



## จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรด และเทคนิคสุญญากาศ

### Drying Kinetics of Chicken Meat Slice by Infrared Radiative Heat Source and Vacuum Technique

สิริกานต์ ยอดแก้ว<sup>1</sup>, ยุทธนา ฐิระวณิชกุล<sup>2</sup>, สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล<sup>1</sup>

Sirikan Yodkaew<sup>1</sup>, Yutthana Tirawanichakul<sup>2</sup>, Supawan Tirawanichakul<sup>1</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรด และเทคนิคการอบแห้งสุญญากาศ และคุณภาพทางกายภาพด้านการหดตัว ความแข็งและค่าความสว่างของเนื้อไก่ชิ้นบางอบแห้ง ในช่วงอุณหภูมิอบแห้งระหว่าง 80 ถึง 140 °C ที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000, 1,350 และ 1,500 W และอบแห้งที่ค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 10, 15 และ 20 kPa จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และส่งผลให้ค่าความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะลดลง การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งพบว่า ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page, Two term exponential และ Verma, Bucklin, Endan, & Wratten (1985) มีความเหมาะสมที่สุดกับผลการทดลองอบแห้งที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000, 1,350 และ 1,500 W ตามลำดับ และสำหรับการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศที่ความดันสัมบูรณ์ 10, 15 และ 20 kPa พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Approximation of diffusion สอดคล้องกับผลการทดลองจริงที่สุดของทั้งสามค่าความดันสัมบูรณ์ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง พบว่า ร้อยละการหดตัวในทุกเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามในสภาวะที่อบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) สูงขึ้นและเมื่อกำลังรังสีอินฟราเรดสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสีแดง ( $a^*$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น และการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยเทคนิคสุญญากาศจะมีค่าความแข็งของเนื้อไก่ชิ้นบางสูงกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

**คำสำคัญ:** เนื้อไก่ชิ้นบาง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง การแผ่รังสีใต้แดง คุณภาพทางกายภาพ

#### Abstract

The objectives of this research were to study and simulate drying kinetics model for chicken meat slice by infrared radiation (IR) and vacuum technique and to evaluate physical properties of dried chicken slice in terms of brightness and hardness value. The experiment set-up was conducted with temperature ranging between 80 and 140 °C and infrared radiation power of 1,000, 1,350 and 1,500 W. For vacuum drying experiments, absolute pressures in drying chamber were fixed at 10, 15 and 20 kPa for drying chicken meat slice. The experimental results showed that drying rate relatively increased with increasing of drying temperature. Thus, the higher drying temperature evidence is, the lower specific energy consumption is

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>1</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

<sup>2</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

<sup>2</sup> Department Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University



achieved. The drying kinetics results also were concluded that the simulated data of moisture ratio for chicken meat slice using Page model, Two terms exponential model and Verma, Bucklin, Endan, & Wratten (1985) model had the best fitting to the experimental data for IR drying at 1,000, 1,350 and 1,500 W, respectively. And the simulated data of moisture ratio for chicken meat slice using Approximation of diffusion model for all vacuum drying conditions of 10-20 kPa had a good relation to the experiment data. Moreover, for physical quality analysis of dried chicken meat slice were evaluated and showed that the percentage of chicken meat shrinkage in all drying conditions was insignificantly different ( $p < 0.05$ ). However, the brightness value ( $L^*$ ) of dried chicken slice increased with increase of drying temperature whilst the hardness value of dried chicken meat slice with vacuum drying were higher than IR drying.

**Keywords:** Chicken meat slice, Drying kinetics, Infrared radiation, Physical qualities

## บทนำ

เนื้อไก่กึ่งจัดเป็นแหล่งอาหารสำคัญ เพราะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง และเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดี ราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ทั้งยังไม่มีส่วนจำกัดทางศาสนา ในเนื้อไก่ 100 กรัม ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 74 โปรตีนร้อยละ 19 ไขมันร้อยละ 5 เกลือร้อยละ 0.8 โปรตีนของเนื้อไก่จะมีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบถ้วน ขณะที่ไขมันของเนื้อไก่ส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (สุเมธ ตันตะเธียร, 2545) จึงกล่าวได้ว่าเนื้อไก่เป็นแหล่งคุณค่าอาหารสำหรับโภชนาการ และสามารถแปรรูปเป็นอาหารได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นอาหารสด อาหารแช่แข็ง อาหารแปรรูป และอาหารแห้ง และในปัจจุบันการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์มีกระจายตัวมากขึ้น นอกจากจะเป็นการเพิ่มทางเลือกในการบริโภคและยืดอายุในการเก็บรักษาจนถึงมือผู้บริโภค ยังสามารถเพิ่มมูลค่าทางการตลาดของผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามการเก็บผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในรูปของเนื้อสด ผลิตภัณฑ์เนื้อแช่แข็ง มีความจำเป็นต้องดำเนินการให้ดีและมีค่าใช้จ่ายในการเก็บในรูปแช่แข็งอีกประการหนึ่ง ดังที่ทราบกันดีว่าปัจจัยของความชื้นในเนื้อสัตว์จะส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อสัตว์ต่างๆ ในกระบวนการเก็บรักษาดังนั้นการแปรรูปอาหารด้วยกระบวนการอบแห้ง จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจเพราะนอกจากจะลดปริมาณความชื้นในเนื้อสัตว์แล้ว ยังลดพื้นที่ในการเก็บรักษาและจัดการเก็บรักษาได้ง่าย โดยทั่วไปในการอบแห้งสามารถเลือกใช้แหล่งพลังงานได้หลายแหล่ง เช่น การตากแดด การทำแห้งในห้องอบแห้งหรือโรงเรือนอบแห้ง แต่ก็มีปัญหาในเรื่องปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน และในแต่ละฤดูกาล การใช้ลมร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมก็เป็นที่ยอมรับ เช่น การใช้ก๊าซแอลพีจี เป็นต้น แต่ก็มีต้นทุนและไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะมีการเผาไหม้ให้ก๊าซเรือนกระจก และใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นยาวนานกว่าเทคนิคอื่น เช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด คลื่นรังสีไมโครเวฟ และเทคนิคการลดความชื้นด้วยสุญญากาศก็เป็นที่น่าสนใจ ข้อดีของกระบวนการอบแห้งโดยใช้แหล่งพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ รังสีอินฟราเรดและคลื่นไมโครเวฟก็คือ ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เพราะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแผ่รังสีทะลุผ่านแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุ เมล็ดพืช ธัญพืชและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังโมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ต่างๆ และเกิดการสลับไปมาของขั้วไฟฟ้าในโมเลกุลน้ำ และเกิดความร้อนจากการสลับไปมาของโมเลกุลน้ำ ทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อผลิตภัณฑ์สูงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ผิว จึงเกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนและถ่ายโอนมวลหรือปริมาณน้ำ หรือในความหมายเชิงกายภาพก็คือความชื้นทั้งภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์มีการถ่ายโอนได้อย่างรวดเร็วกว่าการพาความร้อนที่อาศัยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และสำหรับเทคนิคการอบแห้งแบบสุญญากาศ ซึ่งมีการนำมาใช้มากขึ้นในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมไปถึงการใช้ร่วมกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยนั้น จัดได้เป็นการอบแห้งที่อาศัยหลักการลดความดันอากาศ เพื่อลดจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  น้ำจึง



ระเหยได้เร็วขึ้นและจะใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ และอาหารด้วยเทคนิคนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์และอาหารที่ไวต่อความร้อนซึ่งรวมไปถึงคุณค่าทางโภชนาการและเภสัชวิทยา เพื่อให้ผลิตภัณฑ์และอาหารเหล่านั้นมีสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงหรือเท่ากับผลิตภัณฑ์หรืออาหารสดก่อนการทำแห้ง เช่น การลดความชื้นในใบชาสมุนไพร อาหารทะเลแช่แข็ง เมล็ดพันธุ์พืชต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เงื่อนไขในกระบวนการอบแห้ง นอกจากที่จะต้องพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแล้วนั้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้งก็ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้แหล่งพลังงานสำหรับการลดความชื้นในผลิตภัณฑ์และอาหาร งานวิจัยที่มีการใช้รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนมีหลาย ๆ งานที่น่าสนใจ อาทิเช่น การอบแห้งหมึกกล้วยซึ่งพบว่า หมึกกล้วยที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในหมึกกล้วยแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน (Kang, Hong, Jeon & Han, 2011) และในเวลาต่อมาก็มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการอบแห้งโสม Taeguuk ด้วยรังสีอินฟราเรด พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะมีอัตราการอบแห้งตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนที่อาศัยการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว (Ning & Han, 2013) สำหรับงานวิจัยเรื่องการอบแห้งซึ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดในประเทศไทยในเวลาใกล้เคียงกัน พบว่า ปัจจัยของค่าความดันสุญญากาศมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งซึ่งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อลดความดันสัมบูรณ์จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น (อำไพศักดิ์ ที่บุญมา และ ศักดิ์ชัย จงจำ, 2553) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและเทคนิคสุญญากาศสำหรับวัสดุอาหาร เมล็ดพืช และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ยังมีความน่าสนใจและน่าศึกษา โดยเฉพาะกระบวนการอบแห้งที่ต้องคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังทำแห้งแล้วและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของแหล่งพลังงานและสภาวะเงื่อนไขในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ระบบสุญญากาศและลมร้อนต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของเนื้อไก่ชิ้นบาง โดยหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายอัตราการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบาง ตลอดจนวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของเนื้อไก่ชิ้นบางอบแห้ง ได้แก่ สี การหดตัวและความแข็ง และท้ายสุดของงานวิจัยนี้จะพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขและเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้งดังกล่าวข้างต้น

## ระเบียบวิธีวิจัย

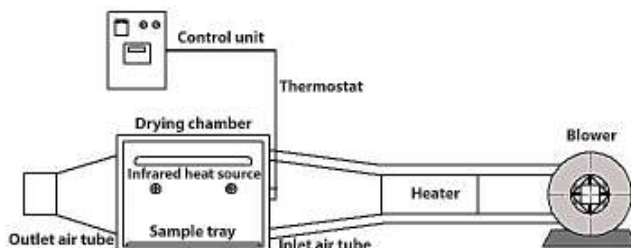
### วัสดุและอุปกรณ์

เนื้อไก่ที่ใช้ในการทดลองเป็นเนื้อไก่ส่วนสันใน ซึ่งจากห้างสรรพสินค้า อำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา นำมาหั่นให้มีขนาดประมาณ  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  หนาขึ้นละประมาณ 0.3 cm (Nathakaranakule, Kraiwanchkul & Soporonarit, 2007) และสุ่มตัวอย่างเนื้อสันในไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 1995)

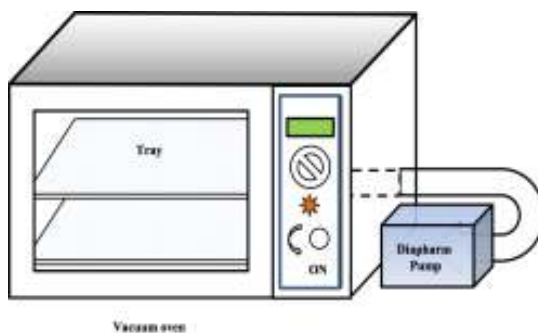
เครื่องอบแห้งแบบถาดพลังงานความร้อนรวม (รังสีอินฟราเรด และขดลวดความร้อน ไฟฟ้า) ขนาดห้องอบแห้ง  $61 \times 48 \times 53 \text{ cm}^3$  ภายในห้องอบแห้งมีหลอดรังสีอินฟราเรดขนาด 350 W และ 500 W ถาดที่ใช้ในการอบแห้งมีขนาด  $24 \times 24 \text{ cm}^2$  ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิของชิ้นไก่ อุณหภูมิแวดล้อม (กระเปาะแห้ง) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งต่อไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเวลา (Data logger) รายละเอียดอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศ (Vacuum Drying Oven) ยี่ห้อ LabTech รุ่น LVO-2030 ความจุ 27 L แสดงดังภาพที่ 2



เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด  $\pm 0.1$  g และวัดค่าพลังงานไฟฟ้าจาก Watt-hour meter (MITSUBISHI Co. Ltd.)



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบถาดพลังงานความร้อนรวม (รังสีอินฟราเรด และขดลวดความร้อนไฟฟ้า)



ภาพที่ 2 เครื่องอบแห้งแบบถาดด้วยเทคนิคสุญญากาศ

## วิธีการวิจัยและอภิปรายผล

### การทดลองอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบาง

- นำเนื้อไก่ชิ้นบางวางบนถาดอบแห้ง ทดลองอบแห้งใช้อุณหภูมิอบแห้ง 80, 100, 120 และ 140 °C กำลังรังสีอินฟราเรด 1,000, 1,350 และ 1,500 W สำหรับการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศทำการทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C ความดันสัมบูรณ์ 10, 15 และ 20 kPa เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C
- บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ น้ำหนักกับเวลา อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กำหนดความชื้นสุดท้ายเนื้อไก่ชิ้นบางอยู่ในช่วง 10-13 % dry-basis
- บันทึกค่าพลังงานด้วย Watt-hour meter

### การคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางในรูปอัตราส่วนความชื้น โดยคำนวณจากสมการ (1)

$$MR = \left( \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \right) \quad (1)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น,  $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (% dry-basis),  $M_i$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ (% dry-basis), และ  $M_{eq}$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis) โดยจะตั้งสมมติฐานว่าค่า  $M_{eq}$  มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ จึงไม่คิดค่าความชื้นสัมบูรณ์ (จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริวณิชย์กุล และ ยุทธนา ภูริวณิชย์กุล, 2557; อ่ำไพค์ศักดิ์ ทัพญมา และ ศักดิ์ชัย จงจำ, 2553) จึงสามารถเขียนสมการ (1) ใหม่เป็นสมการ (2)

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

### การวิเคราะห์สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล 9 แบบจำลอง ดังตารางที่ 1 จากการนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ที่สูงสุด ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) และค่า Chi-square ( $X^2$ ) ที่ต่ำสุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3), (4) และ (5) ตามลำดับ (Akpınar, Bicer & Ildiz, 2006)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{exp},i} - \text{Data}_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{exp},i} - \text{Data})^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{exp},i} - \text{Data}_{\text{pre},i})^2} \quad (4)$$

$$X^2 = \frac{1}{N - n_i} \sum_{i=1}^N (\text{Data}_{\text{exp},i} - \text{Data}_{\text{pre},i})^2 \quad (5)$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด,  $n_i$  คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการ,  $\overline{\text{Data}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลอง,  $\text{Data}$  คือ ข้อมูลอัตราส่วนความชื้น, Subscript  $_{\text{exp},i}, \text{pre},i$  คือ จากผลการทดลองและจากการทำนายที่ค่า  $i$  ใดๆ ตามลำดับ

### การวิเคราะห์อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อระยะเวลาอบแห้ง คำนวณดังสมการ (6) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คำนวณตามสมการ (7) (Tirawanichakul, Na Phatthalung, & Tirawanichakul, 2008) ดังนี้

$$\text{Drying rate} = \frac{(M_i - M_f)W_d}{t} \quad (6)$$

$$\text{Specific Energy Consumption (SEC)} = \frac{3.6E_p}{(M_i - M_f)W_d} \quad (7)$$

โดยที่  $M_i, M_f$  คือ ความชื้นเริ่มต้นและสุดท้ายของวัสดุ (% dry-basis),  $W_d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg),  $t$  คือ เวลาในการอบแห้ง (h), SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg of water evaporated) และ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h)



**ตารางที่ 1** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้น (อนุสุภา นาคี, ยุทธนา ภูริระวีชัยกุล และสุภาวรรณ ภูริระวีชัยกุล, 2555 ; Thao & Noomhorm, 2011)

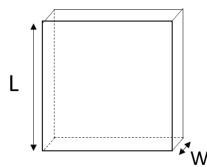
ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
3	Logistic	$MR = a / (1 + \exp(k \cdot t))$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
5	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
6	Two term exponential	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$
7	Approximation of diffusion	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$
8	Verma et al.	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-g \cdot t)$
9	Wang and Singh	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$

หมายเหตุ: MR คือ อัตราส่วนความชื้น, t คือ เวลาในการอบแห้ง, a b c g k n คือค่าคงตัวของสมการ

### การทดสอบคุณภาพทางกายภาพของเนื้อไก่ชิ้นบางอบแห้ง

**การทดสอบคุณภาพทางด้านสี** การวัดสีของเนื้อไก่ชิ้นบางก่อนและหลังการอบแห้ง ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น Color Flex ก่อนการวัดสีแต่ละตัวอย่างจะทำการเทียบกับจานสีขาวมาตรฐาน โดยให้หน่วยมาตรฐานระบบ CIE ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) โดยค่า  $L^*$  แสดงค่าความสว่างและความมืด ค่า  $a^*$  แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า  $b^*$  แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยสุ่มตัวอย่าง 10 ตัวอย่างและรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

**การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว** วัดการหดตัวของเนื้อไก่ชิ้นบางอบแห้งโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดด้านกว้าง (L) และหนา (W) 5 ตำแหน่งต่อชิ้นตัวอย่าง และสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น ตำแหน่งการวัดแสดงดังภาพที่ 3



**ภาพที่ 3** ตำแหน่งการวัดความยาวและความหนาของเนื้อไก่ชิ้นบาง

**การทดสอบคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส** (ความแข็ง) วัดความแข็งของตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส Texture analyzer รุ่น TA.XT.plus ค่าความแข็งพิจารณาจากค่าแรงกดสูงสุด (Maximum force) หัวกดที่ใช้ทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm. ความเร็วในการกด 1 mm/s โดยสุ่มตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง

### ผลการวิจัย

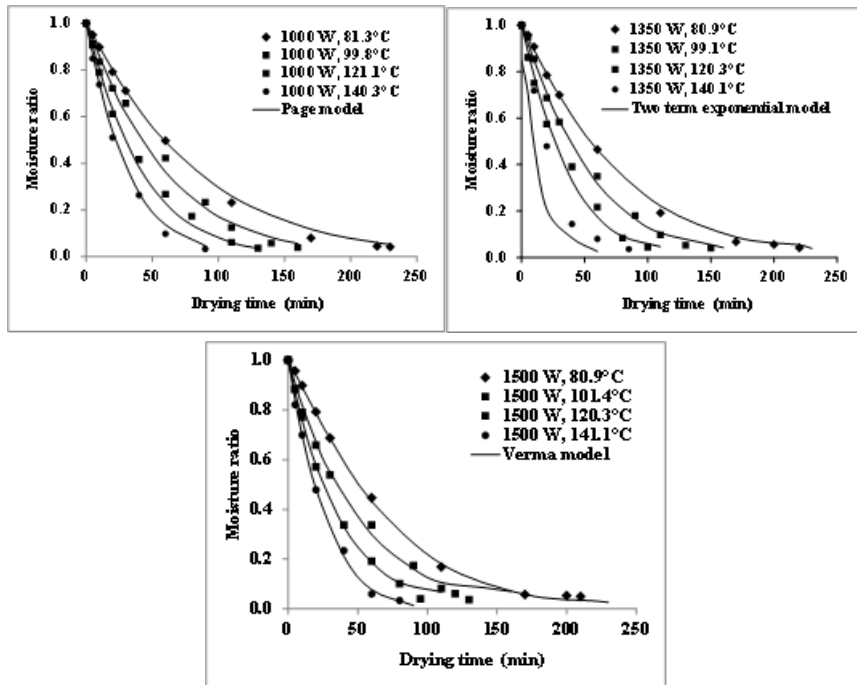
#### จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบาง

ภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 แสดงอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างระยะเวลาที่อบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ พบว่า ในช่วงต้นของการทดลอง การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางนี้เป็นการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เนื่องจากเนื้อไก่ชิ้นบาง

มีปริมาณความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลน้ำจากเนื้อไก่ชิ้นบางไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นง่ายและรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้น ความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบางจะลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากภายในเนื้อไก่ไปยังผิวหน้าลดลงซ้ำๆ ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยด้านการอบแห้งอีกหลายงานวิจัย (Nathakaranakule, Kraiwanichkul, & Soporonnarit, 2007; Tirawanichakul, Na Phatthalung & Tirawanichakul, 2008, สุภวรรธ ภูริระวณิชยกุล, สาสกีนา ลาแมปะ และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล, 2555; อนุสรา นาดิ และคณะ, 2555) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดลงของความชื้นแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลกับเวลาการอบแห้ง

### ผลของกำลังรังสีอินฟราเรด

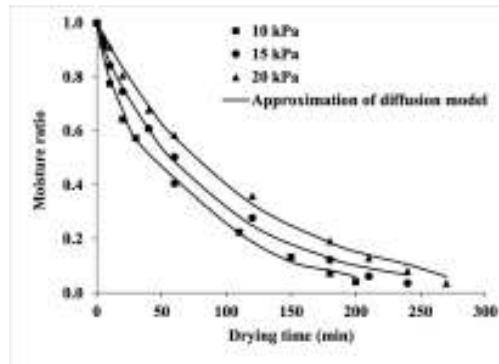
จากภาพที่ 4 จะพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรด จะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากเมื่อกำลังของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบางที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิอบแห้งต่างๆ กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000, 1,350 และ 1,500 W อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 80-140 °C

### ผลของความดันสุญญากาศ

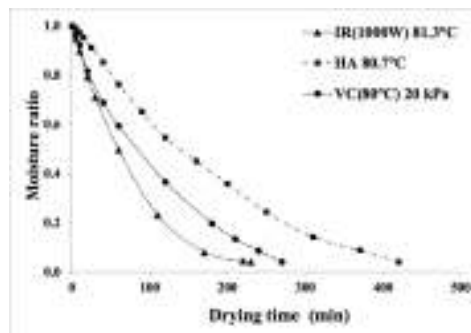
จากภาพที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบางที่ใช้ในการอบแห้งด้วยสุญญากาศโดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่ 80 °C ภายใต้เงื่อนไขภาวะความดันสัมบูรณ์ พบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด ในขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงช้าที่สุด เนื่องจากจุดเดือดของน้ำจะขึ้นกับภาวะความดัน โดยเมื่อความดันลดลง จุดเดือดของน้ำก็จะลดลงด้วย



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบางที่อบแห้งด้วยสุญญากาศ ที่ความดันสัมบูรณ์ 10, 15, 20 kPa ที่อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 80 °C

#### ผลของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

จากภาพที่ 6 เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบางระหว่างการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรด, สุญญากาศและลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งประมาณ 80 °C พบว่า การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยแหล่งพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด จะใช้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยที่สุด ตามด้วย การอบแห้งแบบเทคนิคสุญญากาศ และแบบลมร้อน ตามลำดับ



Note: IR means infrared drying, HA means Hot air drying and VC means vacuum drying

ภาพที่ 6 เปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ชิ้นบาง ระหว่างการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรด, สุญญากาศและลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้งประมาณ 80 °C

#### สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สามารถนำมาหาค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัล แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$ , RMSE และ  $X^2$  จากตารางที่ 2 (ก) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ กำลัง 1,000, 1,350 และ 1,500 W คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page, Two term exponential และ Verma, Bucklin, Endan, & Wratten (1985) ตามลำดับ และจากตารางที่ 2 (ข) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศความดันสัมบูรณ์ 10, 15 และ 20 กิโลปาสกาล คือแบบจำลอง Approximation of diffusion โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  ที่มีค่าสูงสุด ค่า RMSE และ  $X^2$  ที่มีค่าต่ำสุด



**อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางที่สภาวะการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3 ในกรณีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่กำลัง 1,000, 1,350 และ 1,500 W ช่วงอุณหภูมิ 100-140 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งไก่ชิ้นบางมีแนวโน้มลดลง โดยการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลังรังสีอินฟราเรด 1500 W อุณหภูมิอบแห้งเป็น 140 °C มีอัตราการอบแห้งสูงสุดและการอบแห้งด้วยลมร้อนมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศและรังสีอินฟราเรด ตามลำดับกรณีการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำจะมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าที่ความดันสัมบูรณ์สูง และพบว่าที่ กำลังรังสีอินฟราเรด 1500 W อุณหภูมิอบแห้งเป็น 140 °C สามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด

**ตารางที่ 2 (ก)** ค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัลสำหรับทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยรังสีอินฟราเรด กำลังของรังสีอินฟราเรด 1,000, 1,350 และ 1,500 W ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80-140 °C

Vacuum pressure	Model	Constant of model	R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
1000W	Newton	$k=11.017\exp(20089.055/T)$	0.9951	0.0249	6.39E-04
	Page	$k=12.780\exp(21308.537/T)$ , $n=1.060$	0.9960	0.0226	5.41E-04
	Logistic	$k=16.129\exp(20178.635/T)$ , $a=1.950$	0.9952	0.0247	6.46E-04
	Henderson and Pabis	$k=0.0198\exp(10^5/T)$ , $a=0.999$	0.9389	0.0882	8.24E-03
	Logarithmic	$k=-0.001\exp(19548.6825/T)$ , $a=-4460.520$ , $c=4461.384$	0.9115	0.1062	1.23E-02
	Two term exponential	$k=11.570\exp(10^5/T)$ , $a=0.0017$	0.9389	0.0882	8.24E-03
	Approximation of diffusion	$k=1.967 \times 10^{-4}\exp(10^5/T)$ , $a=0.0165$ , $b=104.390$	0.9392	0.0880	8.46E-03
	Verma	$k=164.695\exp(10^5/T)$ , $a=0.001$ , $g=0.020$	0.9389	0.0882	8.49E-03
	Wang and Singh	$a=-0.013$ , $b=4.145 \times 10^{-5}$	0.9076	0.1085	1.25E-02
1350W	Newton	$k=20.819\exp(21675.766/T)$	0.9944	0.0271	7.56E-04
	Page	$k=27.696\exp(23700.989/T)$ , $n=1.094$	0.9964	0.0217	5.51E-04
	Logistic	$k=31.017\exp(21761.213/T)$ , $a=1.973$	0.9955	0.0244	6.30E-04
	Henderson and Pabis	$k=21.058\exp(21622.944/T)$ , $a=1.020$	0.9952	0.0251	6.70E-04
	Logarithmic	$k=-0.001\exp(21200.376/T)$ , $a=-5561.680$ , $c=5562.546$	0.9064	0.1111	1.35E-02
	Two term exponential	$k=26.390\exp(21700.787/T)$ , $a=1.578$	0.9964	0.0217	4.98E-04
	Approximation of diffusion	$k=14.136\exp(21782.274/T)$ , $a=12.583$ , $b=0.965$	0.9962	0.0223	5.42E-04
	Verma	$k=0.024\exp(-14.948/T)$ , $a=-1521.405$ , $g=0.024$	0.9964	0.0219	5.26E-04
	Wang and Singh	$a=-0.015$ , $b=5.003 \times 10^{-5}$	0.8932	0.1187	1.49E-02
1500W	Newton	$k=13.411\exp(20200.058/T)$	0.9962	0.0222	5.08E-04
	Page	$k=15.351\exp(21332.894/T)$ , $n=1.059$	0.9970	0.0196	4.48E-04
	Logistic	$k=18.371\exp(20076.399/T)$ , $a=1.951$	0.9956	0.0239	6.06E-04
	Henderson and Pabis	$k=13.491\exp(20172.573/T)$ , $a=1.011$	0.9964	0.0216	4.95E-04
	Logarithmic	$k=-0.001\exp(20998.888/T)$ , $a=-4758.165$ , $c=4759.028$	0.9196	0.1018	1.13E-02
	Two term exponential	$k=15.782\exp(20149.842/T)$ , $a=1.498$	0.9972	0.0191	3.88E-04
	Approximation of diffusion	$k=9.281\exp(20240.857/T)$ , $a=8.706$ , $b=0.952$	0.9975	0.0181	3.59E-04
	Verma	$k=0.024\exp(-24.441/T)$ , $a=-859.028$ , $g=0.024$	0.9978	0.0169	3.13E-04
	Wang and Singh	$a=-0.015$ , $b=5.335 \times 10^{-5}$	0.9033	0.1116	1.32E-02



ตารางที่ 2 (ข) ค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัลสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยเทคนิคสุญญากาศที่ความดันสัมบูรณ์ 10, 15, 20 กิโลปาสกาล อุณหภูมิอบแห้ง 80 °C

Vacuum pressure	Model	Constant of model	R <sup>2</sup>	RMSE	X <sup>2</sup>
10 kPa	Newton	$k=0.015\exp(37.905/T)$	0.9768	0.0513	6.58E-03
	Page	$k=0.450\exp(7484.0247/T)$ , $n=0.790$	0.9929	0.0283	2.00E-03
	Logistic	$k=0.018\exp(-92.621/T)$ , $a=1.817$	0.9700	0.0583	8.50E-03
	Henderson and Pabis	$k=0.013\exp(61.232/T)$ , $a=0.940$	0.9846	0.0418	4.37E-03
	Logarithmic	$k=-3.831 \times 10^{-6}\exp(13.333/T)$ , $a=-942.119$ , $c=942.918$	0.8793	0.1170	3.42E-02
	Two term exponential	$k=0.080\exp(0.504/T)$ , $a=0.149$	0.9921	0.0300	2.25E-03
	Approximation of diffusion	$k=0.007\exp(-8332.132/T)$ , $a=0.185$ , $b=0.098$	0.9948	0.0242	1.46E-03
	Verma	$k=2.583\exp(101019.910/T)$ , $a=0.068$ , $g=0.018$	0.9834	0.0434	4.72E-03
Wang and Singh	$a=-0.010$ , $b=2.834 \times 10^{-5}$	0.9373	0.0843	1.78E-02	
15 kPa	Newton	$k=0.012\exp(-47.013/T)$	0.9944	0.0261	1.71E-03
	Page	$k=0.082\exp(4745.161/T)$ , $n=0.931$	0.9958	0.0227	1.29E-03
	Logistic	$k=0.016\exp(18.748/T)$ , $a=1.882$	0.9914	0.0324	2.62E-03
	Henderson and Pabis	$k=0.0116\exp(19.147/T)$ , $a=0.973$	0.9960	0.0220	1.21E-03
	Logarithmic	$k=-3.09 \times 10^{-6}\exp(1051.412/T)$ , $a=-1794.946$ , $c=1795.801$	0.9344	0.0894	2.00E-02
	Two term exponential	$k=0.206\exp(2.230/T)$ , $a=0.054$	0.9971	0.0185	8.49E-04
	Approximation of diffusion	$k=0.2026\exp(0.036/T)$ , $a=0.054$ , $b=0.055$	0.9972	0.0184	8.48E-04
	Verma	$k=0.202\exp(1.62 \times 10^{-5}/T)$ , $a=0.054$ , $g=0.011$	0.9972	0.0185	8.48E-04
Wang and Singh	$a=-0.009$ , $b=2.194 \times 10^{-5}$	0.9800	0.0494	6.10E-03	
20 kPa	Newton	$k=0.9976\exp(77.229/T)$	0.9976	0.0165	6.81E-04
	Page	$k=0.010\exp(6.099/T)$ , $n=0.993$	0.9976	0.0165	6.77E-04
	Logistic	$k=0.013\exp(25.584/T)$ , $a=1.928$	0.9945	0.0250	1.56E-03
	Henderson and Pabis	$k=0.009\exp(11.044/T)$ , $a=0.994$	0.9977	0.0162	6.56E-04
	Logarithmic	$k=-3.98 \times 10^{-6}\exp(-27.865/T)$ , $a=-941.454$ , $c=942.358$	0.9583	0.0688	1.18E-02
	Two term exponential	$k=0.023\exp(-11323.113/T)$ , $a=0.008$	0.9977	0.0163	6.66E-04
	Approximation of diffusion	$k=0.707\exp(12227.358/T)$ , $a=-5.364$ , $b=0.974$	0.9977	0.0160	6.44E-04
	Verma	$k=0.544\exp(11947.380/T)$ , $a=0.956$ , $g=0.009$	0.9976	0.0165	6.81E-04
Wang and Singh	$a=-0.008$ , $b=1.593 \times 10^{-5}$	0.9926	0.0290	2.11E-03	

ตารางที่ 3 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Drying Temperature/ Pressure	Drying time (min)	Initial (Final) moisture content (% dry-basis)	Drying rate (kg/h)	Specific energy consumption (MJ/kg of water evaporated)
<b>Infrared Power 1,000 W</b>				
81.3 °C	230	308.96 (12.82)	1.76	0.43
99.8 °C	160	301.43 (11.65)	3.10	0.30
121.1 °C	140	300.89 (11.08)	3.57	0.22
140.3 °C	90	309.54 (10.27)	5.72	0.17

**ตารางที่ 3 (ต่อ) อัตราการอบแห้งเฉลี่ย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางที่สภาวะการทดลองต่างๆ**

Drying Temperature/ Pressure	Drying time (min)	Initial (Final) moisture content (% dry-basis)	Drying rate (kg/h)	Specific energy consumption (MJ/kg of water evaporated)
<b>Infrared Power 1,350 W</b>				
80.9 °C	220	296.78 (12.43)	2.09	0.21
99.1 °C	150	301.89 (12.31)	3.29	0.18
120.3 °C	100	296.26 (12.36)	4.16	0.16
141.1 °C	85	314.32 (11.36)	5.73	0.13
<b>Infrared Power 1,500 W</b>				
80.9 °C	210	302.57 (12.90)	2.32	0.22
101.4 °C	130	300.43 (11.03)	3.97	0.21
120.3 °C	95	307.04 (12.04)	5.41	0.17
141.1 °C	80	297.38 (11.88)	6.06	0.09
<b>Vacuum 80 iC</b>				
10 kPa	200	308.96 (12.42)	2.21	0.35
15 kPa	240	301.78 (12.63)	2.08	0.39
20 kPa	270	305.44 (11.95)	1.78	0.42
<b>Hot air</b>				
80.7 °C	420	301.55 (11.89)	0.85	0.67

**ผลการทดสอบคุณภาพเนื้อไก่ชิ้นบางหลังการอบแห้ง**

**ผลการทดสอบการหดตัวและค่าความแข็ง**

ผลการหดตัวของเนื้อไก่ชิ้นบางหลังการอบแห้งทางด้านความกว้าง (Length, L) และความหนา (Thickness, W) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ จะมีร้อยละการหดตัวมากกว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูง สาเหตุเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผิวภายนอกของเนื้อไก่ชิ้นบางจะเกิดเป็นโซนแข็งอย่างรวดเร็ว ทำให้เนื้อไก่ชิ้นบางมีการหดตัวได้น้อยจากการทดลองพบว่า เนื้อไก่ชิ้นบางอบแห้งมีการหดตัวด้านความหนามากกว่าด้านความกว้าง อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยประเมินข้อมูลจากร้อยละการหดตัวของเนื้อไก่ชิ้นบางที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป ร้อยละการหดตัวของเนื้อไก่ชิ้นบางที่อบแห้งทุกแหล่งพลังงานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

**ตารางที่ 4 แสดงร้อยละการหดตัวและค่าความแข็งของเนื้อไก่ชิ้นบางที่สภาวะอบแห้งต่างๆ**

Drying temperature/Pressure	Shrinkage (%)		Hardness (N)
	Length (L)	Thickness (W)	
<b>Infrared Power 1000 W</b>			
81.3 °C	39.01±2.18 <sup>a</sup>	34.36±2.24 <sup>a</sup>	28.36±0.90 <sup>a</sup>
99.8 °C	33.2±1.30 <sup>ab</sup>	26.52±3.16 <sup>a</sup>	23.25±1.83 <sup>ab</sup>
121.1 °C	29.4±2.13 <sup>abc</sup>	25.33±2.76 <sup>a</sup>	22.78±2.62 <sup>ab</sup>
140.3 °C	24.92±2.82 <sup>bc</sup>	24.08±2.0 <sup>3a</sup>	16.46±3.65 <sup>b</sup>



ตารางที่ 4 (ต่อ) แสดงรอยละการหดตัวและค่าความแข็งของเนื้อไก่ชิ้นบางที่สภาวะอบแห้งต่างๆ

Drying temperature/Pressure	Shrinkage (%)		Hardness (N)
	Length (L)	Thickness (W)	
<b>Infrared Power 1350 W</b>			
80.9 °C	33.70±1.62 <sup>ab</sup>	33.80±2.04 <sup>a</sup>	26.65±0.85 <sup>a</sup>
99.1 °C	33.12±1.38 <sup>ab</sup>	27.80±1.47 <sup>a</sup>	24.80±0.93 <sup>a</sup>
120.3 °C	22.52±1.70 <sup>bc</sup>	27.38±1.68 <sup>a</sup>	25.70±0.98 <sup>a</sup>
141.1 °C	23.96±1.39 <sup>bc</sup>	25.87±1.44 <sup>a</sup>	21.71±0.86 <sup>ab</sup>
<b>Infrared Power 1500 W</b>			
80.9 °C	33.81±1.25 <sup>ab</sup>	33.50±1.17 <sup>a</sup>	28.24±2.06 <sup>a</sup>
101.4 °C	24.24±1.92 <sup>bc</sup>	26.35±1.65 <sup>a</sup>	28.86±1.60 <sup>a</sup>
120.3 °C	24.35±1.88 <sup>bc</sup>	28.46±1.10 <sup>a</sup>	22.84±1.07 <sup>ab</sup>
141.1 °C	20.83±0.98 <sup>c</sup>	27.81±1.62 <sup>a</sup>	21.49±1.17 <sup>ab</sup>
<b>Vacuum</b>			
80 iC, 10 kPa	19.85±0.92 <sup>c</sup>	25.35±1.21 <sup>a</sup>	33.52±1.25 <sup>c</sup>
80 iC, 15 kPa	21.25±0.78 <sup>bc</sup>	21.36±1.33 <sup>ab</sup>	32.25±0.98 <sup>c</sup>
80 iC, 20 kPa	21.22±1.12 <sup>bc</sup>	21.21±0.98 <sup>ab</sup>	32.36±0.78 <sup>c</sup>
<b>Hot air</b>			
80.7 °C	21.55±1.70 <sup>bc</sup>	26.28±0.68 <sup>a</sup>	29.42±0.74 <sup>b</sup>

Note: Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95% confidence level ( $p < 0.05$ )

ในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าความแข็ง (Hardness, H) ของเนื้อไก่ชิ้นบางที่อบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งพลังงานความร้อน พบว่า เมื่อกำลังของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น เนื้อไก่ชิ้นบางจะมีค่าความแข็งมากกว่าที่กำลังรังสีอินฟราเรดต่ำๆ อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความแข็งเมื่อใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) และพบว่าเมื่ออบแห้งโดยใช้เทคนิคสุญญากาศจะมีค่าความแข็งสูงกว่าเมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 5 ค่าสีของเนื้อไก่ชิ้นบางหลังอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Energy Source	Drying temperature / Pressure	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	$\Delta E^*$
Infrared Power 1000 W	81.3°C	43.05±1.08 <sup>bode</sup>	6.96±0.47 <sup>e</sup>	24.24±0.87 <sup>de</sup>	13.95±0.81 <sup>fg</sup>
	99.8°C	41.82±1.64 <sup>ode</sup>	7.68±0.31 <sup>ode</sup>	24.24±0.74 <sup>de</sup>	15.16±0.61 <sup>fg</sup>
	121.1°C	44.29±1.27 <sup>bode</sup>	7.78±0.39 <sup>ode</sup>	27.66±0.88 <sup>bode</sup>	16.81±0.87 <sup>defg</sup>
	140.3°C	50.28±1.23 <sup>abc</sup>	11.88±0.37 <sup>b</sup>	30.78±0.80 <sup>abc</sup>	22.76±0.79 <sup>abc</sup>
Infrared Power 1350 W	80.9°C	39.41±0.73 <sup>a</sup>	8.87±0.58 <sup>bode</sup>	23.32±0.36 <sup>e</sup>	13.57±1.32 <sup>g</sup>
	99.1°C	45.40±1.08 <sup>bode</sup>	8.57±0.56 <sup>bode</sup>	25.74±0.68 <sup>ode</sup>	16.23±0.46 <sup>efg</sup>
	120.3°C	47.15±1.04 <sup>bode</sup>	10.70±1.11 <sup>bod</sup>	31.26±0.80 <sup>ab</sup>	21.81±0.69 <sup>bcd</sup>
	141.1°C	51.66±0.96 <sup>ab</sup>	11.42±0.76 <sup>b</sup>	32.89±0.79 <sup>a</sup>	22.26±0.89 <sup>ab</sup>



ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าสีของเนื้อไก่ชิ้นบางหลังอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Energy Source	Drying temperature / Pressure	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	$\Delta E^*$
Infrared Power 1500 W	80.9°C	39.59±1.17 <sup>e</sup>	8.35±0.35 <sup>bcd</sup>	24.06±0.71 <sup>de</sup>	14.52±0.61 <sup>g</sup>
	101.4°C	46.70±1.24 <sup>bcde</sup>	9.67±0.41 <sup>bcde</sup>	28.15±0.76 <sup>bcde</sup>	17.53±0.96 <sup>cdefg</sup>
	120.3°C	51.77±1.06 <sup>ab</sup>	11.06±1.03 <sup>bc</sup>	28.78±1.07 <sup>bcde</sup>	21.64±0.98 <sup>bcde</sup>
	141.1°C	41.29±0.93 <sup>de</sup>	15.78±0.93 <sup>a</sup>	29.16±0.72 <sup>bcd</sup>	24.86±0.85 <sup>bcd</sup>
Vacuum	80°C, 10 kPa	55.08±0.98 <sup>a</sup>	8.35±0.35 <sup>bcd</sup>	34.73±0.64 <sup>a</sup>	24.10±0.89 <sup>a</sup>
	80°C, 15 kPa	50.61±1.59 <sup>abc</sup>	7.31±0.36 <sup>cd</sup>	32.71±0.47 <sup>ab</sup>	23.71±0.62 <sup>ab</sup>
	80°C, 20 kPa	48.54±0.85 <sup>bcd</sup>	7.78±0.39 <sup>cd</sup>	29.77±1.07 <sup>abc</sup>	19.46±1.02 <sup>bcdef</sup>
Hot air	80.7°C	51.08±0.78 <sup>a</sup>	51.08±0.78 <sup>a</sup>	51.08±0.78 <sup>a</sup>	51.08±0.78 <sup>a</sup>

**Note:** Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different at 95% confidence level ( $p < 0.05$ )

### ผลการทดสอบคุณภาพด้านสี

ผลการวัดสีของเนื้อไก่ชิ้นบางหลังการอบแห้งแสดงดังตารางที่ 5 พบว่า เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L\*) และ ค่าสีแดง (a\*) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลต่อค่าสีเหลือง (b\*) เพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังรังสีอินฟราเรด พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของรังสีอินฟราเรดจะส่งผลให้เนื้อไก่ชิ้นบางมีค่าสีแดง (a\*) สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของแหล่งพลังงานความร้อนพบว่า การอบแห้งแบบสุญญากาศมีค่าสีแดง (a\*) ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด แต่มีค่าความสว่าง (L\*) และค่าสีเหลือง (b\*) สูงกว่า และกรณีกำลังรังสีอินฟราเรด 1500 W ที่อุณหภูมิอบแห้ง 140°C จะมีการเปลี่ยนแปลงสีรวม ( $\Delta E^*$ ) สูงที่สุด

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรด เทคนิคสุญญากาศ และลมร้อน พบว่า

1. การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ที่อุณหภูมิสูงอัตราการอบแห้งจะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยลง
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ใช้ทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ชิ้นบางด้วยรังสีอินฟราเรด 1,000 W, 1,350 W และ 1,500 W คือแบบจำลอง Page, Two term exponential และ Verma, Bucklin, Endan, & Wratten (1985) ตามลำดับ ตามลำดับ และสำหรับการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศความดันสัมบูรณ์ 10, 15 และ 20 kPa คือแบบจำลอง Approximation of diffusion ทั้ง 3 ความดัน
3. เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงสุด ตามด้วยเทคนิคสุญญากาศ และลมร้อนตามลำดับ สำหรับการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศเมื่อความดันสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งจะน้อยลง
4. ผลการทดสอบทางคุณภาพ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L\*) สูงขึ้น และเมื่อกำลังรังสีอินฟราเรดสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสีแดง (a\*) สูงขึ้นด้วย อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ จะมีร้อยละการหดตัวมากกว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูง และการอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศจะมีค่าความแข็งสูงสุด
5. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลง โดยพบว่าเครื่องอบแห้งที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดคือการอบแห้งแบบลมร้อน ตามด้วยแบบเทคนิคสุญญากาศ และรังสีอินฟราเรด ตามลำดับ



## ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป ควรศึกษาการอบแห้งเนื้อไก่ซึ่งบางแบบปรุงรส และทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อไก่อบแห้งโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัส

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์วิจัย และสถานที่ในการทดลอง และคณะอุตสาหกรรมเกษตร ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพ ตลอดจนบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมที่คอยให้คำชี้แนะในการดำเนินงานวิจัยนี้

## รายการอ้างอิง

- จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล. (2557). แนวทางการพัฒนาปลาร้าขาวสารกรอบ ด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 15, 1-10.
- สุภวรรณ ภูริระวณิชกุล สากีนา ลาแมปะ และ ยุทธนา ภูริระวณิชกุล. (2555). การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนรวมของรังสีอินฟราเรดไมโครเวฟ และลมร้อน: จลนพลศาสตร์คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(1), 117-129.
- สุเมธ ตันตระเชียร. (2545). **เทคโนโลยีอาหารเบื้องต้น**. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 348.
- อนุสร นาดี, ยุทธนา ภูริระวณิชกุล, และสุภวรรณ ภูริระวณิชกุล. (2555). จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบเตยด้วยรังสีอินฟราเรดรวมกับลมร้อนและลมร้อน. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 17(2), 130-138.
- อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และศักชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งซิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 15(2), 76-86.
- AOAC. (1995). Official Method of Analysis, 16th ed., **The association of official analytical chemists**. Inc. Arlington, Virginia, USA.
- Akpinar, EK., Bicer, Y. & Ildiz, C. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, 73, 75-84.
- Kang, T. H., Hong, H. K., Jeon, H. Y. & Han, C.S. (2011). Drying characteristics of squids according to far infra-red and heated air drying conditions. **Journal of Bio-systems Engineering**. 36(2), 109-115.
- Nathakaranakule, A., Kraiwanichkul, W. & Soporonnarit, S. (2007). Comparative study of different combined superheated-steam drying techniques for chicken Meat. **Journal of Food Engineering**, 80, 1023-1030.
- Ning, X. & Han, C. (2013). Drying characteristics and quality of Taegeuk ginseng (Panaxginseng C.A. Meyer) using far-infrared rays. **International Journal of Food Science and Technology**, 48, 477-483.
- Thao, H. M. & Noomhorm, A. (2011) Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties. **Walailak Journal of Science and Technology**, 8(2), 139-158.
- Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, T. (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.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J.B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, 85, 296-301.