C	<b>0.991</b>	54.288	44.708	6.892	<b>a = 0.0005, b = -0.0047, c = 0.0023</b>
Lewicki#1 20°C	0.991	60.589	49.897	7.281	a = 23.914, b = 0.847, c = 10.613
Lewicki#1 35°C	0.987	81.455	67.080	8.442	a = 19.347, b = 0.628, c = 19.138
Lewicki#1 50°C	0.997	19.069	15.704	4.085	a = 4.242, b = 0.693, c = 11.306
Mujica	0.986	78.568	72.406	8.594	a = 0.0002, b = 0.111, c = 0.002; d = 0.111
Double Log Polynomial 20°C	<b>0.993</b>	49.452	37.816	6.339	<b>a = 3.198, b = -14.059, c = -7.094; d = -5.613</b>
Double Log Polynomial 35°C	<b>0.993</b>	48.087	36.772	6.251	<b>a = 5.370, b = 2.475, c = 10.557; d = -1.064</b>
Double Log Polynomial 50°C	<b>0.996</b>	30.489	23.315	4.977	<b>a = -0.882, b = -26.224, c = -10.586; d = -3.808</b>
Adam and Shove 20°C	0.793	24.234	18.532	4.437	a = 284.031, b = -1089.05, c = -27.484; d = 1035.092
Adam and Shove 35°C	0.808	8.397	6.422	2.612	a = 320.872, b = -1119.15, c = 213.717; d = 857.423
Adam and Shove 50°C	0.805	17.889	13.680	3.812	a = 317.434, b = -1167.420, c = 61.618; d = 980.161



รูปที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของดีซอร์ชันไอโซเทอรัมพู่ต์โดยใช้สมการ Double Log Polynomial model ที่ อุณหภูมิ 25 35 และ 50°C



รูปที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของเน็ตไอโซสเตอร์ริกฮีทของดีซอร์พชันพู่ต์ที่ระดับความชื้นต่างๆ

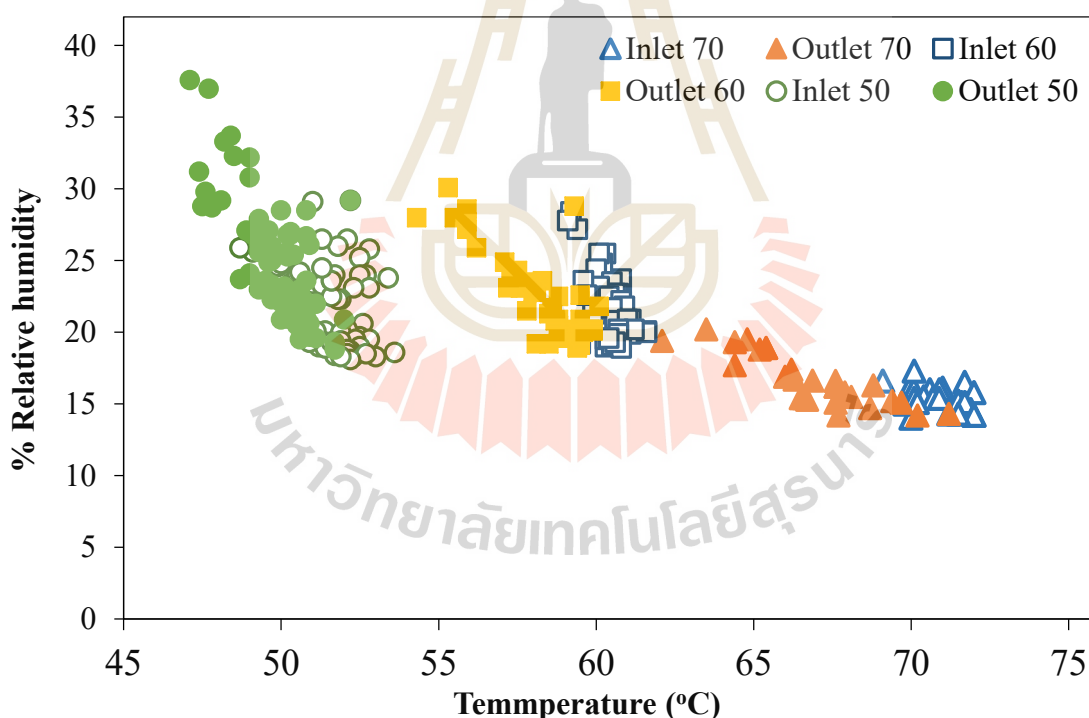
### 4.3 การทำแห้ง

อุณหภูมิลมร้อน และความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนระหว่างการทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกบันทึกระหว่างการทดลอง และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อน และความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ขาเข้า และขาออก แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงสุด (70 °C) จะให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนต่ำที่สุด และ ณ อุณหภูมิการทำแห้งหนึ่งๆ ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนขาออกจะมีค่าสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนขาเข้า เนื่องจากน้ำในอาหารระเหยออกจากตัวอย่างอาหารมาสู่ห้องทำแห้ง (Drying chamber) ระหว่างการอบแห้ง จากนั้นไอน้ำจะถูกพัดลมซึ่งถูกควบคุมความเร็วลมให้คงที่พัดเอาไอน้ำออกจากห้องทำแห้ง จึงส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนขาออกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอน้ำในอากาศ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำแห้งของปุ๋ยมัด ข้อมูลการทำแห้งในรูปของอัตราส่วนความชื้น และเวลาในการทำให้แห้งจะถูกพิตกับ 5 สมการการทำแห้ง (สมการที่ 17 – 21) ได้แก่ Approximation of diffusion Newton Zero Henderson and Pabis และ Weibull distribution II โดยสมการที่เหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งของปุ๋ยมัดคัดเลือกจากภาวะสารูปสนิทธิ ผลของการพิตแสดงในตารางที่ 4.3 และผลการทดลองพบว่า Approximation of diffusion เป็นสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งของปุ๋ยมัด เนื่องจากให้ค่า  $R^2$  ( $> 0.998$ ) สูงที่สุด และให้ค่า  $\chi^2$  ( $< 2.06E-06$ ) RMSE ( $< 1.98E-06$ ) และ SEE ( $< 0.002$ ) ต่ำที่สุด นอกจากนั้นสมการ Zero ถูกนำมาพิตกับข้อมูลการทำแห้งเนื่องจากความสะดวกในการใช้งาน และเป็นสมการที่ไม่ซับซ้อน และที่น่าสนใจคือหลังจากใช้สมการ Zero พิตกับข้อมูลการทำแห้งของปุ๋ยมัดพบว่า สมการ Zero แสดงถึงภาวะสารูปสนิทธิ และให้ค่า  $R^2$   $\chi^2$  RMSE และ SEE อยู่ในช่วง 0.995 ถึง 0.998 3.24 ถึง 9.3.9E-06 3.22 ถึง 9.26E-06 และ 0.02 ถึง 0.03 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สมการ Zero เป็นสมการที่มีประสิทธิภาพในการพิต และให้ภาวะสารูปสนิทธิที่เหมาะสม

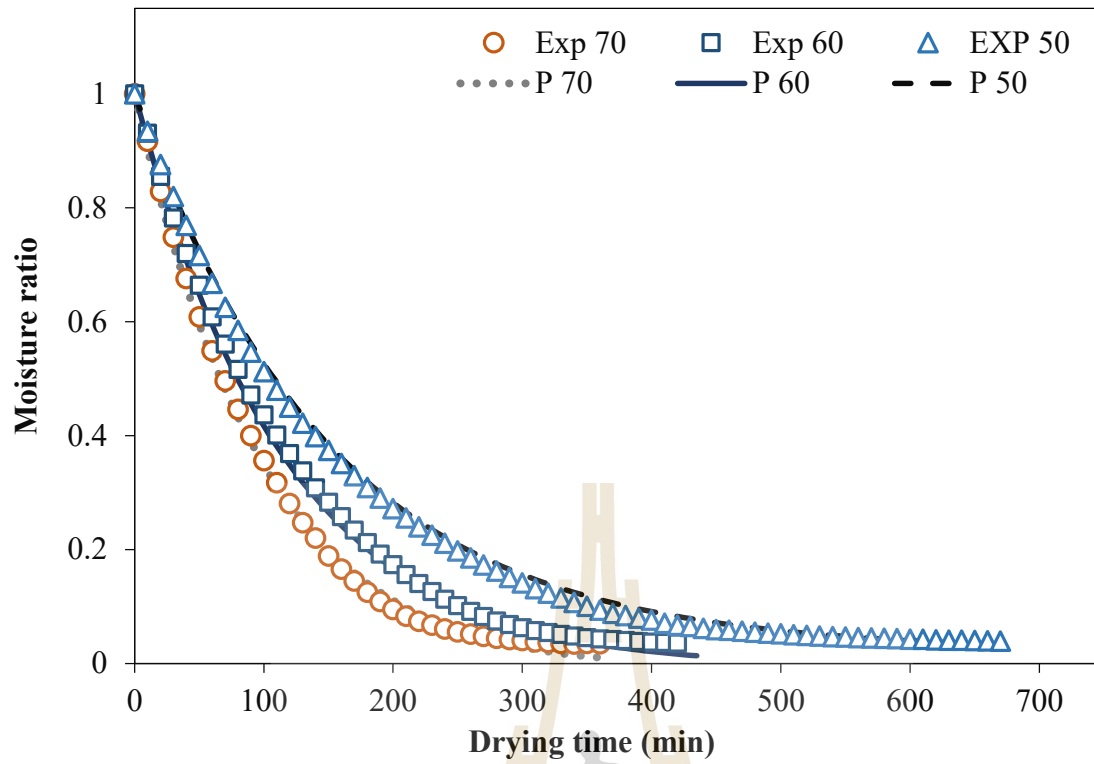
จากตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการทำให้แห้ง (Drying rate constant; k) ที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการ Approximation of diffusion มีค่าอยู่ในช่วง 0.0001 ถึง 0.008 min<sup>-1</sup> และที่อุณหภูมิการทำแห้ง 70 °C ให้ค่า k สูงที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิการทำแห้งที่ 60 และ 50 °C ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายโดยใช้รูปที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งกระทำภายใต้แรงขับเคลื่อน (Driving force) ที่สูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 50 °C คือการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแห้งต่ำสุด จึงส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำในอาหารสูงกว่าที่การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 50 °C กราฟของการทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4 จากกราฟพบว่า อัตราการทำแห้งปุ๋ยมัดนั้นจะอยู่ในช่วงอัตราการทำให้แห้งที่ลดลง (Falling rate period) และไม่พบอัตราการทำให้แห้งแบบคงที่ (Constant rate period) แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการทำให้แห้งนั้นอัตราการระเหยน้ำออกจากตัวอย่างมีค่ามากกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเซลล์อาหารมาสู่ผิวหน้าอาหารซึ่งส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างแห้ง โดยระหว่างการอบแห้งกลไกการถ่ายเทมวล (Mass transfer) หลักที่สามารถพบได้คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี (Capillary force) และการเคลื่อนที่แบบแพร่ (Diffusion) Toujani และคณะ (2011) รายงานว่า การถ่ายเทมวลหลักที่พบในช่วงการทำแห้งที่ลดลงคือการแพร่ภายในตัวอย่างอาหาร การเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งจาก 50 °C เป็น 60 °C หรือ 70 °C ส่งผลทำให้ลดระยะเวลาการทำแห้งเท่ากับ ร้อย

ละ 36.49 และ 43.30 ตามลำดับ ซึ่งผลของการลดระยะเวลาการทำแห้งโดยการเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งถูก รายงานในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ เช่น การทำแห้งแผ่นเนื้อปลา (Ponwiboon and Rojanakorn 2017) และการทำแห้ง Tunisian Sardine (Hadrich et al. 2008)

สมการการแพร่ของความชื้น (Moisture diffusivity;  $D_{eff}$ ) โดย Crank (1975) ถูกนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของความชื้นในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของปุ๊อดอยู่ในช่วง  $5.32 \times 10^{-8}$  ถึง  $8.83 \times 10^{-8}$   $m^2/s$  (ตารางที่ 4.4) โดย Zogzas และคณะ (1996) รายงานว่าค่า  $D_{eff}$  ของอาหารโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง  $10^{-12}$  ถึง  $10^{-8}$   $m^2/s$  ค่า  $D_{eff}$  ของปุ๊อดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้ง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากความดันไอน้ำภายในอาหารจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้ง พลังงานกระตุ้น (Activation energy;  $E_a$ ) คือค่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่ต้องการทำให้เกิดการแพร่ของความชื้น ซึ่งความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียส (Arrhenius relationship) จะถูกนำมาใช้ในการทำนายค่า  $E_a$  ของปุ๊อด โดยพบว่า ค่า  $E_a$  ของปุ๊อดมีค่าเท่ากับ 22.96 kJ/mol ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับค่า  $E_a$  ของอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ โดยค่า  $E_a$  จะอยู่ในช่วง 18 -27 kJ/mol (Saini et al. 2012; Barbosa-Canovas 2009)



รูปที่ 4.3 ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของลมร้อนระหว่างการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 50, 60 and 70°C



รูปที่ 4.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของปุ๋ยมอดโดยการใช้อนุกรมการทำให้แห้ง Approximation of diffusion

ตารางที่ 4.3 ผลของการฟิตสมการทางคณิตศาสตร์ของการทำแห้งกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Model	Drying air temperature (°C)	Statistical parameters				Model constants
		R <sup>2</sup>	$\chi^2$	RMSE	SEE	
Newton	50	0.9986	2.941E-06	2.920E-06	0.002	k = 0.006
Newton	60	0.9986	9.310E-07	9.205E-07	0.001	k = 0.009
Newton	70	0.9967	4.500E-06	4.438E-06	0.002	k = 0.011
Zero	50	0.9976	3.243E-06	3.219E-06	0.002	k = 0.006
Zero	60	0.9978	2.253E-06	2.227E-06	0.002	k = 0.008
Zero	70	0.9952	9.389E-06	9.260E-06	0.003	k = 0.011
Henderson and Pabis	50	0.9977	2.674E-06	2.635E-06	0.002	k = 0.006; A = 0.987
Henderson and Pabis	60	0.9990	4.186E-07	4.091E-07	6.430E-4	k = 0.009; A = 1.021
Henderson and Pabis	70	0.9978	2.028E-06	1.973E-06	0.001	k = 0.011; A = 1.036
<b>Approximation of diffusion</b>	50	<b>0.9995</b>	<b>1.194E-07</b>	<b>1.168E-07</b>	<b>3.000E-04</b>	<b>k = 0.0001; A = 0.023; B = 66.315</b>
<b>Approximation of diffusion</b>	60	<b>0.9990</b>	<b>4.235E-07</b>	<b>4.091E-07</b>	<b>6.000E-04</b>	<b>k = 0.007; A = 11.865; B = 0.979</b>
<b>Approximation of diffusion</b>	70	<b>0.9978</b>	<b>2.057E-06</b>	<b>1.973E-06</b>	<b>0.001</b>	<b>k = 0.008; A = 16.467; B = 0.982</b>
Weibull distribution-II	50	0.7387	0.037	0.035	0.189	k = 0.001; A = 2.667; B = 2.073; n = 0.911
Weibull distribution-II	60	0.9566	8.870E-04	8.470E-04	0.029	k = 0.002; A = 72.841; B = 71.659; n = 0.352
Weibull distribution-II	70	0.9469	0.001	0.001	0.034	k = 0.002; A = 81.865; B = 80.693; n = 0.355

**ตารางที่ 4.4** ผลของการพิດสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของความชื้นระหว่างการทำแห้งกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Drying air temperature (°C)	Drying time (min)	Statistical parameters				Model constant
		R <sup>2</sup>	$\chi^2$ (m <sup>2</sup> /s)	RMSE (m <sup>2</sup> /s)	SEE (m <sup>2</sup> /s)	Moisture diffusivity (D <sub>eff</sub> , m <sup>2</sup> /s)
50	677 ± 3.53	0.9652	6.400E-04	6.300E-04	0.025	5.323E-08
60	430 ± 7.07	0.9507	0.001	0.001	0.033	7.068E-08
70	350 ± 14.14	0.9452	0.001	0.001	0.035	8.825E-08

#### 4.4 คุณลักษณะทางคุณภาพของปุ๊อดที่ผ่านการทำแห้ง

##### 4.4.1 การวัดสี

ค่าพารามิเตอร์สีของปุ๊อดหลังจากการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่า ค่าความสว่าง (Lightness; L\*) และค่าสีหลัก หรือองศาสี (Hue; H\*) ของปุ๊อดมีค่าลดลง ค่าความเป็นสีแดง (Redness; a\*) และค่าความสีเหลือง (Yellowness; b\*) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสีของปุ๊อดระหว่างการอบแห้งได้จากการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลชนิดไม่อาศัยเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) และกรดอะมิโน (Amino acid) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารสีที่มีชื่อว่า เมลานอยดิน (Melanoidins) ซึ่งปฏิกิริยาน้ำตาลชนิดไม่อาศัยเอนไซม์นี้ถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) (Ortiz et al. 2013) ดังนั้นปฏิกิริยาเมลลาร์ดของปุ๊อดจึงเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นภายในองค์ประกอบหลักของปุ๊อด (แสดงดังตารางที่ 4.1) คือ คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ 17) และโปรตีน (ร้อยละ 6) โดยมีการเร่งให้ปฏิกิริยาน้ำตาลเกิดได้ดีขึ้นจากการใช้อุณหภูมิสูง (50 – 70 °C) ในการทำแห้ง นอกเหนือจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแล้ว การเปลี่ยนแปลงค่าสีของตัวอย่างปุ๊อดอาจจะเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขององค์ประกอบอาหารเนื่องจากการใช้ความร้อนในการทำแห้ง (Ortiz et al. 2013)

เมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบระหว่างค่าสีของตัวอย่างปุ๊อดที่ผ่านการทำแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิพบว่า ตัวอย่างปุ๊อดที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความสว่างมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C และ 70 °C และมีค่าสีหลักสูงกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ในขณะที่ตัวอย่างปุ๊อดที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความแตกต่างของความเป็นสีน้ำตาลเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (Delta browning index;  $\Delta BI$ ) และค่าความแตกต่างของสีโดยรวมเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (Total color difference;  $\Delta E^*$ ) น้อยกว่าตัวอย่างปุ๊อดที่ผ่านการทำแห้งที่ อุณหภูมิ 50 และ 70 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าคุณสมบัติทางด้านสีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายดีที่สุดเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านความเป็นสีน้ำตาลน้อยที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงด้านความแตกต่างของสีโดยรวมน้อยที่สุด เนื่องจากการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ใช้เวลาการทำ



แห้งที่สั้นกว่าการทำแห้งที่ 50 °C ถึง 247 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 37 (แสดงดังตารางที่ 4.4) จึงส่งผลให้เวลาที่ตัวอย่างปู้ดจะสัมผัสกับลมร้อนมีสั้นกว่า การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการปฏิกิริยาออกซิเดชันขององค์ประกอบอาหารในตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จึงน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวม และการเปลี่ยนแปลงของการเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างปู้ดผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C จึงมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่ 50 °C จากผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับการทดลองของ Ortiz และคณะ (2013) ผู้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิการทำแห้ง (40 – 60 °C) ต่อค่าสีของเนื้อปลาแซลมอน (*Salmo salar* L.) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งจาก 50 °C เป็น 60°C ส่งผลให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้น และค่าความเป็นสีแดง และสีเหลืองลดลง และผลของการศึกษาของ Lee และ Kang (2003) ผู้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิการทำแห้ง (50 – 70 °C) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเนื้อนกกกระจอกเทศอบแห้ง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งจาก 50°C เป็น 60 °C ตัวอย่างมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางคุณภาพของค่าสีของปู้ดที่ผ่านการทำแห้งผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวม และการเปลี่ยนแปลงของการเกิดสีน้ำตาลมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 22 และ 15 ของค่าความแตกต่างของความเป็นสีน้ำตาล และค่าความแตกต่างสีโดยรวมของตัวอย่างปู้ดที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งอุณหภูมิ 70 °C เนื่องจากอุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นอาจมีส่วนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขององค์ประกอบอาหารได้ดีขึ้น (Ortiz et al. 2013) ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าสีในการทำแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 70 °C จึงมีค่ามากกว่า จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าสอดคล้องกับการศึกษาของ Lee และ Kang (2003) ผู้ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิการทำแห้ง (50 – 70 °C) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเนื้อนกกกระจอกเทศอบแห้ง และ Kamal และคณะ (2016) ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิการทำแห้ง (50 – 80 °C) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของแปงสาคุ ซึ่งทั้งสองการทดลองให้ผลสอดคล้องกันคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำแห้งจาก 60 °C เป็น 70 °C ส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง และค่าความเป็นสีแดง และสีเหลืองของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สีของปู้ดหลังจากการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ

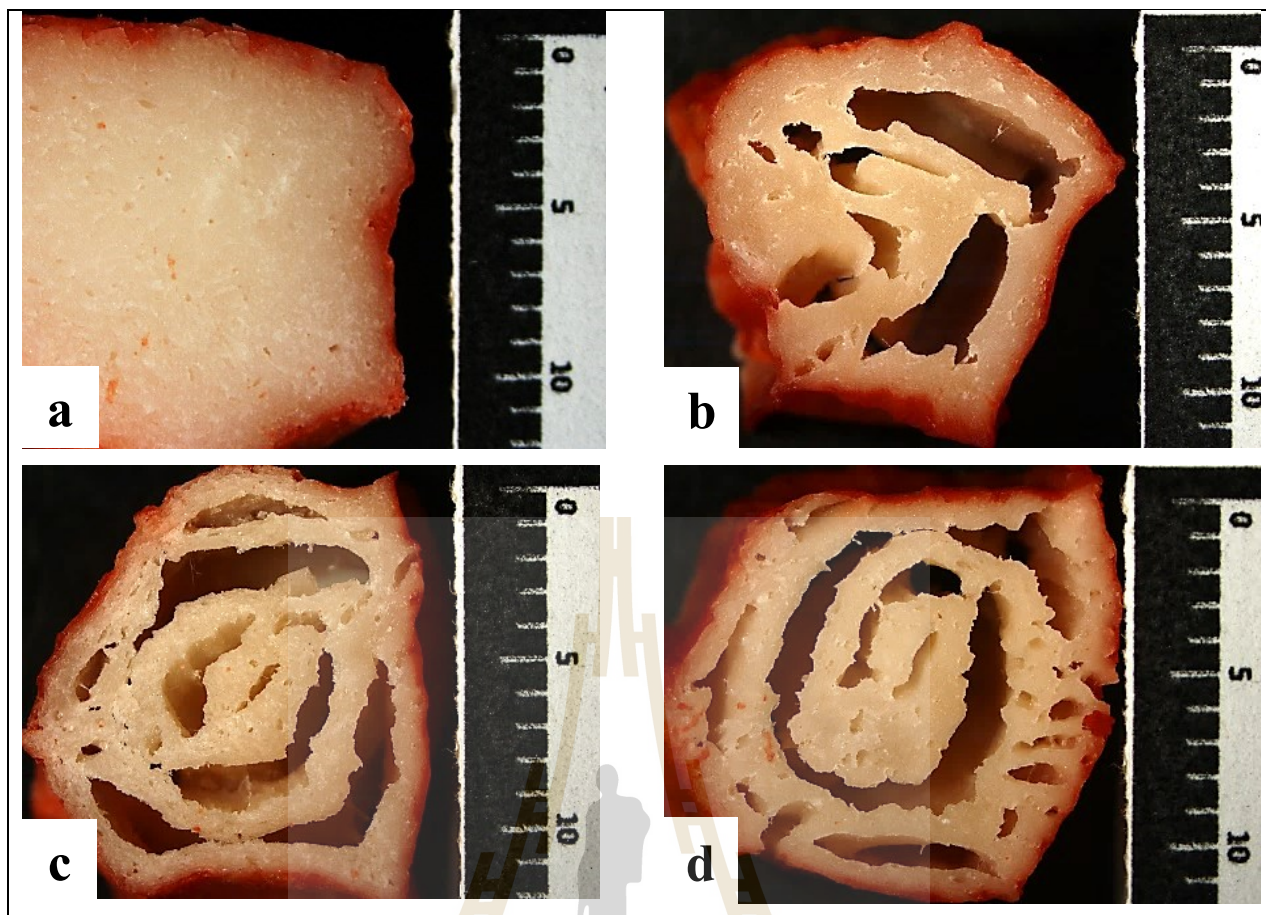
Treatment	Color parameters					
	L*	a*	b*	H*	ΔBI	ΔE*
Control	76.49±0.60 <sup>c</sup>	8.66±0.78 <sup>a</sup>	12.19±0.27 <sup>a</sup>	54.66±2.20 <sup>c</sup>	-	-
50 °C	48.20±1.47 <sup>a</sup>	18.12±0.91 <sup>c</sup>	20.54±0.74 <sup>c</sup>	48.59±1.98 <sup>a</sup>	56.41±4.52 <sup>b</sup>	31.00±1.43 <sup>b</sup>
60 °C	52.33±2.83 <sup>b</sup>	16.48±1.54 <sup>b</sup>	20.14±0.33 <sup>b</sup>	50.80±2.76 <sup>b</sup>	45.54±5.09 <sup>a</sup>	26.65±2.30 <sup>a</sup>
70 °C	48.39±0.84 <sup>a</sup>	17.47±1.45 <sup>c</sup>	20.55±0.45 <sup>c</sup>	49.71±2.62 <sup>ab</sup>	55.09±3.62 <sup>b</sup>	30.64±1.10 <sup>b</sup>

ตัวอักษร <sup>a, b, c</sup> ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) N = 3

#### 4.4.2 คุณสมบัติทางโครงสร้าง (Structural properties)

ลักษณะทางโครงสร้างของปูนอัดสด และปูนอัดที่ผ่านการทำให้แห้งที่สภาวะต่างๆ จะถูกศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทำให้แห้ง (รูปที่ 4.5a) ไม่มีลักษณะโพรงเกิดขึ้นในชิ้นตัวอย่าง ชิ้นตัวอย่างไม่มีการหดตัว ลักษณะชิ้นตัวอย่างที่เห็นไม่เต็มชิ้นถึงแม้จะใช้กำลังขยายที่ต่ำที่สุด (0.5 เท่า) และมีการเห็นส่วนพื้นหลังที่เหลือ (สีดำ) เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปภาพตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้ง (รูปที่ 4.5b - d) สำหรับตัวอย่างปูนอัดที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 – 70 °C (รูปที่ 4.5b - d) จะเห็นได้ว่าที่กำลังขยายของการถ่ายภาพ 0.5 เท่า (กำลังขยายต่ำที่สุด) สามารถบันทึกรูปภาพของชิ้นตัวอย่างได้ทั้งชิ้น และตัวอย่างแห้งจะมีโพรงอากาศปรากฏภายในชิ้นตัวอย่าง และพบว่าชิ้นปูนอัดที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C (รูปที่ 4.5c) และ 70 °C (รูปที่ 4.5d) มีลักษณะโพรงภายในชิ้นตัวอย่างใกล้เคียงกัน คือมีการกระจายตัวของโพรงอากาศมากกว่าชิ้นปูนอัดที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ในขณะที่โพรงอากาศที่ปรากฏในชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C (รูปที่ 4.5b) มีโพรงอากาศจำนวนน้อย แต่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C สำหรับการหดตัวของตัวอย่างหลังจากการทำให้แห้งที่สังเกตจากขนาดพื้นที่ของพื้นหลังที่เพิ่มขึ้นพบว่าพื้นหลังของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C มีขนาดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ตัวอย่างผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีขนาดพื้นที่มากที่สุด

จากการทดลองจึงสรุปได้ว่าการทำให้แห้งส่งผลให้ตัวอย่างปูนอัดมีการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่าการหดตัวของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C มีขนาดใกล้เคียงกัน และการหดตัวที่มากที่สุดสามารถพบได้ในตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เนื่องจากการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ใช้เวลาการทำให้แห้งที่นานที่สุด (677 นาที) ในขณะที่การทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ใช้เวลาในการทำให้แห้งที่สั้นกว่าคือ 430 นาที และ 350 นาที ตามลำดับ ดังนั้นระยะมีเวลาการทำให้แห้งที่นานส่งผลให้ตัวอย่างสัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานาน ทำให้ตัวอย่างมีการหดตัวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Bernstein และ Norena (2014) ผู้ศึกษาผลของระยะเวลาการทำให้แห้ง (2 – 10 ชั่วโมง) ต่อลักษณะโครงสร้างของชิ้นบัวหิมะ โดยจากรายงานพบว่า ระยะเวลาการทำให้แห้งที่นานขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการหดตัวของชิ้นบัวหิมะที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางโครงสร้างของปู้ดสด (a) ปู้ดที่ทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C (b) 60 °C (c) และ 70 °C (d) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอที่กำลังขยาย 0.5 เท่า (กำลังขยายต่ำสุด)

#### 4.4.3 จลนพลศาสตร์ และคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ

ในการประเมินคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างอาหารแห้งโดยทั่วไปนิยมใช้ค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักหลังจากการแช่น้ำ (% Weight gain) ค่าอัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับ (Rehydration ratio) และค่าสัมประสิทธิ์การคืนรูป (Co-efficient of reconstitution) โดยทั้ง 3 พารามิเตอร์นี้จะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำ หรือรักษาน้ำไว้ในโครงสร้างของอาหารเพื่อเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะทางโครงสร้างของอาหารหลังการทำแห้งว่าถูกทำลายโดยความร้อนมากเพียงใด ผลการทดสอบคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของปู้ดหลังจากการทำแห้งแสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งพบว่าค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของปู้ดอยู่ในช่วง ร้อยละ 161.30 ถึง ร้อยละ 181.68 2.62 ถึง 2.82 และ 0.77 ถึง 0.82 สำหรับค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักหลังจากการแช่น้ำ ค่าอัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับ และค่าสัมประสิทธิ์การคืนรูป ตามลำดับ โดยพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ให้ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำต่ำที่สุด เนื่องจากทำแห้งที่อัตราการทำแห้งช้า และการใช้เวลาในการทำแห้งนาน (677 นาที) ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายทางโครงสร้างของปู้ด เช่น การยุบตัวของโครงสร้าง เป็นต้น สำหรับการทำให้แห้งที่อุณหภูมิทำแห้งที่ 60 และ 70°C ให้ผลคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Sandhu และ Parhawk (2002) Nimmol และคณะ (2007) และ Doymaz (2017) พบว่า การทำแห้งที่

อุณหภูมิต่ำ และระยะเวลาการทำแห้งที่ยาวนานส่งผลทำให้มีความเป็นรูพรุนน้อย และให้ค่าอัตราส่วนการดูดคืนน้ำกลับที่ต่ำ

ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับของปุ๋ยมอดที่ผ่านการทำแห้ง

Drying air temperature (°C)	Weight gain (%)	Rehydration ratio	Co-efficient of reconstitution
50	161.30±5.04 <sup>a</sup>	2.62±0.04 <sup>a</sup>	0.77±5.01 <sup>a</sup>
60	181.68±3.65 <sup>b</sup>	2.82±0.04 <sup>b</sup>	0.82±0.01 <sup>b</sup>
70	175.73±4.95 <sup>b</sup>	2.76±0.05 <sup>b</sup>	0.80±0.01 <sup>b</sup>

ตัวอักษร <sup>a, b, c</sup> ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )  $n = 3$

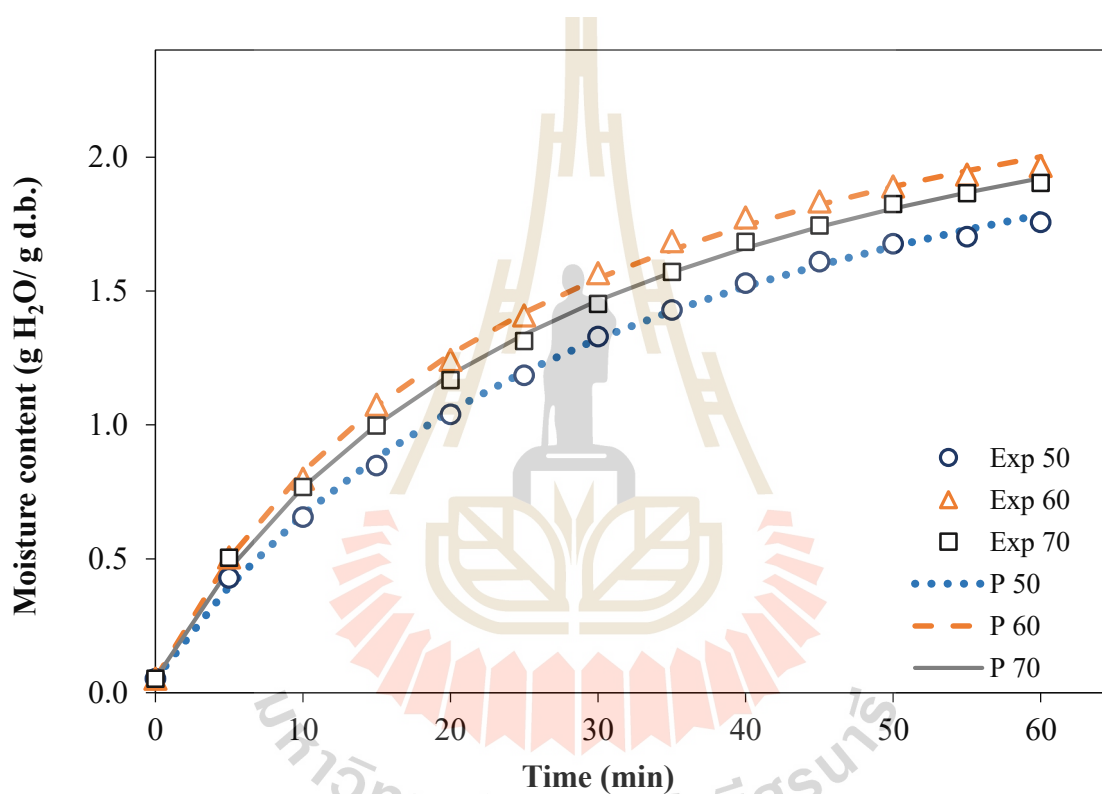
ข้อมูลการดูดคืนน้ำกลับ ได้แก่ ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ค่าปริมาณความชื้น และเวลาในการดูดคืนน้ำกลับจะถูกนำมาพิตกับ 5 สมการการดูดคืนน้ำกลับ (ตารางที่ 2.1; สมการที่ 24 ถึง 28) ได้แก่ Phoungchandang Peleg First order kinetic Exponential และ Weibull ผลของการพิตแสดงดังตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าสมการ Peleg คือสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมการดูดคืนน้ำกลับของปุ๋ยมอดแห้ง โดยให้ค่า  $R^2$  ( $>0.998$ ) สูงที่สุด และให้ค่าและให้ค่า  $\chi^2$  ( $< 2.27E-06$ ) RMSE ( $<1.92E-06$ ) และ SEE ( $<0.001$ ) ต่ำที่สุด ซึ่งสมการ Peleg เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายพฤติกรรมการดูดคืนน้ำกลับของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง เช่น ข้าวสาลี (Maskan 2001) และมันฝรั่ง (Markowski et al., 2009) จากรูปที่ 4.6 ในระยะเริ่มต้นของการดูดคืนน้ำกลับ (0 – 25 นาที) อัตราการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และปริมาณความชื้นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นถึง 1.5 g H<sub>2</sub>O/ g d.b. โดยประมาณ จากนั้นปริมาณความชื้นของตัวอย่างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังจากเวลาที่ 25 จนกระทั่งสิ้นสุดการวัด การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกสามารถอธิบายได้จากในช่วงแรกปริมาณน้ำในตัวอย่าง และสิ่งแวดล้อม (Surrounding) มีความแตกต่างกันมากส่งผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนที่มากจากความแตกต่างของความชื้นในระบบทำให้น้ำเข้าสู่ตัวอย่างแห้ง และเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างของอาหารอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นตัวอย่างจะเริ่มเกิดการพองตัวส่งผลให้ช่องว่างในอาหารลดลงจึงทำให้อัตราการดูดคืนน้ำกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจากการทดลองพบว่าปุ๋ยมอดแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าอัตราการดูดคืนน้ำกลับสูงสุด รองลงมาคือ การทำแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 °C และ 50 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลของการฟิตสมการทางคณิตศาสตร์ของการดูดคืนน้ำกลับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Model	Drying air temperature (°C)	Statistical parameters				Model constants
		R <sup>2</sup>	$\chi^2$ (g or g H <sub>2</sub> O/g d.b.)	RMSE (g or g H <sub>2</sub> O/g d.b.)	SEE (g or g H <sub>2</sub> O/g d.b.)	
Phoungchandang	50	0.999	0.002	0.002	0.043	a = 0.189; b = 0.376; c = -0.005; d = -2.9E-05
Phoungchandang	60	0.999	0.004	0.003	0.057	a = 0.198; b = 0.502; c = -0.008; d = -5.1E-05
Phoungchandang	70	0.997	0.0171	0.012	0.112	a = 0.306; b = 0.471; c = -0.008; d = -4.9E-05
<b>Peleg</b>	<b>50</b>	<b>0.999</b>	<b>1.455E-06</b>	<b>1.231E-06</b>	<b>0.001</b>	<b>k<sub>1</sub> = 12.675; k<sub>2</sub> = 0.368</b>
<b>Peleg</b>	<b>60</b>	<b>0.999</b>	<b>2.273E-06</b>	<b>1.923E-06</b>	<b>0.001</b>	<b>k<sub>1</sub> = 9.363; k<sub>2</sub> = 0.357</b>
<b>Peleg</b>	<b>70</b>	<b>0.999</b>	<b>1.455E-06</b>	<b>1.231E-06</b>	<b>0.001</b>	<b>k<sub>1</sub> = 10.395; k<sub>2</sub> = 0.362</b>
Weibull	50	0.458	0.325	0.275	0.546	a = 8.167; b = 395.487
Weibull	60	0.610	0.265	0.224	0.493	a = 0.034; b = 1.231
Weibull	70	0.569	0.268	0.227	0.496	a = 0.103; b = 4.189
First order kinetic	50	0.989	1.203E-04	1.111E-04	0.011	k <sub>3</sub> = 0.047
First order kinetic	60	0.994	6.075E-05	5.608E-05	0.008	k <sub>3</sub> = 0.053
First order kinetic	70	0.991	9.633E-05	8.892E-05	0.010	k <sub>3</sub> = 0.05
Exponential	50	0.990	1.141E-04	1.053E-04	0.011	k <sub>4</sub> = 0.049
Exponential	60	0.994	6.533E-05	6.031E-05	0.008	k <sub>4</sub> = 0.054
Exponential	70	0.991	1.141E-04	1.053E-04	0.011	k <sub>4</sub> = 0.051

ตารางที่ 4.8 ผลของการฟิตสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของความชื้นระหว่างการดูดคืนน้ำกลับกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

Drying air temperature (°C)	Statistical parameters				Model constant
	R <sup>2</sup>	$\chi^2$ (m <sup>2</sup> /s)	RMSE (m <sup>2</sup> /s)	SEE (m <sup>2</sup> /s)	Moisture diffusivity (D <sub>eff</sub> , m <sup>2</sup> /s)
50	0.927	6.300E-04	5.800E-04	0.025	3.897E-07
60	0.938	4.600E-04	4.200E-04	0.021	4.383E-07
70	0.938	4.300E-04	4.000E-04	0.021	4.123E-07



รูปที่ 4.6 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Exp) และข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (P) ของปุ๋ยมูลโดยใช้สมการ Peleg model

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาดีซอร์พชันไอโซเทิร์ม ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง และลักษณะทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากการผลิตปุ๋ยมูล โดยการทำแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งสมการซอร์พชันไอโซเทิร์มทั้ง 14 สมการถูกนำมาเพื่อศึกษาหาสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของตัวอย่างปุ๋ยมูล ซึ่งจากการทดลองพบว่า Double polynomial model คือสมการที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ค่า  $R^2$  สูงสุดซึ่งอยู่ในช่วง 0.993 ถึง 0.996 เน็ตไอโซสเทอริกซิตีของดีซอร์พชันไอโซเทิร์มของตัวอย่างปุ๋ยมูลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างลดลง

ลักษณะเฉพาะของการทำแห้งของตัวอย่างปุ๋ยมูลถูกศึกษาโดยการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิลมร้อน 3 อุณหภูมิคือ 50 60 และ 70 °C ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s สมการการทำแห้งของแผ่นบาง 5 สมการถูกนำมาพิตกับข้อมูลการทำแห้งของตัวอย่างปุ๋ยมูล และพบว่าสมการ Approximation of diffusion เป็นสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมการทำแห้งของตัวอย่างปุ๋ยมูล การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนส่งผลให้ลดระยะเวลาการทำแห้งได้ถึงร้อยละ 48.30 และสามารถพบอัตราการแห้งแบบลดลงในการทำแห้งตัวอย่างปุ๋ยมูล สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของตัวอย่างในการทำแห้งอยู่ในช่วง  $5.32 \times 10^{-8}$  ถึง  $8.83 \times 10^{-8}$   $m^2/s$

คุณลักษณะทางคุณภาพของปุ๋ยมูลที่ผ่านการทำแห้ง ได้แก่ ค่าสี ลักษณะทางโครงสร้าง คุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับ และคุณสมบัติทางความหนืด พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ค่าคุณสมบัติทางด้านสีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายดีที่สุดเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านความเป็นสีน้ำตาล และความแตกต่างของสีโดยรวมน้อยที่สุด การยุบตัวของโครงสร้างตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C มีขนาดใกล้เคียงกัน การยุบตัวทางโครงสร้างพบมากที่สุดในตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C การทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ให้ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำต่ำที่สุด ส่วนการทำแห้งที่อุณหภูมิทำแห้งที่ 60 และ 70 °C ให้ผลคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่ทั้ง 2 อุณหภูมิให้ค่าคุณสมบัติการดูดคืนน้ำกลับที่ดีกว่าการทำแห้งที่ 50 °C สมการ Peleg เป็นสมการที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรมการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของตัวอย่างในการดูดคืนน้ำกลับของตัวอย่างแห้งอยู่ในช่วง  $3.90 \times 10^{-7}$  ถึง  $4.38 \times 10^{-7}$   $m^2/s$

จากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เหมาะสมที่จะใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปุ๋ยมูลเนื่องจากให้ค่าคุณภาพ (ค่าสี ลักษณะทางโครงสร้าง คุณสมบัติและการดูดคืนน้ำกลับ) ที่ดีกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C

## บรรณานุกรม

- Afolabi IS. (2014). Moisture migration and bulk nutrients interaction in a drying food systems: A review. *Food and Nutrition Sciences* 5:692-714.
- Al- Muhtaseb AH, McMinn WAM and Magee TRA. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 80:118-128.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2000) Official methods of analysis, 17th ed. Gaithersburg, MD, USA.
- Barbosa-Canovas GV. (2009). Food engineering-volume III. EOLSS Publications, Paris.
- Benson SW. (1960). The foundations of chemical kinetics. McGraw-Hill, London.
- Bernstein A and Norena CPZ. (2014). Study of thermodynamic, structural, and quality properties of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying. *Journal of Food Bioprocess Technology* 7:148 – 160.
- Brunauer S, Emmett PH and Teller E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60:309–319.
- Chen CS and Morey RV. (1989). Comparison of four EMC/ERH equations. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers* 32: 983-990.
- Chirife J and Iglesias HA. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1—A review. *Journal of Food Technology* 13:159–174.
- Comaposada J, Gou P, Pakowski Z and Arnau J. (2000). Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. *Drying Technology* 18:723-746.
- Condon JB. (2006). Surface area and porosity determinations by physisorption: measurements and theory, Elsevier, Amsterdam
- Crank J. (1975). The mathematics of diffusion, 2nd ed. Clarendon Press, University of Michigan, England.
- Doymaz I. (2017). Drying kinetics, rehydration ratio and color characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat Mass Transfer* 53:25-35.
- Fellows P. (2009). Food processing technology: Principles and practice, 3rd ed. Elsevier, Cambridge.
- Górnicki K, Kaleta A, Winiczenko R, Chojnacka A and Janaszek M. (2013). Some remarks on modelling of mass transfer kinetics during rehydration of dried fruits and vegetables In:



- Nakajima H (ed) Mass transfer – advances in sustainable energy and environment oriented numerical modeling. InTech, London, pp 431 – 458.
- Goula AM and Adamopoulos KG. (2009). Modeling the rehydration process of dried tomato. *Drying Technology* 27:1078-1088.
- Hadrich B, Boudhrioua N and Kechaou N. (2008). Experimental and mathematical study of desorption isotherm of Tunisian sardine (*Sardinella aurita*). *Food and Bioproducts Processing* 86:242-247.
- Henderson S and Pabis P. (1961). Grain drying theory, II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6:169 – 174.
- Henderson SM. (1952). A basic concept of equilibrium moisture, *Agricultural Engineering* 33:29–32.
- Iglesias H and Chirife J. (1976). Prediction of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *Journal of Food Technology* 11:109 – 116.
- Iglesias HA and Chirife C. (1976). Isothermic heat of water vapour sorption on dehydrated foods: Part II, Hysteresis and heat of sorption comparison with B.E.T. theory. *Lebensm-Wiss Technol* 9:123–127
- Inyang UE, Oboh IO and Etuk BR. (2018). Kinetic models for drying techniques—Food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science* 8:27-48.
- Ji C (2018). Surimi and surimi seafood in ASEAN; Market status and consumers' trends. Korea-ASEAN International Seafood Symposium, Bangkok, Thailand (March 31, 2018).
- Kamal MM, Baini R, Mohamaddan S, Selaman OS, Zauzi NA, Rahman MR, Rahman NA, Chong, KH, Atan MF, Samat NASA, Taib SNL and Othman AK. (2016). Effect of temperature to the properties of sago starch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 206:1 – 13.
- Krokida M and Marinos-Kouris D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57:1–7.
- Lee SW and Kang CS. (2003). Effects of moisture content and drying temperature on the physicochemical properties of ostrich jerky. *Food/Nahrung* 47:330 – 333.
- Lewicki PP. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering* 21:127–144.
- Lewicki PP. (2000). Raoult's law based food water sorption isotherm. *Journal of Food Engineering* 43:31–40.

- Lewis W. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 13:427–432.
- Lewis W. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 13:645 – 663.
- Machado MF, Oliveira FAR and Cunha LM. (1999). Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal. *Int Journal of Food Science and Technology* 34: 47–57.
- Markowski M, Bondaruk J and Blaszcak W. (2009). Rehydration behavior of vacuum-microwave dried potato cubes. *Drying Technology* 27:296–305.
- Maskan M. (2001). Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. *Journal of Food Engineering* 47:51–57.
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology* 20:1503 – 1513.
- Mujumdar A. (1995). *Handbook of industrial drying*, 2nd ed. CRC Press, New York.
- Mundada M, Hathan B and Maske S. (2010). Convective dehydration kinetics of osmotically pretreated pomegranate arils. *Biosystems Engineering* 107:307–316.
- Nimmol C, Devahastinb S, Swasdisevi T and Soponronnarit S. (2007). Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far infra-red radiation. *Journal of Food Engineering* 81:624–633.
- Onwude DI, Hashim N, Janius RB, Nawi NM and Abdan K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15:599-618.
- Ortiz J, Lemus-Mondaca R, Vega-Galvez, Ah-Hen Kong, Puente-Diaz L, Zura-Bravo L and Aubourg S. (2013). Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. *Food Chemistry* 139:162 – 169.
- Oswin C. (1946). The kinetics of package life III isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry* 65: 419 – 421.
- Overhult D, White H and Ross I. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 16:112 – 113.
- Peleg M. (1988). An empirical model for description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science* 53:1216–1218.

- Pfost H, Maurer S, Chung D and Miliken G. (1976). Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grain. Technical Report 76-3520. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- Phahom T and Phoungchandang S. (2018). Drying characteristics and quality attributes of *Thunbergia laurifolia* using microwave drying. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology* 23:1 – 12.
- Phahom T, Phoungchandang S and Kerr WL. (2017). Effects of steam-microwave blanching and different drying processes on drying characteristics and quality attributes of *Thunbergia laurifolia* Linn. leaves. 97:3211 – 3219.
- Phoungchandang S and Kongpim P. (2012). Modelling using a new thin layer drying model and drying characteristics of sweet basil (*Ocimum basilicum* Linn.) using tray and heat pump-assisted dehumidified drying. *Journal of Food Process Engineering*. 35:851 – 862.
- Phoungchandang S and Woods JL. (2000). Moisture diffusion and desorption isotherms for banana. *Journal of Food Science* 65:651-657.
- Phoungchandang S. (1986). Development of a small scale processing system for green peas, MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Pickett G. (1945). Modification of the Brunauer-Emmett-Teller theory of multimolecular adsorption. *Journal of the American Chemical Society* 67:1958–1962.
- Ponwiboon N and Rotjanakorn T. (2017). Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet. *International Food Research Journal* 24:1292-1300.
- Potisate Y, Phoungchandang S and Kerr WL. (2014). The effects of predrying treatment and different drying methods on phytochemical compound retention and drying characteristics of moringa leaves (*Moringa oleifera* Lam.). *Drying technology* 32:1970 – 1985.
- Ramaswamy H and Marcotte M. (2005). *Food Processing: Principles and applications*. CRC Press, Florida.
- Ramos IN, Miranda JMR, Brandao TRS and Silva CLM. (2010). Estimation of water diffusivity parameters on grape dynamic drying. *Journal of Food Engineering* 97:519 – 525.
- Saini C, Singh S and Saxena DC. (2012). Thin layer drying characteristics of sweet potato starch based films and mathematical modelling. *Journal of Food Processing and Technology* 3:1-8.
- Sandhu KS and Parhawk B. (2002). Studies on the preparation of dehydrated potato cubes. *Journal of Food Science and Technology* 39:594-602.

- Thompson T, Peart R and Foster G. (1968). Mathematical simulation of corn drying a new model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 24:582 – 586.
- Toujani M, Hassini L, Azzous S and Belghith A. (2011). Drying characteristics and sorption isotherms of silverside fish (Atherina). International Journal of Food Science and Technology 46: 549-600.
- Trirattanapikul W and Phoungchandang S. (2014). Microwave blanching and drying characteristics of *Centella asiatica* (L.) urban leaves using tray and heat pump-assisted dehumidified drying. Journal of Food Science and Technology 51: 3623-3634.
- Tsami E, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D and Saravacos GD. (1990). Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. Journal of Food Science 55:1594-1962.
- Van den Berg C and Bruin S. (1981). Water activity and its estimation in food systems, In: Rockland LB, Stewart GF (ed) Water Activity: influences on food quality. Academic, New York, pp. 147–177.
- Vidal-Giraud B, Chateau D. (2007). World surimi market; Globalfish research programme. Rome, FAO 89:1 -119.
- Yaldyz O and Ertekyn C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. Drying Technology 19:583–597.
- Zogzas NP, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. Drying Technology 14:2225-2253.

## ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย ไตรภพ พาหอม  
ชื่อ -นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Traiphop Phahom
2. ตำแหน่งปัจจุบัน
  - ตำแหน่งบริหาร -
  - ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์ ดร.
3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
  - หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก อาคารวิชาการ 2 สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
  - หมายเลขโทรศัพท์ 044-223704
  - ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) traiphop@sut.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
  - วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) มหาวิทยาลัยขอนแก่น เกียรตินิยมอันดับ 2 (GPAX: 3.51)
  - ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) มหาวิทยาลัยขอนแก่น (GPAX: 3.94)
  - นักวิจัยหลังปริญญาเอก ณ AgroSup Dijon, University of Burgundy, France
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
  - เทคโนโลยีการทำแห้ง และสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับกระบวนการทำแห้ง
  - การแปรรูปอาหาร
  - การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพร
  - ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา และจลนพลศาสตร์การเสื่อมสลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย
  - 6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: -
  - 6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย: -
  - 6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว:
    - Drying characteristics and quality attributes of *Thunbergia laurifolia* leaves using microwave drying. 2018. Asia-Pacific journal of Science and Technology (แหล่งทุน: โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก)

- Effect of packaging types and storage conditions of dried *Thunbergia laurifolia* leaves and degradation kinetics of bioactive compounds. 2017. Journal of Food Science and Technology (แหล่งทุน: โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก)

- Effects of steam-microwave blanching and different drying processes on drying attributes of *Thunbergia laurifolia* Linn. leaves. 2017. Journal of the Science of Food and Agriculture (แหล่งทุน: โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก)

- Influences of drying temperatures on drying characteristics and physical properties of *Aloe barbadensis* Mill. leaves using hot air drying. 2016. Proceeding in 3<sup>rd</sup> International Postgraduate Symposium on Food, Agriculture and Biotechnology.

#### 6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ:

- การพัฒนาเครื่องลดความชื้นข้าวแบบไฮบริดประสิทธิภาพสูงโดยอาศัยการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ คลื่นไมโครเวฟ และการเหนี่ยวนำความร้อน สนับสนุนโดยสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

- การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา ซอร์พชันไอโซเทอรัม และลักษณะทางเคมีกายภาพของบัวแดง ภายใต้โครงการ Junior research fellowship 2019 โดยการสนับสนุนจากสถานทูตฝรั่งเศส และ AgroSup Dijon, France

