

จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่ง DRYING KINETICS OF CHICKEN USING SUPERHEATED STEAM TECHNIQUE

ศรีมา แจ้คำ¹ และ กิตติศักดิ์ วิตินันท์^{2*}

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, srima_j@hotmail.com

^{2*}อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, k_yong28@hotmail.com

Srima Jaekhom¹ and Kittisak Witinantakit^{2*}

¹Lecturer, Energy Technology Department, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Choburi 20110, srima_j@hotmail.com

^{2*}Lecturer, Energy Technology Department, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict,
Sriracha District, Choburi 20110, k_yong28@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการอบแห้งเนื้อไก่ด้วยเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยทดลองอบแห้งเนื้อไก่ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 277.57% d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. จากการศึกษาพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะลดความชื้นได้เร็วที่สุดส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงกว่า โดยการอบแห้งเนื้อไก่ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 160 100 และ 60 นาทีตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล 2.675×10^{-10} 4.273×10^{-10} และ 6.858×10^{-10} m²/s ตามลำดับ สำหรับค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลือง ของเนื้อไก่หลังอบแห้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.9909-0.9984 และ 0.0141-0.0312 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เนื้อไก่อบแห้ง, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

ABSTRACT

The research was conducted to study the drying of chicken by superheated steam. The experiments were conducted at average initial moisture of 277.57% d.b. and final moisture content of 15% d.b., under controlled drying temperature at 120, 140 and 160 °C respectively. The results of this research indicate that higher drying temperature would have effect on reduced drying times due to dramatic decrease in moisture content. The drying time taken was 160, 100 and 60 minutes, respectively. In other words, the drying rate and moisture diffusivity coefficient at high drying temperature were better than lower drying temperature. The moisture diffusivity coefficient were 2.675×10^{-10} , 4.273×10^{-10} and 6.858×10^{-10} m²/s, respectively. Moreover, there was no significant difference ($p > 0.05$) on the color of dried chicken by superheated steam. The mathematical modelling could be used to predict the drying kinetic similar to the experiment with the decision coefficient and the square root of the mean square error in the range 0.9914-0.9980 and 0.0146-0.0304 respectively.

KEYWORDS: Drying of chicken, Mathematic modelling, Superheated steam

1. บทนำ

ผลผลิตเนื้อไก่ของโลกมีปริมาณปีละ 85-90 ล้านตัน ประเทศผู้ผลิตหลัก คือ สหรัฐฯ บราซิล และจีน สัดส่วนการผลิตรวมกันประมาณร้อยละ 50 ของผลผลิตทั่วโลก ผลผลิตไก่เนื้อในแต่ละประเทศทั่วโลกส่วนใหญ่ใช้บริโภคในประเทศ สำหรับประเทศไทยนั้นเป็นผู้ผลิตไก่เนื้ออันดับ 10 ของโลก มีผลผลิตประมาณปีละ 2.0-2.1 ล้านตัน หรือคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 2 ของผลผลิตไก่เนื้อทั่วโลกแต่หลังจากปี พ.ศ. 2547 ประเทศไทยเกิดการระบาดของโรคไข้หวัดนก ผู้ประกอบการไทยจึงหันไปขยายการผลิตและส่งออกเนื้อไก่แปรรูปและไก่ปรุงสุก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังคงเป็นที่ยอมรับจากลูกค้า ทำให้การส่งออกไก่แปรรูปของไทยขยายตัวได้อย่างต่อเนื่อง กลายเป็นผลิตภัณฑ์หลักของอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน [1] นักโภชนาการแนะนำให้ทานเนื้อไก่อย่างน้อย 2-3 ครั้งต่อสัปดาห์ เพื่อให้ได้รับวิตามินและแร่ธาตุอย่างเพียงพอ ในเนื้อไก่มีวิตามินบี ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการช่วยรักษาสุขภาพจิต หากทานเป็นประจำจะช่วยป้องกันความเครียดได้ ธาตุหลักจากไก่สามารถสร้างและปรับสมดุลของเม็ดเลือดแดง มีสารอาหารที่จำเป็นต่อดวงตา ช่วยในการรักษาต่อกระดูกและประสาทตาเสื่อม นอกจากนี้การทานเนื้อไก่อังสามารถช่วยบรรเทาความดันโลหิตและระดับคอเลสเตอรอลที่เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย [2]

ในปัจจุบันการแปรรูปเนื้อไก่ด้วยการอบแห้งค่อนข้างมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาและแก้ปัญหาเมื่อมีการผลิตเนื้อไก่ออกเกินความต้องการ การ

อบแห้งมีหลายวิธี เช่น การตากแห้งแบบธรรมชาติ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Superheated steam) เป็นต้น [3-6] ซึ่งการตากแห้งแบบธรรมชาติโดยใช้แสงแดดเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด แต่ต้องใช้ระยะเวลานานเนื่องจากตัวแปรขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา และยังมีปัญหาทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากฝุ่นและแมลงต่าง ๆ สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้นเป็นก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยระบบนี้อากาศร้อนจะนำความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุ ส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยทิ้งออกไปและมีบางส่วนที่นำกลับมาสร้างความชื้นต่อ ซึ่งก็หมายถึง การนำเอาอากาศขึ้นมาเป็นตัวกลางในการสร้างความชื้นด้วยนั่นเอง การใช้อุณหภูมิที่สูงและเป็นตัวกลางที่ปราศจากความชื้นในการอบแห้งจะสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ จากสมมติฐานดังกล่าวทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้ในการอบแห้งในกรณีนี้ [4-6] ซึ่งระบบนี้เป็นการอบแห้งในระบบปิดที่ใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ดังนั้นไอน้ำที่ได้จะเป็นไอน้ำ (ไอน้ำ) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงในการพาความชื้นจากวัสดุได้ค่อนข้างดี อันจะส่งผลให้ลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่คุณภาพด้านสี สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยผู้วิจัยคาดหวังว่ากรณีศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมและสามารถประยุกต์ใช้ ขยายผลในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ลักษณะอื่นต่อไปได้

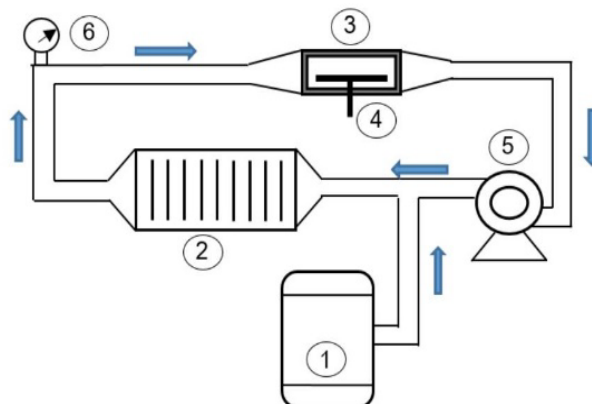
2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งเนื้อไก่โดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวล เป็นเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระดับห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 1 และตามไดอะแกรมดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย 1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ขนาด 20 kg/h 2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Super heater) 4.5 kW ควบคุมแบบ PID ค่าความถูกต้อง $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 3) ห้องอบแห้ง Drying chamber ขนาด 19 x 30 x 11 cm 4) เครื่องบันทึกน้ำหนัก (Load cell weighing indicator) ขนาด 500 g รุ่น PT650D มีค่าความถูกต้อง ± 0.1 g 5) พัดลม (Blower) แบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง Fuji Electric FA รุ่น Frno 75CIS-7A ขนาดมอเตอร์ 0.746 kW สามารถปรับความเร็วรอบพัดลมได้ และ 6) Pressure gauge

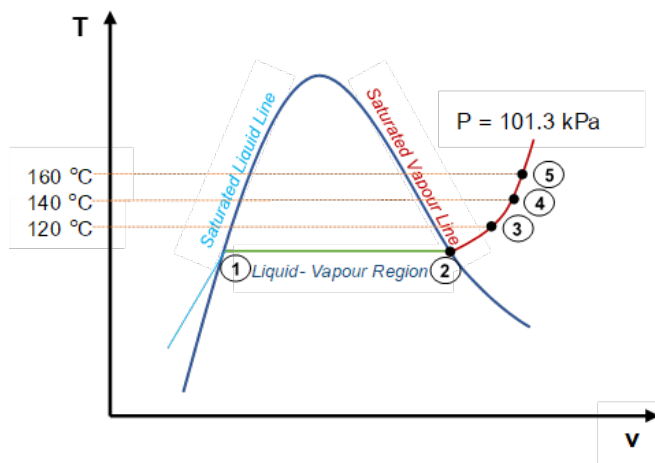


รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2 ไดอะแกรมเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

เครื่องกำเนิดไอน้ำทำหน้าที่ให้ความร้อนกับน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดจากจุดที่ 1 และจะเปลี่ยนสถานะจากของผสมจนเป็นไอน้ำอิ่มตัวทั้งหมดในจุดที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อเปิดวาล์วให้ไอน้ำร้อนออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำผ่าน Super Heater จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนให้สูงขึ้นจนเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C ดังจุดที่ 3 4 และ 5 ตามลำดับส่งไปยังห้องอบแห้งเพื่อใช้ในการอบแห้งเนื้อไก่ตามเงื่อนไขการทดลองต่อไป



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

2.2 วิธีการทดลอง

นำเนื้อไก่มาทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำ หั่นในทิศทางตั้งฉากกับกล้ามเนื้อเพื่อให้ความชื้นภายในเนื้อไก่เคลื่อนที่ออกจากเนื้อไก่ในทิศทางขนานกับกล้ามเนื้อ เนื้อไก่มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดกว้าง 3 cm ยาว 10 cm และหนา 3 mm ทำการอบแห้งเนื้อไก่ในเครื่องอบแห้งระดับปฏิบัติการ ครั้งละประมาณ 200 g ที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 2 m/s บันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 นาที โดยแต่ละอุณหภูมิทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 277.57 % d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. ซึ่งมีวิธีการหาความชื้นโดยนำตัวอย่างเนื้อไก่ไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 hr [7] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของเนื้อไก่ แล้วนำน้ำหนักแห้งไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ดังสมการที่ (1)

2.3 การหาอัตราการอบแห้ง

ในการทดลองอบแห้งเนื้อไก่นี้จะมีการบันทึกค่าน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที แล้วนำน้ำหนักไปคำนวณหาปริมาณความชื้นดังสมการที่ (1) [8]

$$MC = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.)

w คือ น้ำหนักของเนื้อไก่ที่เวลาใดๆ (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของเนื้อไก่ (g)

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ความชื้นสมดุลของเนื้อไก่จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [8]

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

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (%d.b.)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)

2.4 การหาอัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) คือ อัตราการลดความชื้นของเนื้อไก่ต่อหน่วยเวลา ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบการอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการที่ (3) [8]

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (3)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($g_w/g_{dry\ solid} \min$)

M_T คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ($g_w/g_{dry\ solid}$)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น ($g_w/g_{dry\ solid}$)

T คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

2.5 การวัดคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของเนื้อไก่ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d ความละเอียด ± 0.01 โดยใช้แสง daylight ที่ 6,500 K ในการวัดสี เป็นการทดสอบสีแบบ L a b โดยที่ L แสดงถึงค่าความสว่างมีค่า 0-100 โดยค่า 0 คือ สีดำ และค่า 100 คือ สีขาว ส่วนค่า a แสดงสีเขียว (-a) ถึงสีแดง (+a) และค่า b แสดงสีน้ำเงิน (-b) ถึงสีเหลือง (+b) จะทำการวัดสีของเนื้อไก่หลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขนาดยี่สิบในแต่ละช่วงอุณหภูมิจำนวน 10 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ

2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และวิธีการอบแห้ง สำหรับการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล จะตั้งสมมติฐานให้เนื้อไก่มีรูปทรงเรขาคณิตมีลักษณะเป็นแผ่นแบนที่กว้างและยาวมาก หดตัวน้อย และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียวตามความหนาของวัสดุ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของเหลวภายในวัสดุ ซึ่งจะได้คำตอบของสมการตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ดังสมการที่ (4) [6, 9]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D_{\text{eff}} t\right) \quad (4)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%d.b.)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาเนื้อไก่ (m)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (s)

สมมติให้การอบแห้งเนื้อไก่เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น และเป็นการอบแห้งที่ใช้เวลานาน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะพิจารณาเพียงเทอมแรก ซึ่งจะได้คำตอบของสมการที่ (4) ดังสมการที่ (5) [9]

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลแต่ละอุณหภูมิการอบแห้ง สามารถหาได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาในการอบแห้ง ซึ่งมีความลาดชันเท่ากับ $(-\pi^2 D_{\text{eff}})/(4L^2)$ อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบแห้ง และมีความสัมพันธ์ตามรูปสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) กับค่าพลังงานกระตุ้น

(Activation energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นน้ำให้เคลื่อนที่ออกจากวัสดุ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6)-(7) [6, 9]

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\text{abs}}}\right) \quad (6)$$

หรือ

$$\ln(D_{\text{eff}}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT_{\text{abs}}} \quad (7)$$

โดยที่ D_0 คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง (m^2/s)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส ($8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol K}$)

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในการอบแห้ง (K)

ค่าพลังงานกระตุ้นและปัจจัยเลขชี้กำลังสามารถวิเคราะห์ได้จากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{\text{eff}})$ กับ $(1/T_{\text{abs}})$ ซึ่งมีความลาดชันเท่ากับ $(-E_a/R)$

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการถ่ายเทมวลของการอบแห้งเนื้อไก่ โดยตั้งสมมติฐานว่า ไม่มีการหดตัว ไม่มีการควบแน่นของน้ำที่ผิวของเนื้อไก่ในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง ความชื้นจากภายในเนื้อไก่จะเคลื่อนที่ตามความหนาที่ผิวด้านบนและด้านล่างโดยกลไกการแพร่ ความชื้น และระเหยสู่อากาศเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวของเนื้อไก่กับตัวกลางการอบแห้ง และเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น โดยสามารถเขียนสมการควบคุม (Governing equation) การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อไก่ ได้ดังสมการที่ (8) [10]

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \right] \quad (8)$$

เนื้อไก่ที่อบแห้งจะตั้งสมมติฐานว่ามีความชื้นเริ่มต้นเท่ากันทุกจุด สามารถเขียนเงื่อนไขเริ่มต้นได้ดังสมการที่ (9)

$$M = M_i \quad t = 0, 0 \leq x \leq \pm L \quad (9)$$

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนออกทั้งด้านบนและด้านล่างเนื้อไก่ ดังนั้นจะไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านที่จุดกึ่งกลางความหนาของเนื้อไก่ และเมื่อเป็นการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานาน ความชื้นที่ผิวของเนื้อไก่จะเท่ากับความชื้นสมดุล ดังนั้นสามารถเขียนเงื่อนไขขอบเขตได้ดังสมการที่ (10) และสมการที่ (11)

$$\frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad t > 0, x = 0 \quad (10)$$

$$M_s = M_{eq} \quad t > 0, x = \pm L \quad (11)$$

โดยที่ M คือ ความชื้นของเนื้อไก่ที่เวลาใดๆ (%d.b.)

x คือ ความหนาที่ระยะใดๆ ของเนื้อไก่ (m)

จากสมการที่ (8)-(11) จะใช้เทคนิค Numerical method ในรูปแบบของระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) แบบ Explicit method [10] ในการวิเคราะห์หาคำตอบของสมการเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่ โดยแบ่งครึ่งหนึ่งของความหนาเนื้อไก่เป็น N จุด ระยะห่างแต่ละจุดมีความหนาเท่ากับ $\Delta x = 1.5 \times 10^{-5}$ m และใช้ช่วงเวลาในการคำนวณ $\Delta t = 0.1$ s ซึ่งจะได้คำตอบที่ใช้คำนวณความชื้นของเนื้อไก่ที่จุด $i=1$ จนถึงจุด $i=N-1$ ดังสมการที่ (12) และ (13)

$$M_i^{t+1} + M_i^t(2\alpha - 1) - \alpha(M_{i+1}^t + M_{i-1}^t) = 0 \quad (12)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{D_{eff} \Delta t}{\Delta x^2} \quad (13)$$

การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่จุดกึ่งกลางความหนาของเนื้อไก่ ($i=0$) คำนวณได้ดังสมการที่ (14)

$$M_0^{t+1} + M_0^t(2\alpha - 1) - 2\alpha M_1^t = 0 \quad (14)$$

และการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ผิวของเนื้อไก่ ($i=N$) เมื่อ $t>0$ s จะมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุลตามเงื่อนไขขอบเขตดังสมการที่ (11) ซึ่งการอบแห้งเนื้อไก่ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 100°C ความชื้นสมดุลของเนื้อไก่จะมีค่าเท่ากับศูนย์

ดัชนีที่ใช้บ่งชี้ความสามารถในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นเนื้อไก่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) [9] ดังสมการที่ (15) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ดังสมการที่ (16) [8, 9] โดยแบบจำลองที่ทำนายได้แม่นยำ ต้องมีค่า R^2 เข้าใกล้หนึ่ง และมีค่า RMSE เข้าใกล้ศูนย์

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{exp,ave}})^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]} \quad (16)$$

เมื่อ $MR_{\text{exp},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

$MR_{\text{exp,ave}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลองเฉลี่ย (decimal)

$MR_{\text{pre},i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการคำนวณ (decimal)

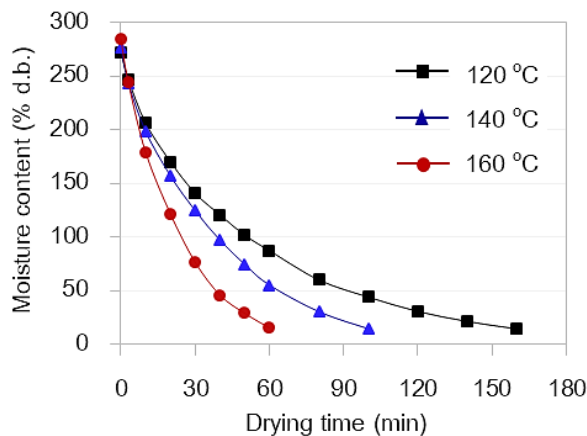
N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

3. ผลการวิจัย

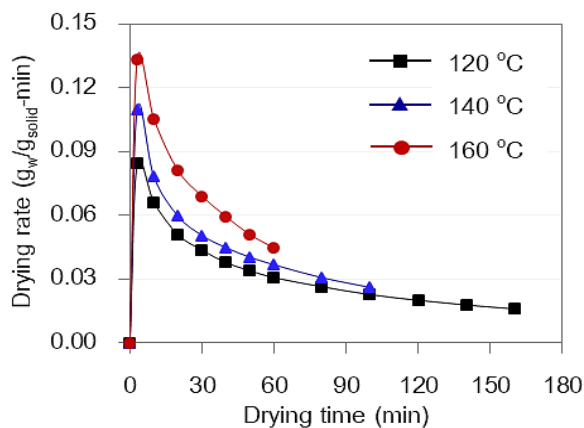
3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 140 และ 160°C พบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งดังรูปที่ 4 โดยช่วงแรกของการอบแห้ง เมื่อเนื้อไก่ได้รับความร้อน น้ำที่บริเวณผิวเนื้อไก่จะระเหยออกอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเนื้อไก่มีความชื้นสูงโดยเฉพาะที่ผิวของเนื้อไก่ ทำให้ความชื้นของเนื้อไกลดลงอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการอบแห้งสูงในช่วงเริ่มต้นการอบแห้ง ดังรูปที่ 5 หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลง และความชื้นของเนื้อไกลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเนื้อไก่ออกมาที่ผิวเนื้อไช้ากว่าอัตราการระเหยนํ้าจากผิวเนื้อ

ไก่อุตสาหกรรมการอบแห้ง เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า ที่อุณหภูมิ 160 °C มีความชื้นลดลงเร็วที่สุด [11] ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเร็วกว่า โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 120 140 และ 160 °C จะใช้เวลาในการอบแห้ง 160 100 และ 60 นาที ตามลำดับ จนเนื้อไก่มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งดังรูปที่ 5 จะให้ผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งให้สูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่มีอยู่ในเนื้อไก่ [12] ซึ่งจะใช้เป็นพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงในการระเหยน้ำออกไปจากเนื้อไก่ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อไก่ โดยที่อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าและอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ระยะเวลาการอบแห้งเร็วกว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อไก่



รูปที่ 5 อัตราการอบแห้งเนื้อไก่

3.2 คุณภาพด้านสี

ผลการทดสอบคุณภาพด้านสีของเนื้อไก่แสดงในตารางที่ 1 จากการทดลองพบว่า เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 120 °C เป็น 140 °C และจาก 140 °C เป็น 160 °C จะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L) มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าสีแดง (a) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ส่งผลให้ผิวของผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลเข้ม [5, 11] ส่วนค่าสีเหลือง (b) ของเนื้อไก่หลังอบแห้งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากทุกการทดลอง

ตารางที่ 1 สีของเนื้อไก่หลังการอบแห้ง

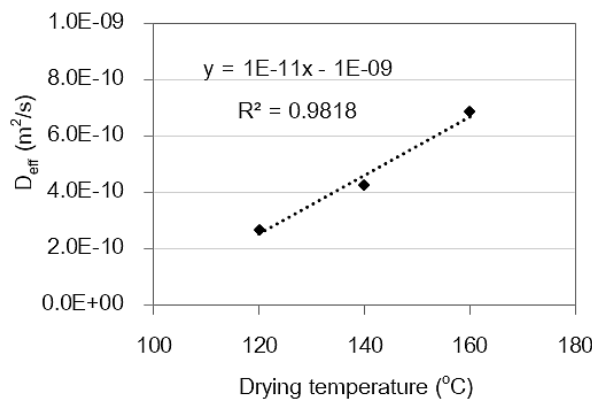
อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (°C)	ค่าสี		
	L ^{ns}	a ^{ns}	b ^{ns}
120	31.05±3.20	7.82±1.65	10.97±1.75
140	30.36±3.26	8.37±2.08	10.99±2.20
160	29.94±1.09	9.20±1.29	11.00±0.60

หมายเหตุ: -ns (non-significant) ตัวอักษรหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

แต่อย่างไรก็ตามค่าความสว่าง (L) ค่าสีแดง (a) และค่าสีเหลือง (b) ของเนื้อไก่ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 120 140 และ 160 °C ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิสูงจะทำให้เนื้อไก่มีภาวะเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น โดยค่าความสว่างลดลงและค่าสีแดงเพิ่มขึ้น และมีค่าสีเหลืองใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิการทดลอง

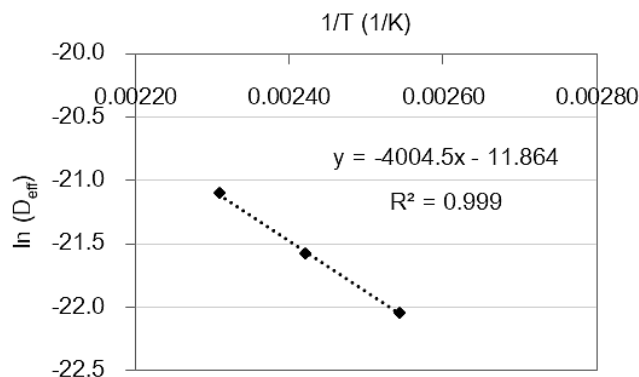
3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สามารถหาได้จากความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง ตามสมการที่ (5) ซึ่งจะพบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 120 140 และ 160 °C มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล 2.675×10^{-10} 4.273×10^{-10} และ 6.858×10^{-10} m^2/s ตามลำดับ และจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น [5-6] โดยอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันไอน้ำสูงตามไปด้วย ส่งผลให้ความชื้นเคลื่อนที่และแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น [9] ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง



รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลดังกล่าว เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ $(1/T)$ ดังรูปที่ 7 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.999 โดยสามารถคำนวณหาค่าปัจจัยเลขชี้กำลัง (D_0) เท่ากับ $7.038 \times 10^{-6} m^2/s$ และพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 33.293 kJ/mol และสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียสดังสมการที่ (17) ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ทุกค่าอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 120-160 °C

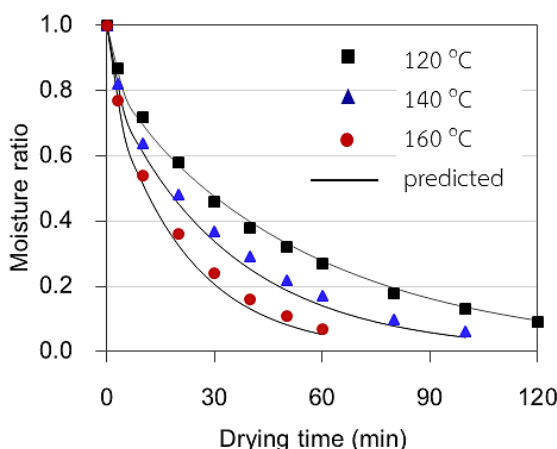


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้ง

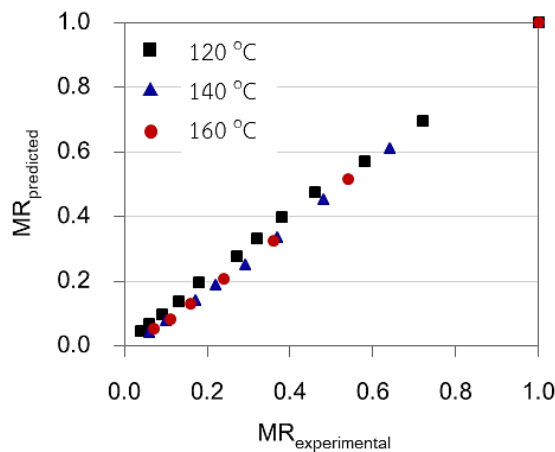
$$D_{eff} = 7.038 \times 10^{-6} \exp \left[-33.293 / (RT_{abs}) \right] \quad (17)$$

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคของระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลตามสมการที่ (9) เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อไก่ที่อุณหภูมิอบแห้ง 120 140 และ 160 °C โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic for Applications 7.1 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของเนื้อไก่ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ได้ใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองดังรูปที่ 8 และจากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลอง พบว่า มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 45° โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9981 0.9909 และ 0.9924 และ RMSE เท่ากับ 0.0141 0.0306 และ 0.0312 ตามลำดับ ค่า R^2 ที่เข้าใกล้หนึ่ง และค่า RMSE ที่เข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าการทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนี้แบบจำลองสามารถใช้ประโยชน์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและระยะเวลาอบแห้งที่การอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 120-160 °C ได้โดยไม่ต้องมีการทดลอง



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลอง



รูปที่ 9 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลอง

4. สรุป

การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยเทคนิคไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่า อัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้ง โดยที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราส่วนของความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเร็วกว่า โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 120 140 และ 160 °C จะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 160 100 และ 60 นาที ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 2.675×10^{-10} - 6.858×10^{-10} m²/s และมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 33.293 kJ/mol นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความสว่าง (L) ค่าสีแดง (a) ค่าสีเหลือง (b) ของเนื้อไก่หลังอบแห้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9909-0.9984 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.0141-0.0312 แสดงว่าสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงของความชื้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Chuasuwan C. Frozen and processed chicken industry [internet]. 2018 [cited 2019 July 08]. Available from: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/aec17abe-4a8d-4e4f-8d38-815bd58cf1c6/IO_Chicken_181018_TH_EX.aspx. (In Thai)

- [2] Jessimy M. 11 Amazing health benefits of chicken. Food & Nutrition [internet]. 2019 [cited 2019 July 08]. Available from: <https://www.naturalfoodseries.com/11-health-benefits-chicken>.
- [3] Assawarachan R. Drying agricultural products by microwave. KBEJ. 2011;1(2):31-42. (In Thai)
- [4] Witinantakit K, Rordprapat W, Nathai N. Snake skin gourami drying by superheated steam. Agricultural Sci. J. 2010;41:1(suppl.):524-7. (In Thai)
- [5] Sa-adchom P, Swasdisevi T, Nathakarakule A, Soponronnarit S. Mathematical model of pork slice drying using superheated steam. J. Food Eng. 2011;104 (4):499-507.
- [6] Nathakarakule A, Kraiwanichkul W, Soponronnarit S. Comparative study of different combined superheated- steam drying techniques for chicken meat. J. Food Eng. 2007;80:1023-30.
- [7] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official's Analytical Chemists. Virginia; 2000.
- [8] Teeboonma U, Jongjam S. Ginger drying using infrared-vacuum technique. Burapha Sci. J. 2010;15:76-86. (In Thai)
- [9] Omolola AO, Kapila PF, Silungwe HM. Mathematical modeling of drying characteristics of Jew's Mallow (Corchorus Olitorius) leaves. Inf Processing Agri 2019;6(1):109-15.
- [10] Ozisik MN. Finite Difference Methods in Heat Transfer, Florida: CRC Press; 1994.
- [11] Rordprapat W, Jaekhom S, Witinantakit K, Nunchai W, Lamcome J. Seafood drying using superheated steam. Agricultural Sci. J. 2010;41:1(suppl.):532-5. (In Thai)
- [12] Sa- adchom P, Swasdisevi T, Thomthong T, Samuttarin P, Soponronnarit S. Drying of ground fish slices using superheated steam. RMUTP Res. J. 2013;7(2):74-86. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ศรีมา แจ้คำ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 096-743-2241 E-Mail: srima_j@hotmail.com



กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 086-386-1885 E-Mail: k_yong28@hotmail.com

* Corresponding author

Article History:

Received: October 18, 2019

Revised: December 23, 2019

Accepted: December 26, 2019