

---

## แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสารกรอบด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด Strategic Development of Crisp Tiny Anchovy Using Hot Air and Infrared Drying

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

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

<sup>3</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

Jutarut Tasara<sup>1\*</sup>, Supawan Tirawanichakul<sup>2</sup> and Yutthana Tirawanichakul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University.

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

<sup>3</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University.

---

### บทคัดย่อ

อาหารสุขภาพกำลังเป็นที่นิยมและมีแนวโน้มการเติบโตทางธุรกิจอาหารอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสารแทนการทอดด้วยน้ำมันเพื่อใช้เป็นอาหารสุขภาพโดยใช้ตู้อบแห้งแบบกดที่ใช้ลมร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลาข้าวสาร คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิผล และพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งในการทดลองนี้ และได้ทำการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 50-70°C และความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ 500-1,000 W ที่มีต่อการลดความชื้นของปลาข้าวสาร โดย ความเร็วของลมร้อนที่เลือกใช้มีค่าเฉลี่ย  $1.0 \pm 0.2$  m/s ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของปลาข้าวสารแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 150-155 มาตรฐานแห้ง และร้อยละ  $15.0 \pm 2.0$  มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งจะแปรผันกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลหลายๆ รูปแบบด้วยวิธีการสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาเลือกสมการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารได้ดีที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ผลการทดลองสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิผล ที่หาได้จากกฎการแพร่ของฟิกส์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนขึ้นประสิทธิผลของปลาข้าวสาร ขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง และกำลังของรังสีอินฟราเรด และมีค่าอยู่ในอันดับ  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h และพบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

**คำสำคัญ:** อาหารสุขภาพ ปลาข้าวสาร สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล รังสีได้แดง การพาความร้อน

---

\*Corresponding author. E-mail: ajutarut@hotmail.com

Healthy food becomes popular and trends to dramatically increase in commercial scale because of local demand and export. The objectives of this research are these to investigate drying technique for producing oils crispy tiny anchovy replacing of commonly oil frying and to evaluate the empirical drying model for prediction evolution of moisture transfer of tiny anchovy with both hot air and infrared heat sources including to determine an effective diffusion coefficient and activation energy. In this present work, the study effect of drying temperatures ranging of 50-70°C and infrared power of 500-1,000 W on moisture reduction of tiny anchovy was carried on. The flow rate of hot air was fixed at 1.0±0.2 m/s. The hybrid tray dryer was used for this experiment under the condition of initial moisture content of tiny anchovy ranging of 150-155% dry-basis and the desired final moisture content was of 15.0±2.0% dry-basis. The experiments showed that drying rate was proportional to drying temperature and infrared power and the experimental data was simulated in various empirical drying models by non-linear regression analysis. Determination of the best fitting model was selected by getting the highest value of coefficient of determination ( $R^2$ ) and the lowest value of root mean square error (RMSE). The results showed that simulated data using the Page's model was the best fitting to both experimental data of tiny anchovy drying with HA and IR sources. In addition, For evaluation of effective diffusion coefficient ( $D_{eff}$ ) by following the Fick's law of diffusion, the result showed that  $D_{eff}$  of tiny anchovy relatively depended on the drying temperature and infrared power and was in order of  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h corresponded to the other food matter. Finally the activation energy values of moisture transfer of tiny anchovy for each drying technique were also reported in this work. The tiny anchovy dried with IR source was relatively shorter in drying time than those of hot air source.

**Keywords :** health food, Tiny anchovy, Effective diffusion coefficient, Infrared radiation, heat convection

## บทนำ

ปลาข้าวสารเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทะเลที่ได้รับความนิยมมากทั้งบริโภคในประเทศและเป็นสินค้าส่งออกเนื่องจากปลาข้าวสารมีโปรตีนสูง สามารถทานได้ทั้งตัว อย่างไรก็ตามเนื่องจากปลาข้าวสารเป็นปลาที่มีบางช่วงฤดูการของปี และมีเฉพาะในบางพื้นที่ของจังหวัดที่ติดชายฝั่งทะเลของประเทศไทย ดังนั้นปลาข้าวสารจึงมักแปรรูปในรูปอาหารทะเลแห้ง และเป็นสินค้าที่มีความต้องการสูงของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ กรรมวิธีการผลิตต่างๆ ไปในปัจจุบันจะใช้การทำแห้งโดยการตากแดด และการทอดด้วยน้ำมันพืช ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน กล่าวคือ การอบแห้งปลาข้าวสารไม่สามารถอบแห้งได้เป็นชั้นหนาๆ เนื่องจากความชื้นสูง เพื่อย่อยง่ายหากทำการกลับด้านไปมาระหว่างการอบแห้งและสิ้นเปลืองแรงงาน ไม่สะอาดและปนเปื้อนจากฝุ่นและแมลงรบกวนได้หากตากแห้งกลางแจ้งในที่โล่ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำลง สำหรับกรณีการนำปลาข้าวสารดิบมาทอดแม้ว่าจะดูสีสวยงามกว่าการตากแห้งแบบทั่วไปด้วยแสงอาทิตย์และใช้ระยะเวลาในกระบวนการสั้นกว่าการอบแห้ง แต่ก็มักจะเกิดปัญหาการอมน้ำมันในตัวปลา ส่งผลให้เกิดการเหม็นหืนได้ง่ายกว่าการทำแห้งแบบแรก และไม่สามารถทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อขจัดน้ำมันส่วนเกินออกไปได้เหมือนกับอาหารทอดบางประเภทเนื่องจากความกรอบและขนาดของตัวปลาเล็กมาก ง่ายต่อการหักและฉีกขาดปนเป็นผง นอกจากนี้ประการสำคัญคือ อาหารทะเลทอดน้ำมันไม่เป็นที่นิยมในตลาดอาหารสุขภาพ ส่งผลต่อราคาจำหน่ายและการเก็บรักษาเพื่อคงคุณภาพของปลาแห้ง โดยปกติการทำแห้งหรือการทอดนั้น ค่าความชื้นสุดท้ายที่เหลืออยู่ในปลาหรืออาหารทะเลแห้งชนิดใดๆ ก็ตาม เป็นปัจจัยต่อคุณภาพของอาหารแห้งทั้งสิ้น ซึ่งโดยปกติค่าความชื้นของวัสดุเมล็ดพืชทั่วไปที่จะเก็บรักษาไว้ได้ยาวนานควรมีความชื้นอยู่ในช่วง 14-16% มาตรฐานแห้ง (สมชาติ, 2530) และในวัสดุอาหารทั่วไปก็จะมี ความชื้นอยู่ในช่วงเดียวกันนี้ดังมีรายงานวิจัยที่ผ่านมา (Tirawanichakul and Tirawanichakul, 1994; Soponronnarit *et al.*, 2006; Tirawanichakul *et al.*, 2008) ขั้นตอนการลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาจึงมีความสำคัญ การทำแห้งโดยส่วนใหญ่จะอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงด้วยการตากแดดในที่โล่งโดยอาศัยการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Heat

radiation) (Nathakaranakule *et al.*, 2010; Abe *et al.*, 1997) โดยให้เหลือความชื้นประมาณ 20-25% มาตรฐานแห้ง ซึ่งในกรณีที่ไม่มีการตากในที่โล่ง วัสดุแห้งได้ภายในระยะเวลาประมาณ 2 ถึง 3 วัน หากมีฝนตกหรือในช่วงฤดูฝนที่ยาวนานหลายๆ เดือนติดต่อกันในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นเป็นระยะเวลาที่ปริมาณแสงอาทิตย์ในแต่ละวันมีช่วงสั้น ทำให้ไม่สามารถลดความชื้นโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง อีกทั้งสภาวะอากาศแวดล้อมในฤดูการดังกล่าวมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศค่อนข้างสูงทำให้ความชื้นไม่สามารถระเหยออกให้กับอากาศแวดล้อมได้ง่าย ดังนั้นชาวประมงในชุมชนจะอาศัยการทำแห้งด้วยการใช้อากาศร้อนจากการเผาไม้ฟืน ซึ่งลมร้อนที่ได้มีอุณหภูมิต่ำและไม่คงที่ จึงทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงมากและต้องใช้เวลานาน จึงเป็นการสูญเสียพลังงานอย่างมาก พบว่าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแห้ง ขั้นตอนการลดความชื้นจะมีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ ขั้นตอนดังกล่าวเกิดปัญหาขึ้นมา 2 ประการหลัก คือ (1) การปนเปื้อนจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรกเนื่องจากกรรมวิธีและสถานที่สำหรับใช้ในการตากแห้ง รวมทั้งเกิดการรบกวนจากแมลงวัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสะอาดไม่เพียงพอ (2) ระยะเวลาในการตากแห้ง อาจต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น เนื่องจากปริมาณแสงแดดในแต่ละวันมีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกตลอดทั้งปี ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีความชื้นอยู่สูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเน่าเสียและเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี เอ็นไซม์ และเชื้อจุลินทรีย์ เกิดกลิ่นเหม็นหืน หรือกลิ่นฉุนและมีสีออกน้ำตาลดำ ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานและไม่มีความปลอดภัย การเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และการส่งออกสามารถทำได้โดยการเพิ่มคุณภาพปลาแห้ง โดยการปรับปรุงกระบวนการผลิต ตั้งแต่ขั้นตอนเริ่มแรกของกระบวนการผลิต รวมทั้งกระบวนการลดความชื้นด้วยวิธีการอบแห้ง

ดังนั้นการพัฒนากระบวนการผลิตอาหารทะเลตากแห้งจึงเป็นประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อวิเคราะห์แก้ปัญหาให้ชุมชนทำให้ชุมชนสามารถพึ่งพาตนเอง และผลิตอาหารทะเลตากแห้งที่มีคุณภาพสูง สามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้ งานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองผลิตปลาข้าวสารอบแห้ง โดยเลือกใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า และรังสีอินฟราเรด รวมถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง ตลอดจนการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### วัสดุ:

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ ปลาข้าวสาร (ภาพที่ 1) เตรียมตัวอย่างโดยการนำปลาไปต้มในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น

3% โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 5-10 นาที อุณหภูมิ 100°C หาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC., 1995) โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง



ภาพที่ 1 ปลาข้าวสารสำหรับการทดลอง

### วิธีการวิจัย

#### การทดลองอบแห้งปลาข้าวสาร

นำปลาข้าวสารที่ผ่านการต้มแล้วใส่ถาดอบแห้งขนาด 41.5×47.5 cm<sup>2</sup> เกลี่ยกระจายให้ทั่วถาด จากนั้นนำถาดเข้าเครื่องอบแห้งแบบถาด รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งพลังงาน 2 แหล่ง คือ ลมร้อนจากขดลวดความร้อน และรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน หรือใช้แบบพลังงานความร้อนร่วม ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด ประกอบด้วยห้องอบแห้ง ขนาด 61×48×53 cm<sup>3</sup> บุฉนวนใยแก้ว หนา 5 cm เทอร์โมสแตทเป็นเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิสัญญาณจะต่อกับเครื่องวัดสัญญาณเวลาที่ความละเอียด ±1°C ภายในห้องอบแห้งมีหลอดรังสีอินฟราเรด จำนวน 3 หลอดๆ ละ 500 W ระยะห่างระหว่างหลอดกับวัสดุ ประมาณ 15 cm ขดลวดความร้อนไฟฟ้า ขนาด 1,000×2 W และพัดลมใบพัดเหวี่ยงโค้งหน้าแรงอัดสูงขนาด 2 hp

ทดลองอบแห้งปลาข้าวสารที่ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 150-155 มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของปลาข้าวสารอยู่ในช่วง 15.0±2.0 %มาตรฐานแห้ง โดยเงื่อนไขในการอบแห้งแบ่งการทดลองเป็น 2 สภาวะ คือ สภาวะที่ 1 อบแห้งปลาข้าวสารโดยใช้ลมร้อนจากขดลวดความร้อน ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C ความเร็วลมร้อน 1.0±0.2 m/s และสภาวะที่ 2 อบแห้งปลาข้าวสารโดยใช้รังสีอินฟราเรด ในช่วงอุณหภูมิตั้ง 50-70°C กำลังรังสีอินฟราเรด 500 และ 1,000 W

ในระหว่างทำการทดลองบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่าง อุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง และ อุณหภูมิ

ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้งด้วย ทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นบันทึกค่าทุก 10 นาที โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด ±0.01 กรัม และใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ SUPCON ความละเอียด ±0.01°C ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

#### การวิเคราะห์ผล

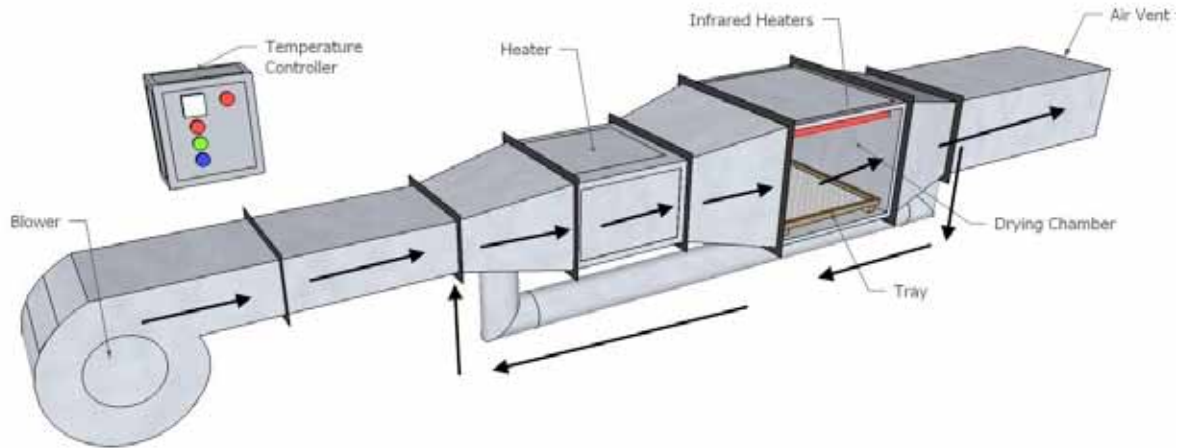
ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาต่างๆ โดยคำนวณจาก

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

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

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

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ จึงสามารถเขียนสมการที่ (1) ใหม่เป็นสมการที่ (2) เนื่องจากค่าความชื้นสมดุลของปลาข้าวสาร ยังไม่มีรายงานปรากฏในงานวิจัยใด และโดยปกติค่าความชื้นสมดุลจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น การหาอัตราส่วน



ภาพที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบถาด โดยใช้ลมร้อนจากขดลวดความร้อนและรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงาน

ความชื้นตามสมการที่ (2) นี้จึงมีการนำมาใช้ในหลายๆ งานวิจัยที่ผ่านมา (Shi *et al.*, 2008; Khir *et al.*, 2011; Nuthong *et al.*, 2011; Ponkham *et al.*, 2012)

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

ในงานวิจัยนี้ใช้สมการการแพร่ของ Fick ในการอธิบายการแพร่ความชื้นภายในปลาข้าวสารระหว่างการอบแห้ง โดยสมมติการแพร่ของน้ำออกจากตัวปลาข้าวสารเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของความชื้น และสมมติให้ตัวปลาข้าวสารมีลักษณะเป็นแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (infinite slab), การถ่ายเทความชื้นและการหดตัวเกิดขึ้นในทิศทางความหนาเพียงทิศทางเดียว และไม่คิดความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ (Crank, 1975) ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการถ่ายเทมวลได้ดังสมการที่ (3) และเนื่องจากพจน์ท้ายๆ ของสมการที่ (3) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงประมาณค่าโดยพิจารณาจากพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ตามสมการที่ (4) (Doymaz, 2004; Khir *et al.*, 2011;)

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

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

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของปลาข้าวสารหาได้ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้ง เป็นไปตามสมการของ Arrhenius (Panchariya *et al.*, 2002) ดังสมการที่ (5)

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

เมื่อ  $D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ( $m^2/h$ ),  $L$  คือ ความหนาของวัสดุ ( $m$ ) และ  $t$  คือ เวลา ( $h$ ),  $A$  คือ ค่าคงที่ของสมการ  $T_{abs}$  คือ อุณหภูมิ ( $K$ ),  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการอบแห้ง ( $kJ/mol$ ) และ  $R$  คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซเท่ากับ  $8.314 kJ/mol \cdot K$

**การวิเคราะห์ผลการทดลองการอบแห้ง**

สมการอบแห้งทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล ใช้สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งโดยนำผลการทดลองอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่างๆ เปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 5 สมการ โดยมีรูปแบบสมการดังตารางที่ 1 จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อเลือกสมการอบแห้งชิ้นบางที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ที่สูงที่สุด และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (6)-(7) ตามลำดับ

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

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

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด,  $MR_{exp,i}$ ,  $MR_{pred,i}$  และ  $\overline{MR_{pred}}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง จากการทำนาย และ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย ตามลำดับ

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการออบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล ที่ใช้ในการทดลอง (Tirawanichakul *et al.*, 2008; Tirawanichakul *et al.*, 2007; Namsanguan *et al.*, 2004)

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	$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-k_1t)$	(12)

เมื่อ MR คือค่าอัตราส่วนความชื้น หากสมการเป็นเทอมไม่มีหน่วย t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาท) และ k, n, a และ b คือ ค่าคงที่ใดๆ ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis)

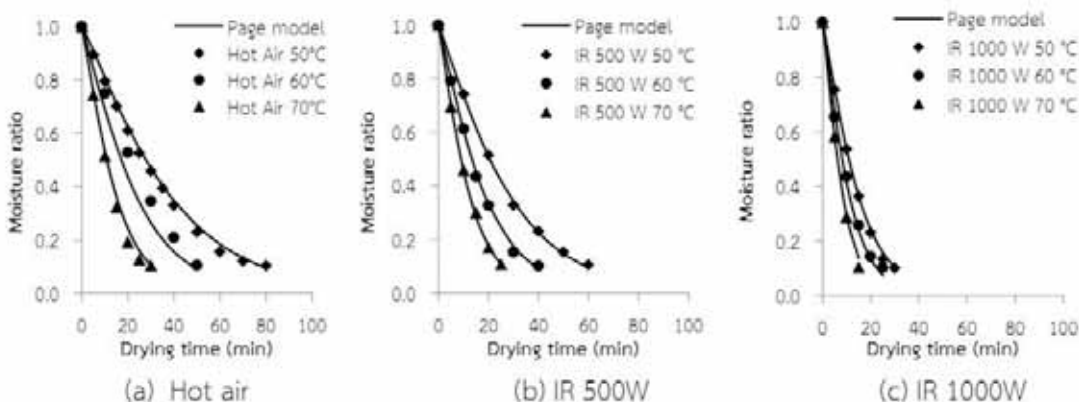
### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสาร

อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3-4 ซึ่งให้เห็นว่า การอบแห้งปลาข้าวสารเป็นการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นในปลาข้าวสารเกิดการถ่ายเทอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการทดลองขณะที่ความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาข้าวสารไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้นความชื้นบริเวณผิวและภายในตัวปลาข้าวสารจะมีค่าต่ำลง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากตัวปลาข้าวสารไปยังผิวหน้าจะลดลงอย่างช้าๆ สอดคล้องกับ

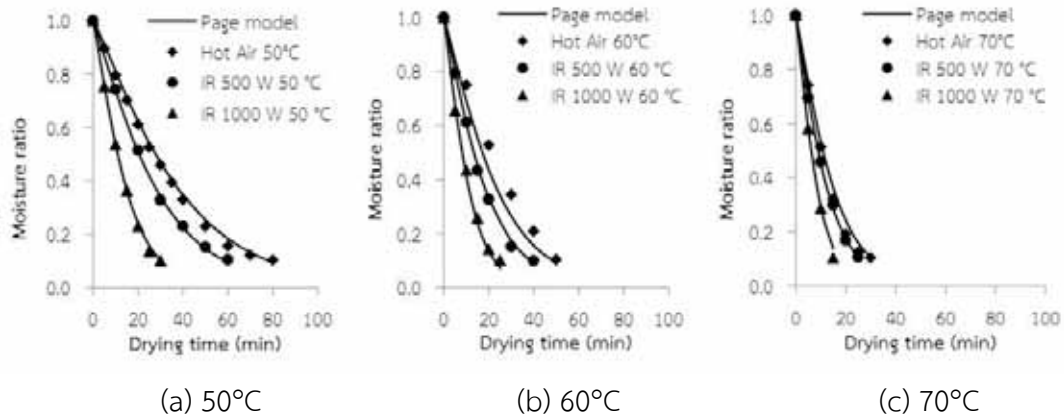
งานวิจัยที่ผ่านมา (Shen *et al.*, 2011; Baysal *et al.*, 2003; Wang, 2002) ซึ่งอัตราการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาอบแห้งจะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C ทั้งกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด (500 และ 1,000 W) ทุกสภาวะการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง และการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำในทุกแหล่งพลังงานความร้อน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งโดยใช้ลมร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน (ภาพที่ 4) พบว่าการอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการใช้ลมร้อน



ภาพที่ 3 อัตราส่วนความชื้นของปลาข้าวสารที่เวลาอบแห้งต่างๆ ของการอบแห้งด้วยลมร้อน (a) และรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 500 W (b) และ 1,000 W (c) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Page ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C





ภาพที่ 4 อัตราส่วนความชื้นของปลาข้าวสารที่เวลาอบแห้งต่างๆ ของการอบแห้งด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด ที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 50°C (a) 60°C (b) และ 70°C (c) เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Page

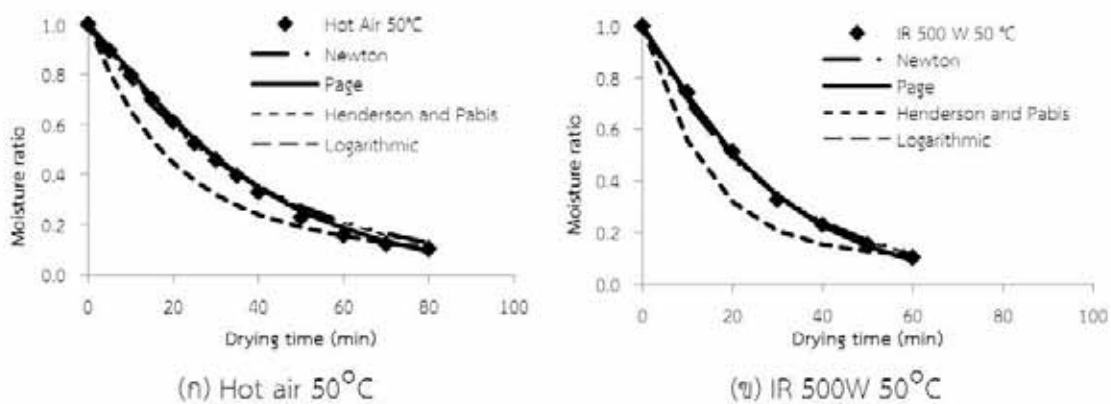
#### สมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล

นำข้อมูลการทดลองอบแห้งที่สภาวะต่างๆ มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของปลาข้าวสาร โดยเลือกใช้สมการเอมพิริคัลที่นิยมใช้ทั่วไปในงานทางด้าน การอบแห้ง 5 สมการ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสถิติต่างๆ ได้ตามรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล แสดงค่าคงตัวของสมการอบแห้ง ดังตารางที่ 2 โดยค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล คือ ค่า k แสดงในรูปแบบสมการที่แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอบแห้งตามรูปแบบสมการอาร์เรเนียส

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  และค่า RMSE เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับ

อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสาร พบว่าแบบจำลองของ Page จะมีค่า  $R^2$  มากที่สุดและมีค่า RMSE น้อยที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดจึงเหมาะสำหรับการทำนายสมการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดมากที่สุด

เมื่อเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นของปลาข้าวสารอบแห้งจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 รูปแบบ แสดงดังภาพที่ 5 และใช้แบบจำลองของ Page เปรียบเทียบกับผลการทดลองทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 3-4 ที่ยืนยันว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด



ภาพที่ 5 ผลการทดลองและผลจากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ของอัตราส่วนความชื้นของปลาข้าวสารที่เวลาอบแห้งต่างๆ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C โดยใช้ลมร้อนและรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน

ชื่อแบบจำลอง	ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการอบแห้งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	R <sup>2</sup>	RMSE
<b>Hot Air</b>			
Newton	$k=438640.506\exp(-5378.196/T)$	0.9808	0.0418
Page	$k=2223795.116\exp(-6087.289/T)$ , $n=1.160$	<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	$k=259224.297\exp(-5254.895/T)$ , $n=1.137$	<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	$k=-0.611\exp(-0.080/T)$ , $k_1=0.074$ , $a=0.056$ , $b=0.947$ , $n=0.00004$	0.9977	0.0941
<b>IR 1000W</b>			
Newton	$k=1369.672\exp(-3201.535/T)$	0.9923	0.0281
Page	$k=4350.792\exp(-3728.99/T)$ , $n=1.172$	0.9977	0.0155
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

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง

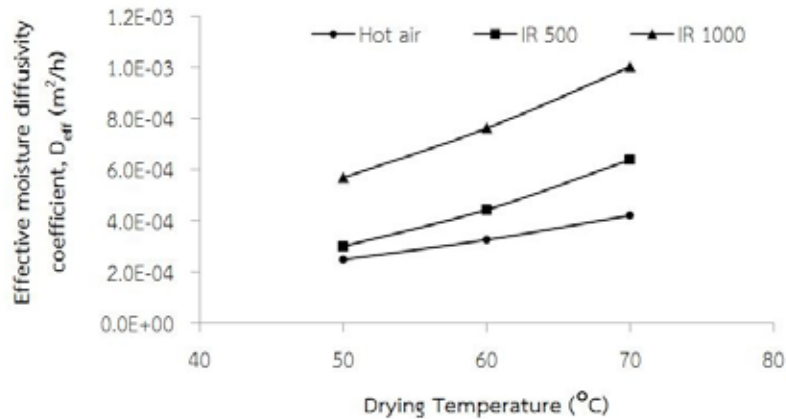
แหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง	สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล	R <sup>2</sup>
Hot air	$D_{\text{eff}}=2.177\exp(-24401.21/RT)$	0.8450
IR 500 W	$D_{\text{eff}}=129.233\exp(-34857.978/RT)$	0.9190
IR 1,000 W	$D_{\text{eff}}=9.578\exp(-26147.173/RT)$	0.9023

### การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

ตารางที่ 3 และภาพที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสัมพันธ์กับอุณหภูมิอบแห้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างกำลังรังสีอินฟราเรด

พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกรณีอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กำลัง 1,000 W มีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด กำลัง 500 W โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง  $2.47 \times 10^{-4}$  -  $4.20 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยลมร้อน)  $3.0 \times 10^{-4}$  -  $6.38 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 500 W) และ  $5.68 \times 10^{-4}$  -  $1.00 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/h (อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W) ตามลำดับ





ภาพที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งปลาข้าวสารด้วยแหล่งพลังงานต่างๆ อุณหภูมิอบแห้ง 50-70°C

### สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองอบแห้งปลาข้าวสารด้วยลมร้อน และ รังสีอินฟราเรด จะพบการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิสูงอัตราการอบแห้งจะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงาน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้ง สูงที่สุดในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถ ใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งปลาข้าวสารได้ดีที่สุดในทุกแหล่ง พลังงาน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่า เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งและกำลังของรังสีอินฟราเรด อย่างไร ก็ดี แม้ว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง และกำลังรังสีอินฟราเรดสูง คือ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70°C กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000 W จะใช้ เวลาในการอบแห้งสั้น แต่อาจไม่ใช่สภาวะที่ดีที่สุด เพราะยังต้อง พิจารณาปัจจัยของคุณภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานประกอบ เข้าไปด้วย ซึ่งเป็นส่วนที่จะต้องศึกษาต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

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

### เอกสารอ้างอิง

- Abe, T., & Afzal, T. M. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(4), 289-297.
- Achaviriya, S., & Soponronnarit, S. (1990). Studies of parameter for the analysis of papaya glaze drying. *Agricultural Science Journal*, 24, 196-207.
- AOAC *The Association of Official Analytical Chemists*. (1995). Inc. Arlington, Virginia, USA.
- Baysal, T., Icier, F., Ersus, S., & Yildiz, H. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*, 21(8), 68-73.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, U.K.
- Doymaz, I. (2004). Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Journal of Food Engineering*, 64, 465-470.
- Khair, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B. R., & Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132.
- Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K., & Achariyaviriya, S. (2011). Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 233-239.

- Namsanguan, Y., Tia, W., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2004). Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes. *Drying Technol.*, *22*, 759-778.
- Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., & Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, *100*(4), 662-668.
- Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002). Desorption isotherm modelling of black tea using artificial neural networks. *Drying Technol.*, *20*(2), 351-362.
- Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., & Siriamornpun, S. (2012). Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food and Bioprocess Technology*, *90*(2), 155-164.
- Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H., & 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*, *34*(3), 1588-1594.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, T. H., Wood, D., Hirschberg, E., & Olson, D. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT - Food Science and Technology*, *41*(10), 1962-1972.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A., & Taechapiroj, C. (2006). Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, *75*, 423-432.
- Tirawanichakul, S., Tirawanichakul, Y., & Sniso, E. (2008). Paddy Dehydration by Adsorption: Thermo-Physical Properties and Diffusion Model of Agriculture Residues. *Biosyst. Eng.*, *99*(2), 249-255.
- Tirawanichakul, S., Tasara, J., & Tirawanichakul, Y. (2007). Thermo-physical properties and effect of electrical field on drying process of paddy. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, *29*, 325-333.
- Tirawanichakul, S., Linpo, P., & Tirawanichakul, Y. (2009). Influence of infrared and heat convection on drying kinetics of shrimp and quality. *Thai Journal of Physics*, *4*, 116-120.
- Tirawanichakul, S., & Tirawanichakul, Y. (1994). Thin layer grain dryer: parameters of thin layer drying for cashew nut. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, *16*, 92-381.
- Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, Y. (2008). Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection. *Walailak Journal of Science and Technology*, *55*, 77-100.
- Wang, J. (2002). A single-layer model for far-infrared radiation drying of onion slices. *Drying Technol.*, Vol. *20*(10), pp. 1941-1953.