



## จลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาข้าวสาร ด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

\* จุฑารัตน์ ทะสระระ<sup>1</sup>, สุภวรรณ ภูริระวินิชย์กุล<sup>2</sup> และ ยุทธนา ภูริระวินิชย์กุล<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์คณาจารย์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

181ถ.เจริญประดิษฐ์ ต.รูสะมิแล อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ 15 ถ.กาญจนวณิชย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

<sup>3</sup>ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ 15 ถ.กาญจนวณิชย์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

ผู้เขียนติดต่อ: จุฑารัตน์ ทะสระระ E-mail: ajutarut@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสาร โดยใช้ตู้อบแห้งที่มีลมร้อน และรังสีอินฟราเรด เป็นแหล่งพลังงาน โดยพิจารณาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ตลอดจนศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งและความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดต่อการลดความชื้น ทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C ความเร็วของลมร้อนที่เลือกใช้มีค่าเฉลี่ย  $1.0 \pm 0.2$  เมตรต่อวินาที กำลังของรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 วัตต์ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 150-155% มาตรฐานแห้ง และ  $15.0 \pm 2.0\%$  มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาอธิบายลักษณะเฉพาะของการอบแห้งปลาข้าวสารโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของ Page เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด

คำสำคัญ: การอบแห้ง; ปลาข้าวสาร; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์; รังสีอินฟราเรด; ลมร้อน

### บทนำ

ปัจจุบันปลาข้าวสารอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทะเลที่ได้รับความนิยมมากทั้งบริโภคในพื้นที่ และเป็นของฝาก สินค้าเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ กรรมวิธีการผลิตทั่ว ๆ ไปจะใช้การตากแดด มักใช้เวลาในการอบแห้งนาน ไม่สามารถอบให้แห้งภายในวันเดียว ได้อาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายได้ เช่น ขึ้นรา และอาจมีการปนเปื้อนของฝุ่นละอองต่าง ๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำลง ส่งผลต่อราคาจำหน่ายซึ่งจะขึ้นกับคุณภาพ ขนาดและชนิดของผลิตภัณฑ์รวมทั้งความชื้นสุดท้าย ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาในการเก็บรักษา ขั้นตอนการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาจึงมี

ความสำคัญ การทำแห้งโดยส่วนใหญ่จะอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงด้วยการตากแดดในที่โล่งโดยอาศัยการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) [1, 2] โดยให้เหลือความชื้นประมาณ 20-25% มาตรฐานแห้ง ซึ่งในกรณีที่ไม่มีฝนตกนั้น วัสดุแห้งได้ภายในระยะเวลาประมาณ 2 ถึง 3 วัน หากมีฝนตกหรือในช่วงฤดูฝนที่ยาวนานหลาย ๆ เดือนติดต่อกัน ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นเป็นระยะเวลาที่ปริมาณแสงอาทิตย์ ในแต่ละวันมีช่วงสั้น ทำให้ไม่สามารถลดความชื้นโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง อีกทั้งสภาวะอากาศแวดล้อมในฤดูกาลดังกล่าวมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศค่อนข้างสูงทำให้ความชื้นไม่สามารถระบายออกให้กับอากาศแวดล้อมได้ง่าย ดังนั้นชาวประมงใน

ชุมชนจะอาศัยการทำแห้งด้วยการใช้อากาศร้อนจากการเผาไม้พิน ซึ่งลมร้อนที่ได้มีอุณหภูมิต่ำและไม่คงที่ จึงทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงมากและต้องใช้เวลาานาน จึงเป็นการสูญเสียพลังงานอย่างมาก พบว่าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแห้ง ขั้นตอนการลดความชื้นจะมีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ ขั้นตอนดังกล่าวเกิดปัญหาขึ้นมา 2 ประการหลัก คือ (1) การปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรกเนื่องจากกรรมวิธีและสถานที่สำหรับใช้ในการตากแห้ง รวมทั้งเกิดการรบกวนจากแมลงวัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสะอาดไม่เพียงพอ (2) ระยะเวลาในการตากแห้ง อาจต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแสงแดดในแต่ละวันมีความไม่สม่ำเสมอออกนอกนี้ภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกตลอดทั้งปี ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีความชื้นอยู่สูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเน่าเสียและเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี เอ็นไซม์และเชื้อจุลินทรีย์ เกิดกลิ่นเหม็นหืน หรือกลิ่นฉุนและมีสีออกน้ำตาลดำ ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานและไม่มีมูลค่าสามารถทำได้โดยการเพิ่มคุณภาพปลาแห้ง โดยการปรับปรุงกระบวนการผลิต ตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มแรกของกระบวนการผลิตรวมทั้งกระบวนการลดความชื้นด้วยวิธีการอบแห้ง

ดังนั้นการพัฒนากระบวนการผลิตอาหารทะเลตากแห้งจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อวิเคราะห์แก้ปัญหาให้ชุมชน ทำให้ชุมชนสามารถพึ่งพาตนเอง และผลิตอาหารทะเลตากแห้งที่มีคุณภาพสูง สามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองผลิตปลาข้าวสารอบแห้งโดยเลือกใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า และรังสีอินฟราเรด รวมถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง ตลอดจนการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

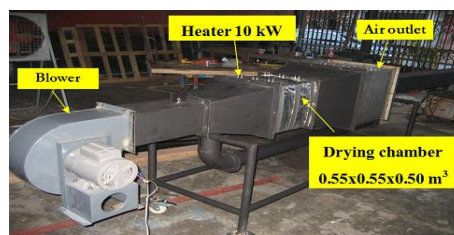
**วัสดุ:** วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ ปลาข้าวสาร (รูปที่ 1) เติร์มตัวอย่างโดยการนำปลาไปต้มในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 5-10 นาที อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  หาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (1995) [3]



รูปที่ 1 ปลาข้าวสารสำหรับใช้ในการทดลอง

### อุปกรณ์

- เครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้ลมร้อนจากขดลวดความร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน (รูปที่ 2) ประกอบด้วยห้องอบแห้ง ขนาด  $61 \times 48 \times 53$  ลูกบาศก์เซนติเมตร บุฉนวนใยแก้วหนา 5 เซนติเมตร เทอร์โมสตัทเป็นเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิสัญญาณจะต่อกับเครื่องวัดสัญญาณเวลาที่ความละเอียด  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  ภายในห้องอบแห้งมีหลอดรังสีอินฟราเรดจำนวน 3 หลอด หลอดละ 500 วัตต์ ระยะห่างระหว่างหลอดกับวัสดุ 15 เซนติเมตร ถาดบรรจุตัวอย่างสำหรับใช้ในการอบแห้ง ขนาด  $41.5 \times 47.5$  ตารางเซนติเมตร ขดลวดความร้อนไฟฟ้า ขนาด  $1,000 \times 2$  วัตต์ และพัดลมใบพัดเหวี่ยงโค้งหน้าแรงอัดสูงขนาด 2 แรงม้า



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้ลมร้อนจากขดลวดความร้อนและรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน (PSU-TRD-08 2)

- เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด  $\pm 0.1$  กรัม.
- เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ SUPCON ความละเอียด  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง และอุณหภูมิแวดล้อม
- เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-45 ความละเอียด  $\pm 0.01$  เมตรต่อวินาที

### วิธีการวิจัย

#### การทดลองอบแห้งปลาข้าวสาร

นำปลาข้าวสารที่ผ่านการต้มแล้วใส่ถาดอบแห้ง เกลี่ยให้ทั่วถาด ทดลองอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C อัตราการไหลของอากาศ 1.0±0.2 เมตรต่อวินาที สำหรับรังสีอินฟราเรดทดลองที่กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 วัตต์ บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง และ อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องอบแห้ง กำหนดความชื้นสุดท้ายของปลาข้าวสารอยู่ในช่วง 15.0±2.0 % มาตรฐานแห้ง

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาอบแห้งดำเนินไปที่เวลาต่าง ๆ โดยคำนวณจาก

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

เมื่อ  $M_t$ ,  $M_{in}$  และ  $M_{eq}$  คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล (% มาตรฐานแห้ง) ตามลำดับ

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ จึงสามารถเขียนสมการที่ (1) ใหม่เป็น

$$MR = \text{Moisture ratio} = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (2)$$

### สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, $D_{eff}$ )

งานวิจัยนี้ใช้สมการการแพร่ของ Fick ในการอธิบายการแพร่ความชื้นภายในปลาข้าวสารระหว่างการอบแห้ง โดยสมมติการแพร่ของน้ำออกจากตัวปลาข้าวสารเกิดจากเกรเดียนท์ของความเข้มข้นของความชื้น และสมมติให้ตัวปลาข้าวสารมีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (infinite slab), การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ [4] ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังสมการที่ (3) และเนื่องจากพจน์ท้าย ๆ ของสมการที่ (3) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึง

ประมาณค่าโดยพิจารณาจากพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ตามสมการที่ (4)

$$MR = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

$$MR = \frac{8}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของปลาข้าวสารหาจากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้ง เป็นไปตามสมการของ Arrhenius [5] ดังสมการ

$$D = A \exp\left[\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right] \quad (5)$$

เมื่อ  $D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางเมตรต่อชั่วโมง),  $L$  คือ ความหนาของวัสดุ (เมตร) และ  $t$  คือ เวลา (ชั่วโมง),  $A$  และ  $B$  คือ ค่าคงที่ของสมการ และ  $T_{abs}$  คือ อุณหภูมิ (K)

### การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

สมการอบแห้งทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล ใช้สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งโดยนำผลการทดลองอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่าง ๆ เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 5 สมการ โดยมีรูปแบบสมการดังตารางที่ 1

จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อเลือกสมการ 2 อบแห้งชิ้นบางที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ที่สูงที่สุด และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (6)-(7) ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{pred,i})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด,  $MR_{exp,i}$ ,  $MR_{pred,i}$  และ  $\overline{MR_{pred}}$  คืออัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง การทำนาย และอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย ตามลำดับ

ตารางที่ 1 รูปแบบสามารถอบแห้งชิ้นบางแบบเอมพิริคัล ที่ใช้ในการทดลอง [6-8]

Model name	Model equation	Equation No.
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(8)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(9)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(10)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	(11)
Two-term	$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-k_1 t)$	(12)

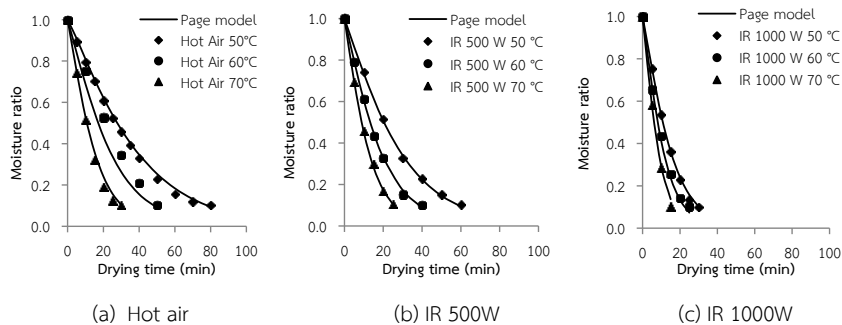
### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสาร

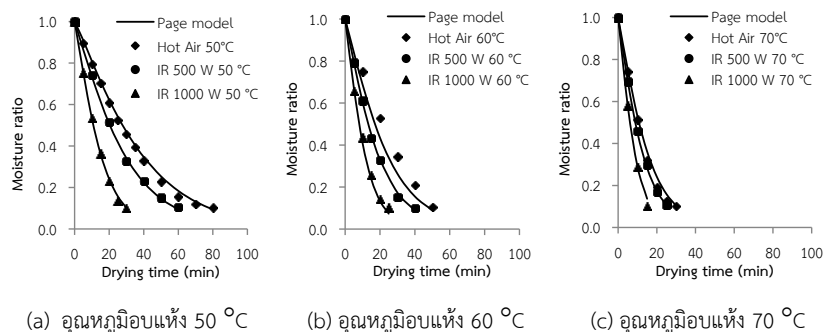
อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3-4 ซึ่งให้เห็นว่า การอบแห้งปลาข้าวสารเป็นการอบแห้งแบบอัตรการอบแห้งลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นในปลาข้าวสารเกิดการถ่ายเทอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการทดลองขณะที่ความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาข้าวสารไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้นความชื้นบริเวณผิวและภายในตัวปลาข้าวสารจะมีค่าต่ำลง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาข้าวสารไปยังผิวหน้าจะลดลงอย่างช้า ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9-11] ซึ่งอัตราการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาอบแห้งจะมี

ความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด (500 และ 1000 วัตต์) ทุกสภาวะการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตรการอบแห้ง และการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีอัตรการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำ ดังนั้นระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำในทุกแหล่งพลังงานความร้อน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน (รูปที่ 4) พบว่าการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการใช้ลมร้อน



รูปที่ 3 ผลการทดลองอบแห้งปลาข้าวสารที่อุณหภูมิ 50-70°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1000 วัตต์ เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page



รูปที่ 4 เปรียบเทียบปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ (ลมร้อนและรังสีอินฟราเรด) เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page

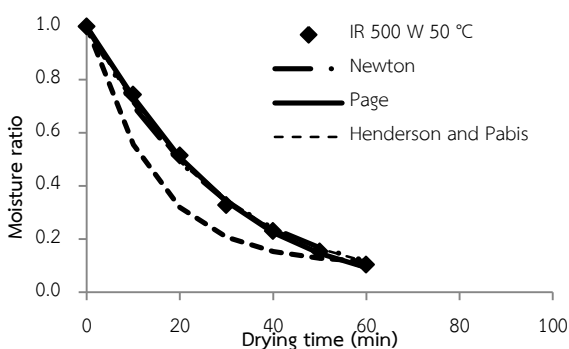
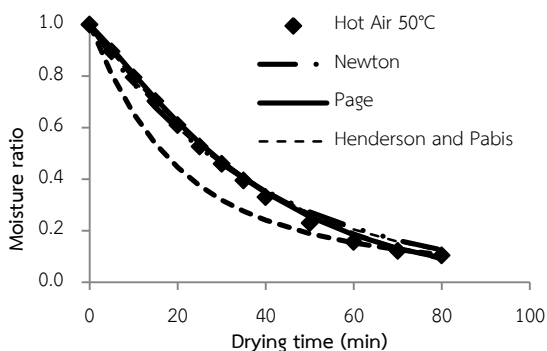
### สมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล

นำข้อมูลการทดลองอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของปลาข้าวสาร โดยเลือกใช้สมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้ทั่วไปในงานทางด้าน การอบแห้ง 5 สมการ ผลการการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Statistica ตามรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล แสดงค่าคงตัวของสมการอบแห้ง ดังตารางที่ 2 โดยค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัล คือ ค่า k แสดงในรูปแบบสมการที่ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้งตามรูปแบบสมการอาเรเนียส

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  และค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน

Model type	Constant value	$R^2$	RMSE
<b>Hot Air</b>			
Newton	$k=438640.506\exp(-5378.196/T)$	0.9808	0.0418
Page	<b><math>k=2223795.116\exp(-6087.289/T)</math>, <math>n=1.160</math></b>	<b>0.9869</b>	<b>0.0346</b>
Henderson and Pabis	$k=402351.680\exp(-5339.323/T)$ , $a=1.027$	0.9823	0.0398
Logarithmic	$k=270991.331\exp(-5277.445/T)$ , $a=1.121$ , $b=-0.109$	0.9855	0.0363
Two-term exponential	$k=0.003\exp(-0.204/T)$ , $k_1=0.057$ , $a=0.232$ , $b=0.777$ , $n=1.288$	0.8243	0.1266
<b>IR 500W</b>			
Newton	$k=56731.364\exp(-4614.528/T)$	0.9949	0.0222
Page	<b><math>k=259224.297\exp(-5254.895/T)</math>, <math>n=1.137</math></b>	<b>0.9991</b>	<b>0.0093</b>
Henderson and Pabis	$k=58107.845\exp(-4615.073/T)$ , $a=1.021$	0.9957	0.0197
Logarithmic	$k=52122.067\exp(-4633.008/T)$ , $a=1.091$ , $b=-0.082$	0.9978	0.0142
Two-term exponential	$k=-0.611\exp(-0.080/T)$ , $k_1=0.074$ , $a=0.056$ , $b=0.9475$ , $n=0.00004$	0.9977	0.0941
<b>IR 1000W</b>			
Newton	$k=1369.672\exp(-3201.535/T)$	0.9923	0.0281
Page	<b><math>k=4350.792\exp(-3728.99/T)</math>, <math>n=1.172</math></b>	<b>0.9977</b>	<b>0.0155</b>
Henderson and Pabis	$k=1363.141\exp(-3194.001/T)$ , $a=1.017$	0.9930	0.0265
Logarithmic	$k=1113.321\exp(-3199.338/T)$ , $a=1.120$ , $b=-0.114$	0.9964	0.0191
Two-term exponential	$k=0.338\exp(-0.100/T)$ , $k_1=0.264$ , $a=0.314$ , $b=0.729$ , $n=0.000029$	0.7860	0.1478



(ก) Hot air 50°C

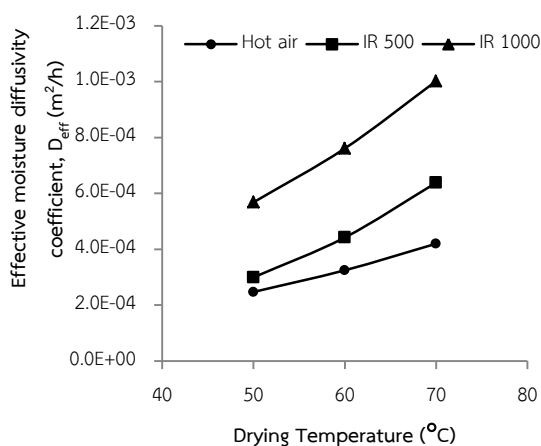
(ข) IR 500W 50°C

รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากผลการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสาร ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง

แหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง	สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น	R <sup>2</sup>
Hot air	$D_{\text{eff}}=2.177\exp(-24401.21/RT)$	0.8450
IR 500W	$D_{\text{eff}}=129.233\exp(-34857.978/RT)$	0.9190
IR 1000W	$D_{\text{eff}}=9.578\exp(-26147.173/RT)$	0.9023

### การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ตารางที่ 3 และรูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างกำลังรังสีอินฟราเรด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกรณีอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กำลัง 1000 วัตต์ มีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 วัตต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง  $2.47 \times 10^{-4}$  -  $4.20 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยลมร้อน)  $3.0 \times 10^{-4}$  -  $6.38 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 วัตต์) และ  $5.68 \times 10^{-4}$  -  $1.00 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1000 วัตต์) ตามลำดับ



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ของการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยแหล่งพลังงานต่าง ๆ อุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรด จะพบการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิสูงอัตราการอบแห้งจะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งปลาข้าวสารได้ดีที่สุดในทุกแหล่งพลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด

อย่างไรก็ดี แม้ว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง และกำลังรังสีอินฟราเรดสูง คือที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C กำลังของรังสีอินฟราเรด 1000 วัตต์ จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้น แต่อาจไม่ใช่สภาวะที่ดีที่สุด เพราะยังต้องพิจารณาปัจจัยของคุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานประกอบเข้าไปด้วย ซึ่งเป็นส่วนที่จะต้องศึกษาต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทำโครงการวิจัย และทุนสนับสนุนในการนำเสนองานในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

[1] Nathakaranakule, A., Jaiboon, P. and Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared



- radiation assisted drying of longan fruit, *Journal of Food Engineering*, pp. 662-668.
- [2] Abe, T. and Afzal, T. M. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 67(4), pp. 289-297.
- [3] AOAC The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA., (1995).
- [4] Crank, J. *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, U.K, (1975).
- [5] Panchariya, P. C., Popovic, D. and Sharma, A. L. (2002). Desorption isotherm modelling of black tea using artificial neural networks. *Drying Technol.*, Vol. 20(2), pp. 351-362.
- [6] Tirawanichakul, S., Tirawanichakul, Y. and Sniso, E. (2008). Paddy Dehydration by Adsorption: Thermo-Physical Properties and Diffusion Model of Agriculture Residues. *Biosyst. Eng*, Vol. 99(2), pp. 249-255.
- [7] Tirawanichakul, S., Tasara, J. and Tirawanichakul, Y. (2007). Thermo-physical properties and effect of electrical field on drying process of paddy. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, pp. 325-333.
- [8] Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S and Soponronnarit, S. (2004). Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Technol.*, Vol. 22, pp. 759-778.
- [9] Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H. and Deng, S. (2011). Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. *Industrial Crops and Products*, Vol. 34(3), pp.1588-1594.
- [10] Baysal, T., Icier, F., Ersus, S. and Yildiz, H. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*, Vol. 21(8), pp.68-73.
- [11] Wang, J. (2002). A single-layer model for far-infrared radiation drying of onion slices. *Drying Technol.*, Vol. 20(10), pp. 1941-1953.