

การออกแบบและพัฒนาเครื่องย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้  
Design and development of the continuous infrared grilling machine  
for pork-skewer product

ศุภเกียรติ ทองทับ<sup>1</sup>, เอกพงษ์ ชีวดีโสภณ<sup>1</sup> และ เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง แขวงลาดกระบังเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
\*ติดต่อ: kiattisak.ro@kmitl.ac.th, โทรศัพท์: 0 2329 8356

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้เครื่องย่างมีส่วนประกอบหลักได้แก่ 1) โครงสร้างเครื่องย่าง 2) ชุดส่งกำลังและลำเลียง 3) ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ 4) ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด 5) ชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสและ 6) ชุดควบคุมกระบวนการอย่างกระบวนการย่างเริ่มต้นจากการป้อนผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้เข้ากับชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบและลำเลียงด้วยโซ่ผ่านชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดในระหว่างการย่างมีการจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุน้ำปรุงรส 2 ครั้งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่างผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยลงในภาชนะรองรับทอดอย่างตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิผิวของแผ่นอินฟราเรดเป็น 520, 530, และ 540 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่เป็น 1, 1.27, และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาทีผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องย่างสามารถทำงานและควบคุมสภาวะของกระบวนการย่างได้ตามต้องการอุณหภูมิภายในของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาของการย่างซึ่งการย่างตัวอย่างที่อุณหภูมิเป็น 520-540 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่เป็น 1-1.27 เซนติเมตรต่อวินาทีส่งผลให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิภายในมากกว่า 72 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ได้หลังการย่างมีคุณภาพ และปลอดภัยจากแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ USDA

**คำหลัก:** เครื่องย่างแบบต่อเนื่อง; ผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้; อินฟราเรด

### Abstract

This research was aimed at designing and developing a continuous infrared grilling machine for pork-skewer product. The machine consists of 1) structural frame, 2) power transmission and conveying units, 3) gripper unit, 4) infrared heater, 5) seasoning sauce containers, and 6) controller. The grilling process begins from loading pork-skewers to the gripper units, passing through the infrared heater with a chain conveyor, dipping into seasoning sauce container twice during grilling, unloading pork-skewers into a container. The products were grilled at 520, 530, and 540°C of surface temperature of infrared heater, and at the moving velocity of 1, 1.27, and 1.54 cm/s. The results showed that the machine could be operated and controlled the grilling conditions as designed. The internal temperature of products increased with time and temperature. Internal temperatures of products grilled by the temperature of 520-540°C and the moving velocity of 1-1.27 cm/s were higher than 72°C. It indicated that grilled products were quality and safety from harmful bacteria, according to USDA recommendation.

**Keywords:** continuous grilling machine; skewer product; infrared

## 1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ได้รับความนิยมนับประมานทั่วไปในประเทศไทยซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปแบบของเนื้อสัตว์ ได้แก่ เนื้อหมู เนื้อวัวเนื้อไก่ลูกชิ้นหรือไส้กรอก เป็นต้นผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ผ่านกระบวนการย่างเพื่อให้อาหารสุกและปราศจากแบคทีเรียทำให้เกิดโรค โดยทั่วไปการย่างนิยมใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากไฟฟ้า การเผาไหม้ถ่านไม้หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นต้น การย่างเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนในผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งความร้อนทำให้โปรตีนของเนื้อสัตว์เกิดการเสียสภาพ รวมทั้งเนื้อสัตว์เกิดการสูญเสียมวลจากการระเหยของน้ำและการหดตัวของน้ำมัน[1] รายงานวิจัยจำนวนมากได้กล่าวถึงการย่างเนื้อสัตว์ที่อุณหภูมิสูง ทำให้โปรตีนบางส่วนของเนื้อสัตว์เกิดการไหม้และเกิดสาร Heterocyclic amines รวมทั้งการของน้ำมันจากเนื้อสัตว์หยดลงบนแหล่งความร้อนเกิดการสันดาป ไม่สมบูรณ์ของน้ำมัน เกิดสาร Polycyclic aromatic hydrocarbons เป็นควินหรือเขม่าลอยขึ้นมาสัมผัสกับผิวเนื้อสัตว์ในระหว่างการย่างด้วย ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ถ้าหากร่างกายได้รับในปริมาณที่มาก และเป็นเวลานาน อาจเกิดก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ [2,3,4]สำหรับการย่างด้วยคลื่นอินฟราเรด Braeckman et al. (2009) [5]รายงานว่าการให้ความร้อนแบบอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ทำให้มีการหดตัวของน้ำมันและน้ำจากผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการย่างด้วยรูปแบบอื่นและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานดีกว่า

ปัจจุบันนี้พบว่าการย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงใช้แรงงานคนในการย่างและตรวจพินิจระดับความสุกด้วยสายตา ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมอัตราการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอได้ Nimerovski (1979) [6] และ Cheung et al. (2003) [7]ได้ออกแบบเครื่องย่างโดยใช้โซ่ลำเลียง โดยตัวเครื่องมีด้ามไม้เสียบผลิตภัณฑ์ยึดติดกับโซ่ และลำเลียงผลิตภัณฑ์เสียบไม้วางตัวในแนวนอนอยู่เหนือแหล่งกำเนิดความร้อน ผลิตภัณฑ์สามารถหมุนรอบตัวเอง

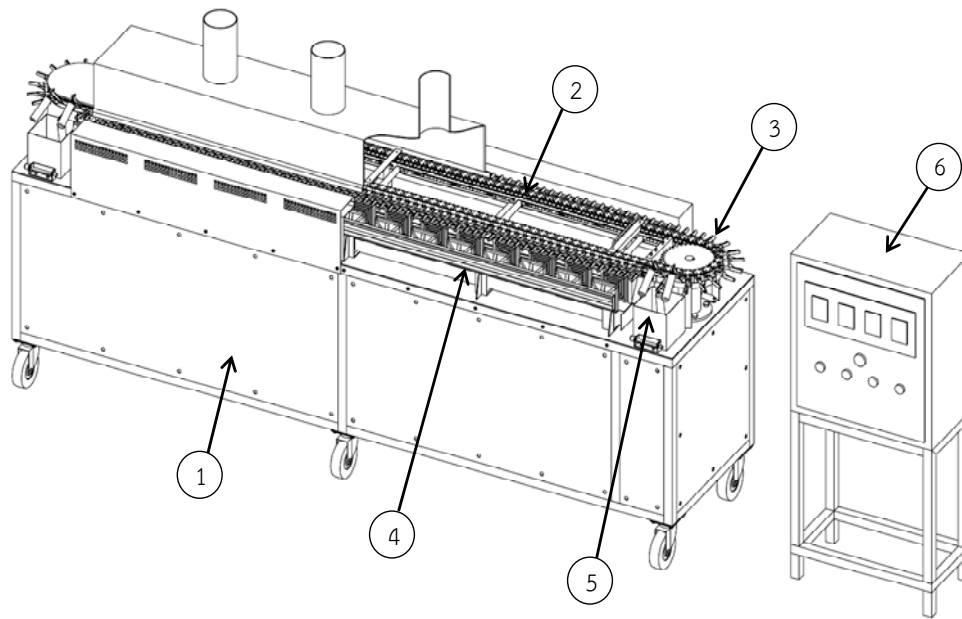
ระหว่างการเคลื่อนที่ในกระบวนการย่าง ซึ่ง Erzincanli และ Sharp (1997)[8]รายงานว่าการใช้ชุดกลไกจับผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดผลดีต่ออุตสาหกรรมมากกว่าในด้านความสะดวกและความปลอดภัยพนักงานไม่ต้องสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรงสามารถลดการปนเปื้อนจากเชื้อแบคทีเรียที่อาจมาจากพนักงานได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องย่างด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีลักษณะการย่างผลิตภัณฑ์แบบต่อเนื่องในแนวตั้งด้วยชุดให้ความร้อนอินฟราเรดเพื่อใช้ทดแทนแรงงานคนและลดการปนเปื้อนจากพนักงานสู่ผลิตภัณฑ์ และเพื่อพัฒนารูปแบบการย่างแบบต่อเนื่องในแนวตั้งให้ได้ผลิตภัณฑ์หลังการย่างที่มีคุณภาพสามารถรับประทานได้ โดยอ้างอิงตามคำแนะนำของ United States Department of Agriculture (USDA) [9] ที่แนะนำอุณหภูมิสำหรับการปรุงอาหารประเภทเนื้อสัตว์ให้ปลอดภัยจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคสำหรับเนื้อสดควรมีอุณหภูมิภายในอย่างน้อย 62.8 องศาเซลเซียส และเนื้ออบ 71.1 องศาเซลเซียส

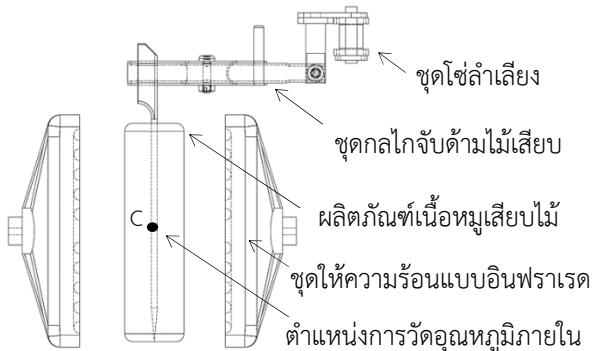
## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 หลักการการออกแบบ

เครื่องย่างได้รับการออกแบบและสร้างให้มีส่วนประกอบหลัก ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 1) โครงสร้างเครื่องย่าง 2) ชุดส่งกำลังและลำเลียง 3) ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ 4) ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด 5) ชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสและ 6) ชุดควบคุมกระบวนการย่างซึ่งได้ยื่นขอรับสิทธิบัตรกับกรมทรัพย์สินทางปัญญาเลขที่คำขอ 1401003748[10]เครื่องย่างสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบทำงานด้วยแรงกดของสปริงชุด (Torsion spring) ติดกับโซ่ลำเลียง ดังรูปที่ 2 ทำหน้าที่ลำเลียงผลิตภัณฑ์ ในลักษณะการวางตัวในแนวตั้งผ่านระหว่างชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด โดยออกแบบให้ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบเคลื่อนที่แบบวนกลับผ่านชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด 2 ช่วง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องอย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหุเสียบไม้  
(ดัดแปลงจากสิทธิบัตรเลขที่คำขอ 1401003748)



รูปที่ 2 การวางตัวในแนวตั้งของผลิตภัณฑ์

## 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอย่าง

โครงสร้างเครื่องอย่างเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม มีต้นกำลังเป็นมอเตอร์กระแสสลับ 380 โวลต์ 3 เฟสขนาด 2 แรงม้าและควบคุมอัตราเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ และชุดลำเลียงเป็นโซ่แบบปีกด้านเดียว เบอร์ 60 และชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบใช้แรงกดจากสปริงชด ซึ่งเป็นวัสดุประเภท Music Wire โดยสามารถคำนวณหาจำนวนขดใช้งานของสปริง ( $N_b$ ) และค่าคงที่ของสปริง ( $k$ ) ที่เหมาะสมดังรูปที่ 3 จากสมการที่(4) และ (6) [11] ตามลำดับ โดยที่ค่า  $E$  คือค่าโมดูลัสสภาพยืดหยุ่น,  $d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดสปริง,  $D$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดสปริง,  $\mu$  คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต และ  $\theta$  คือมุมกดของสปริง

$$\sum F_y = 0; \quad 4f = mg_{product} \quad (1)$$

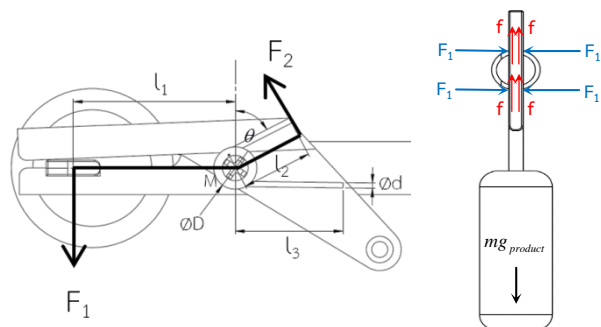
$$f = \mu F_1 \quad (2)$$

$$\sum M = 0; \quad 2F_1 \times l_1 = F_2 \times l_2 \quad (3)$$

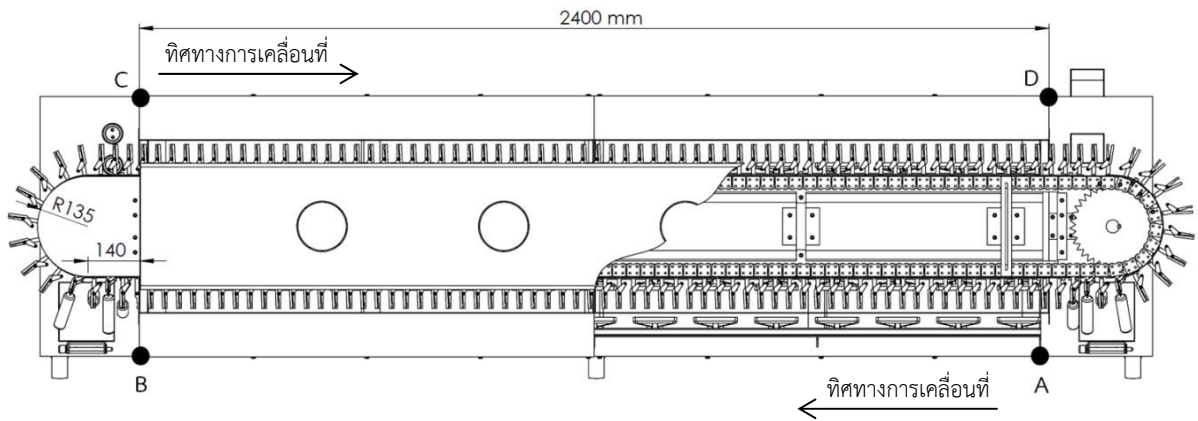
$$\theta = \frac{64(F_2 \times l_2) \times D \times N_b}{d^4 \times E} \quad (4)$$

$$N_a = N_b \times \frac{l_2 + l_3}{3\pi D} \quad (5)$$

$$k = \frac{d^4 \times E}{64 \times D \times N_a} \quad (6)$$



รูปที่ 3 มังของแรงบนชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ

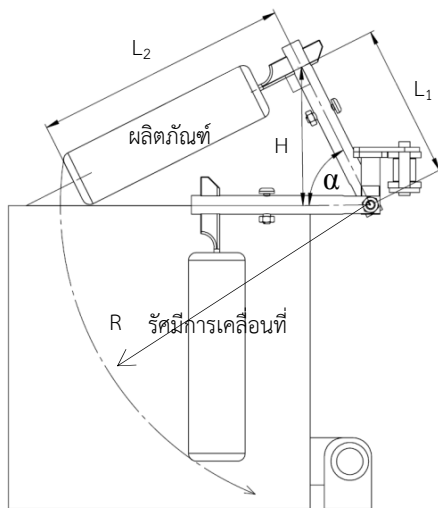


รูปที่ 4 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องอย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้

ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบสามารถจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสตั้งรูปที่ 5 คำนวณหามุมยกตัว ( $\alpha$ ) ของชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบเพื่อให้สามารถจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสได้อย่างเหมาะสมจากสมการที่ (7) และความสูงการยกตัว (H) ด้วยสมการที่ (8)

$$\tan(\alpha) = L_2 / L_1 \quad (7)$$

$$\sin(\alpha) = H / L_1 \quad (8)$$



รูปที่ 5 การจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรส

### 2.3 ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด

ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดชนิดเซรามิกสขนาด 800 วัตต์ จำนวนรวม 60 แผ่น มีกำลังไฟฟ้ารวม 48 กิโลวัตต์ ควบคุมกระบวนการย่างด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคที่ผิวของแผ่นอินฟราเรด และควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)

### 2.4 ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง

เครื่องทำงานเป็นแบบต่อเนื่องมีตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ดังรูปที่ 4 คือ 1) การจุ่มน้ำปรุงรสครั้งที่ 1(A) 2) การย่างช่วงที่ 1(AB) 3) การจุ่มน้ำปรุงรสครั้งที่ 2(B) และ 4) การย่างช่วงที่ 2(CD) รวมระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวอย่างจากจุด A ถึงจุด D เท่ากับ 550 เซนติเมตร การทำงานเริ่มต้นจากการป้อนผลิตภัณฑ์เข้ากับชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบซึ่งยึดติดอยู่กับโซ่ลำเลียง บริเวณการป้อนนี้ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบเปิดออกเพื่อรอจับด้ามไม้เสียบของผลิตภัณฑ์ตั้งรูปที่ 6 หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ถูกลำเลียงจุ่มน้ำปรุงรสครั้งที่ 1 และเคลื่อนที่ผ่านการย่างช่วงที่ 1 จากนั้นผลิตภัณฑ์ถูกลำเลียงจุ่มน้ำปรุงรสครั้งที่ 2 และเคลื่อนที่ผ่านการย่างช่วงที่ 2 จนสิ้นสุดกระบวนการผลิตภัณฑ์จะถูกปล่อยลงบนภาชนะรองรับ และชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณการป้อนอีกครั้ง

### 2.5 การทดลอง

เตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์เนื้อหมูหมักเสียบไม้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3.0 เซนติเมตร ความยาวเฉลี่ย 10.0 เซนติเมตร ไม้เสียบเป็นแบบไม้จริง ความยาว 15.0 เซนติเมตร ตัวอย่างมีมวลรวมไม้เสียบเฉลี่ย 42 กรัม แช่เยือกแข็งที่ -20 องศาเซลเซียส เพื่อเก็บรักษา ก่อนเริ่มการทดลองวางตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิภายใน -5 องศาเซลเซียส เสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค เข้าภายในบริเวณตรงกลางของตัวอย่างที่กึ่งกลางความยาวดังรูปที่ 2 เพื่อวัดอุณหภูมิภายในและติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลไว้ที่ผิวของตัวอย่าง จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของการย่างผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ด้วยเครื่องยี่ห้อ Nanotech รุ่น KF-03 ที่ใช้แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว จึงทำการทดลองอย่างตัวอย่างที่อุณหภูมิ



ผิวของแผ่นอินฟราเรดเป็น 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส [12] ด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่ที่เป็น 1, 1.27 และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที บันทึกค่าอุณหภูมิภายในและผิวของตัวอย่างทุก 1 วินาทีด้วยเครื่อง Data logger (Model 34972A, Keysight Technologies, Inc., US)



ตำแหน่งป้อนผลิตภัณฑ์

รูปที่ 6 ตำแหน่งป้อนผลิตภัณฑ์

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ คือชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ ซึ่งชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบสามารถจับด้ามไม้เสียบของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมั่นคง และพาผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดและพาผลิตภัณฑ์จุ่มลงในน้ำปรุงรสได้

กลไกจับด้ามไม้เสียบมีอุปกรณ์หลักเป็นสปริงชด จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณและเลือกใช้สปริงชดที่เหมาะสมกับลักษณะการทำงานของกลไกจับด้ามไม้เสียบ และมวลของผลิตภัณฑ์ด้วย เริ่มต้นจากการใช้สมดุลแรง สมดุลโมเมนต์ และการคำนวณหาจำนวนชุดใช้งานของสปริง และค่าคงที่ของสปริง จากการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างไม้เสียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าเป็น 0.47 และเลือกใช้สปริงชดเป็นวัสดุประเภท Music Wire มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดสปริง (d) 0.1 เซนติเมตร ติดตั้งเข้ากับสกรูยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 1.0 เซนติเมตร ระยะ  $l_1$ ,  $l_2$  และ  $l_3$  มีค่าเป็น 3.0, 1.0 และ 3.0 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชุดใช้งานและค่าคงที่ของสปริงแสดงอยู่ในตารางที่ 1 เลือกใช้สปริงชดที่มีขนาดมุมกดของสปริง ( $\theta$ ) เป็น 15 องศา และจำนวนชุดสปริงใช้งาน ( $N_b$ ) เป็น 10 รอบ พบว่าชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบสามารถจับและลำเลียงผลิตภัณฑ์ได้โดยไม่เกิดความผิดพลาดในการทำงาน

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชุดใช้งานและค่าคงที่ของสปริง

| ตัวแปร           | ค่าออกแบบ |             |       |       |       |
|------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|
| $\theta$         | 10        | 15          | 20    | 25    | 30    |
| $N_b$<br>(turns) | 6.55      | <u>9.82</u> | 13.09 | 16.37 | 19.64 |
| k<br>(N.m/turn)  | 0.11      | <u>0.08</u> | 0.06  | 0.05  | 0.04  |

ตารางที่ 2 แสดงมุมการยกตัวของชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบเพื่อให้สามารถจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในชุดภาชนะบรรจุน้ำปรุงรส ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างมีความยาว ( $L_2$ ) เป็น 15.0 เซนติเมตร และออกแบบให้ด้ามของชุดกลไก ( $L_1$ ) มีความยาวเป็น 10.0 เซนติเมตร ต้องออกแบบให้มีมุมการยกตัว ( $\alpha$ ) เป็นอย่างน้อย 56.31 องศา และความสูงของการยกตัว (H) เป็น 8.32 เซนติเมตร ผลของการคำนวณแสดงให้เห็นว่าชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบสามารถยกผลิตภัณฑ์ขึ้นข้ามขอบของภาชนะบรรจุน้ำปรุงรส และสามารถจุ่มผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสได้

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความสูงของการยกตัวของชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบ

| ตัวแปร          | ค่าออกแบบ |       |              |       |       |
|-----------------|-----------|-------|--------------|-------|-------|
| $L_1$<br>(cm)   | 8.0       | 9.0   | 10.0         | 11.0  | 12.0  |
| $\alpha$<br>(°) | 61.93     | 59.04 | <u>56.31</u> | 53.75 | 51.34 |
| H<br>(cm)       | 7.06      | 7.71  | <u>8.32</u>  | 8.87  | 9.37  |

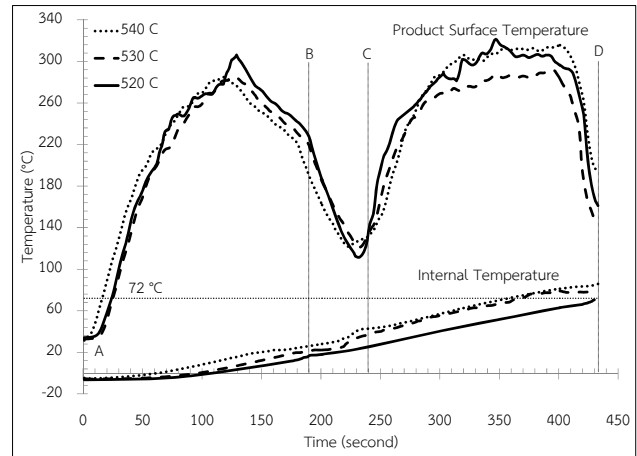
#### 3.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่าง

การทดลองอย่างตัวอย่างที่อุณหภูมิผิวของชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเป็น 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่ 1, 1.27 และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่าง ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องอย่าง ดังรูปที่ 7, 8 และ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการอย่างด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่ 1, 1.27 และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาทีซึ่งใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากจุด A ถึงจุด D เป็น 550, 433 และ 357 วินาที ตามลำดับ และมีอัตราการอย่างตัวอย่าง

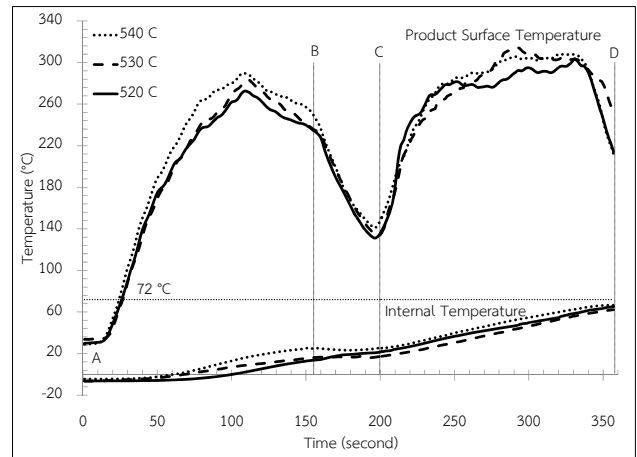
เป็น 1,000-1,800 ตัวอย่างต่อชั่วโมง หลังจากผ่านจุด A พบว่าตัวอย่างมีอุณหภูมิที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้จุด B ซึ่งเป็นบริเวณทางออกของการย่างช่วงที่ 1 อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างเริ่มลดลง และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง BC ซึ่งเป็นช่วงเคลื่อนที่วนกลับ ไม่มีการให้ความร้อน หลังจากนั้นเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่การย่างช่วงที่ 2 อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด และแสดงค่าอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ และเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้ทางออกของการย่างช่วงที่ 2 ตัวอย่างมีอุณหภูมิที่ผิวลดลง

### 3.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของตัวอย่าง

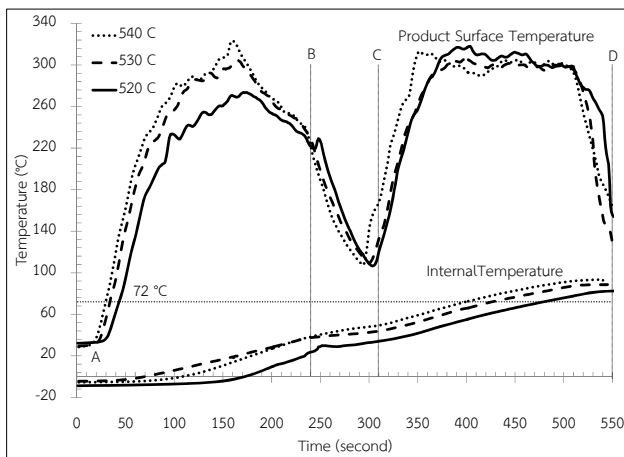
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของตัวอย่างที่อัตราเร็วการเคลื่อนที่เป็น 1, 1.27 และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 7, 8 และ 9 เริ่มต้นอุณหภูมิภายในของตัวอย่างเท่ากับ -5 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าสู่ช่วงการย่างช่วงที่ 1 พบว่าอุณหภูมิภายในของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาของการย่างและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการย่าง เมื่อตัวอย่างออกจากช่วงการย่างช่วงที่ 1 อุณหภูมิภายในของตัวอย่างเพิ่มขึ้นช้า เนื่องจากช่วงนี้ไม่มีการให้ความร้อน แต่มีการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวอย่างเข้ามาภายในตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าสู่ช่วงการย่างช่วงที่ 2 อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนสิ้นกระบวนการย่างที่ตำแหน่ง D



รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ผิวและภายในตัวอย่างของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ 1.27 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 9 อุณหภูมิที่ผิวและภายในตัวอย่างของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 7 อุณหภูมิที่ผิวและภายในตัวอย่างของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ 1 เซนติเมตรต่อวินาที

### ตารางที่ 3 อุณหภูมิภายในของตัวอย่างหลังการย่าง

| อัตราเร็วการเคลื่อนที่ (เซนติเมตรต่อวินาที) | อุณหภูมิการย่าง (องศาเซลเซียส) | อุณหภูมิภายใน (องศาเซลเซียส) |
|---|--------------------------------|------------------------------|
| 1   | 520                            | 82.4                         |
|   | 530                            | 88.6                         |
|   | 540                            | 87.4                         |
| 1.27  | 520                            | 72.8                         |
|   | 530                            | 77.6                         |
|   | 540                            | 85.8                         |
| 1.54  | 520                            | 65.1                         |
|   | 530                            | 62.2                         |
|   | 540                            | 66.6                         |

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิภายในของตัวอย่างภายเมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่าง พบว่าการย่างตัวอย่างด้วย

อัตราเร็วการเคลื่อนที่เป็น 1-1.27 เซนติเมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิเป็น 520-540 องศาเซลเซียส (อัตราการย่าง 1,000-1,400 ตัวอย่างต่อชั่วโมง)สามารถทำให้อุณหภูมิภายในตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นจนมีอุณหภูมิมากกว่า 72 องศาเซลเซียส (72.8-88.6 องศาเซลเซียส)ซึ่งเป็นไปตามข้อแนะนำของ USDA ทำให้ได้ตัวอย่างหลังการย่างที่สภาวะเหล่านี้มีลักษณะสุกมีคุณภาพสามารถรับประทานได้ และปลอดภัยจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค ดังรูปที่ 10 แสดงลักษณะกายภาพของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการย่าง พบว่าตัวอย่างหลังการย่างด้วยเครื่องยามีสีค่อนข้างสม่ำเสมอ



รูปที่ 10 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการย่าง และสำหรับการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์นั้นเอกพงษ์ (2558)[12] ได้ทดลองย่างผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ด้วยเครื่องย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดนี้ ที่อุณหภูมิ 520,530 และ 540 องศาเซลเซียสเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องย่างกับการย่างด้วยแรงงานคนผลลัพธ์ของการย่างแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความใกล้เคียงกัน

#### 4. บทสรุป

การทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถทำงาน และควบคุมสภาวะของการย่างได้ดี ชุดกลไกจับด้ามไม้สามารถทำงานได้ดังนี้ 1) จับด้ามไม้ของผลิตภัณฑ์ 2) ลำเลียงผลิตภัณฑ์ผ่านชุดให้ความร้อน 3) จุ่มผลิตภัณฑ์ลงในภาชนะบรรจุน้ำปรุงรสและ 4) ปลอ่ยผลิตภัณฑ์ลงบนภาชนะรองรับได้ ชุดกลไกจับด้ามไม้เสียบทำงานได้โดยไม่เกิดความผิดพลาดในการทำงานเมื่อทดลองย่างตัวอย่างผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ที่อุณหภูมิของการย่างเป็น 520-540 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่เป็น 1-1.27 เซนติเมตรต่อวินาทีพบว่าอุณหภูมิภายในของตัวอย่างมากกว่า 72 องศาเซลเซียส

เป็นไปตามข้อแนะนำของ USDA ตัวอย่างมีลักษณะสุกและมีคุณภาพสามารถรับประทานได้ และปลอดภัยจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องย่างสามารถนำเครื่องย่างไปใช้งานในระบบอุตสาหกรรมได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ประกอบการสนับสนุนทุนวิจัยโครงการบริษัทแปดคู่อิมมอ ร้อยจำกัดสำหรับการสนับสนุนผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้และเงินทุนในการออกแบบและพัฒนาเครื่องย่างแบบต่อเนื่องด้วยอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shilton, N., Mallikarjunan, P., Sheridan, P. (2002). Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, vol. 55, pp.217-222.
- [2] Arkadiusz Szterk. (2015). Heterocyclic aromatic amines in grilled beef: The influence of free amino acids, nitrogenous bases, nucleosides, protein and glucose on HAAs content. *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 40, pp.39-46
- [3] Joon-Goo Lee, Su-Yeon Kim, Jung-Sik Moon, Sheen-Hee Kim, Dong-Hyun Kang, Hae-Jung Yoon. (2016). Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chemistry*, vol. 199, pp.632-638
- [4] O. Viegas, P. Novo, E. Pinto, O. Pinho, I.M.P.L.V.O. Ferreira. (2012). Effect of charcoal types and grilling conditions on formation of heterocyclic aromatic amines (HAAs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled muscle foods. *Food and Chemical Toxicology*, vol. 50, pp.2128-2134.
- [5] Braeckman, L., F. Ronsse, P.C. Hidalgo and J. Pieters. (2009). Influence of combined IR-grilling and hot air cooking conditions on moisture and fat content, texture and colour attributes of meat patties. *Journal of Food Engineering*, vol. 93, pp.437-443.

[6] Toshiyuki Nakashimma. (1979). AUTOMATIC BARBEQUING DEVICE. *United States Patent*, US4158991.

[7] Cheung, Chun Kong lan, Kowloon and Hong Kong. (2003). Rotisserie Oven. *European Patent Office*, EP1306042A1.

[8] F. Erzincanli and J. M. Sharp. (1997). Meeting the need for robotic handling of food products. *Food Control*, vol. 8, pp.185-190.

[9] United States Department of Agriculture. (2013). Barbecue and food safety. URL: <http://www.usda.gov>, access on 11/04/2016.

[10]เกียรติศักดิ์รุ่งนพระแสง, เอกพงษ์ชีวิตโสภณและ ศุภเกียรติทองทับ. (2557). เครื่องอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ต่อเนื่องแบบหมุนวน. เลขที่คำขอสิทธิบัตร 1401003748. ระบบสืบค้นข้อมูลสิทธิบัตรออนไลน์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <https://www.ipthailand.go.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 11/04/2558.

[11] Joseph E. Shigley and Charles R.Mischke. (2001). *Mechanical engineering design, 6 th edition*, McGraw-Hill, New York.

[12] เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ.(2558). อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องอย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้, *การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 54*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.