



## การศึกษาการแทรกผ่านความร้อนในน้ำกะทิกระป๋องภายใต้สภาวะการเขย่าแบบไม่ต่อเนื่อง

สมัคร รักแม่และ หัสยา ตีรวีรขจร

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ผู้เขียนติดต่อ: สมัคร รักแม่ E-mail: krsamak@kmitl.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนของน้ำกะทิบรรจุกระป๋องภายใต้สภาวะเขย่าแบบไม่ต่อเนื่องเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งและสภาวะเขย่าอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลของการเขย่าแบบต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่า  $F_0$  และค่า  $f_n$  โดยน้ำกะทิที่ศึกษาถูกบรรจุในกระป๋อง 2 ขนาด คือ 307x409 (20 ออนซ์) และ 401x411 (30 ออนซ์) ทำการเขย่าทิศทางเดียวตามแนวอนความถี่ในการเขย่า 160 ครั้งต่อนาที แอมพลิจูดการเขย่า 1 เซนติเมตรและอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ 120 องศาเซลเซียสทำการทดลองทั้งหมด 6 สภาวะ คือ อยู่นิ่ง เขย่าอย่างต่อเนื่อง และเขย่าแล้วหยุดสลับกันอีก 4 สภาวะ คือ เขย่า 1 นาทีแล้วหยุดเป็นเวลา 2 4 5 และ 6 นาที ตามลำดับหรืออัตราส่วนการเขย่า 1:2 1:4 1:5 และ 1:6 นาที จากการทดลองพบว่าการเขย่าระหว่างการให้ความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำกะทิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เวลาการให้ความร้อนแก่น้ำกะทิจนค่า  $F_0$  เท่ากับ 5 นาที ในน้ำกะทิบรรจุในกระป๋อง 401x411 สภาวะอยู่นิ่งใช้เวลา 97.0 นาทีเขย่าอย่างต่อเนื่องใช้เวลา 23.5 นาทีเขย่าแล้วหยุดด้วยอัตราส่วน 1:2 1:4 1:5 และ 1:6 ใช้เวลา 24.5 36.0 39.5 และ 43.5 นาทีตามลำดับ ผลการทดลองของน้ำกะทิบรรจุกระป๋องขนาด 307x409 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในลักษณะเดียวกันแต่อุณหภูมิน้ำกะทิบรรจุกระป๋อง 307x409 สูงขึ้นได้เร็วกว่า ผลของการเขย่าแล้วหยุดด้วยช่วงเวลาที่ต่างกันพบว่าเมื่อเวลาในการหยุดเขย้านานขึ้นทำให้ต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนนานขึ้น โดยการเขย่าระหว่างการให้ความร้อนแก่น้ำกะทิทำให้ลดเวลาในการฆ่าเชื้อลงได้ประมาณ 2-4 เท่าขึ้นอยู่กับขนาดกระป๋องและอัตราส่วนการเขย่าและการเขย่าทำให้ค่า  $f_n$  ลดลงโดยมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเขย่าแบบต่อเนื่องและมีค่าสูงสุดในสภาวะอยู่นิ่ง

คำสำคัญ: การเขย่า; น้ำกะทิ; หม้อฆ่าเชื้อ; กระป๋อง

### 1. บทนำ

มะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งน้ำกะทิบรรจุกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์อีกประเภทหนึ่งที่นิยมนำมาแปรรูป โดยน้ำกะทิมีองค์ประกอบทางเคมีเมื่อคั้นโดยไม่เติมน้ำดังนี้ น้ำ 41.86% ไขมัน 44.60% โปรตีน 4.13% น้ำตาล 5.40% และเกลือแร่ 1.03% มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 6 เป็นอาหารกรดต่ำ (Low acid food) จึงต้องฆ่าเชื้อในระดับสเตอริไรต์ด้วยหม้อฆ่าเชื้อหรือการผลิตในระบบปลอดเชื้อ (aseptic process) ในการผลิตน้ำกะทิกระป๋องพบปัญหาที่สำคัญคือการแยกชั้นของน้ำกะทิเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดการแยก

เป็น 2 ชั้น คือชั้นที่มีน้ำหนักรวมมากเป็นของเหลว เป็นส่วนของหางน้ำกะทิและชั้นที่มีน้ำหนักรวมเบาเป็นครีมไขมันกะทิลอยอยู่ด้านบนเป็นส่วนของหัวน้ำกะทิ การแก้ปัญหาทำได้ด้วยการเติมสารให้ความคงตัว รวมทั้งทำการโฮโมจีไนส์ (Homogenization) แก่น้ำกะทิ เพื่อให้ไขมันในน้ำกะทิมีขนาดเล็กลงจนสามารถแขวนลอยในน้ำกะทิได้โดยไม่แยกชั้น

การให้ความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารกระป๋องพบว่าการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นภายในอยู่ 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการเกิดการนำและพาความร้อนร่วมกัน มีการศึกษาและหาวิธีเพิ่มอัตราการแทรกผ่านความร้อนด้วยการใช้หม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนเพื่อทำให้กระป๋องหมุนระหว่างการให้ความร้อน อาหาร

ในกระป๋องจึงเกิดการผสม [1] ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น รวมทั้งมีการศึกษาค่าดัชนีอัตราการให้ความร้อน (heating rate index) หรือค่า  $f_h$  ในหม้อฆ่าเชื้อแบบต่าง ๆ [2] เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในสถานะหมุนเปรียบเทียบกับในสถานะที่กระป๋องอยู่นิ่ง ซึ่งหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหม้อฆ่าเชื้อที่กระป๋องอยู่นิ่ง [3]

การให้ความร้อนในสถานะกระป๋องอยู่นิ่งนั้นจะเกิดจุดร้อนช้า (cold point) ขึ้นภายในกระป๋องหรือบรรจุภัณฑ์อื่น ๆ เนื่องจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิภายในและภายนอกกระป๋อง รวมทั้งอัตราการแทรกผ่านความร้อนที่ไม่รวดเร็วเพียงพอทำให้อุณหภูมิแตกต่างกันเกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่ กับสมบัติทางความร้อนและความหนืดของอาหาร หากอาหารนั้นมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน จุดร้อนช้าเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางกระป๋อง สำหรับอาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนจะเกิดการหมุนของอาหารส่วนที่เป็นของเหลวภายในกระป๋องซึ่งมีจุดร้อนช้าอยู่ ประมาณ 1/3 ของความสูงจากด้านล่างของกระป๋อง มีการพัฒนาระบบฆ่าเชื้อด้วยหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนด้วยการทำให้อาหารภายในกระป๋องเกิดการผสมระหว่างการหมุนส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนการให้ความร้อนด้วยหม้อฆ่าเชื้อแก่อาหารกระป๋องหรือภาชนะปิดสนิทเป็นการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ไม่ทำให้ผู้บริโภคเกิดอันตรายเป็นขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานความร้อนสูงและใช้เวลานาน เพราะหม้อฆ่าเชื้อส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นหม้อฆ่าเชื้อแบบกระป๋องอยู่นิ่งมีอัตราการแทรกผ่านความร้อนต่ำ ได้มีการพัฒนาหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแทรกผ่านความร้อนระหว่างการฆ่าเชื้อ

ปัจจุบันมีการศึกษาพัฒนาหม้อฆ่าเชื้อระบบเขย่าขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยยังไม่มี การใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมเพราะเป็นเทคโนโลยีใหม่ยังไม่มีข้อกำหนดของกระบวนการฆ่าเชื้อที่เป็นมาตรฐานรองรับ แต่มีแนวโน้มสูงมากที่จะนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต เนื่องจากการเขย่าช่วยให้อาหารผสมกันได้เร็วและทั่วถึงกว่าการหมุน กระป๋องด้วยหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุน เพิ่มอัตราการผลิตและ

ประหยัดพลังงาน แต่การศึกษาวิจัยการเขย่ากระป๋องในระหว่างการฆ่าเชื้อยังมีการศึกษาน้อยมากเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์สำหรับการศึกษาทดลอง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ดัดแปลงอุปกรณ์ติดตั้งกับหม้อฆ่าเชื้อทำให้เกิดการเขย่าขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเขย่าที่มีต่อการแทรกผ่านความร้อนในน้ำกะทิกระป๋องในสถานะการเขย่าต่าง ๆ รวมทั้งการเขย่าแล้วหยุดในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษาอัตราการแทรกผ่านความร้อนในน้ำกะทิ สำหรับการเขย่าแล้วหยุดระหว่างการให้ความร้อนนั้นเป็นประโยชน์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่สามารถทำการเขย่าอย่างต่อเนื่องได้อาจเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพหรือผลกระทบจากการเขย่าที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารจนไม่เป็นที่ยอมรับ การเขย่าแบบไม่ต่อเนื่องจึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและลดผลกระทบจากการเขย่าได้ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบที่มีต่อการแทรกผ่านความร้อนเป็นสำคัญ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้หม้อฆ่าเชื้อแบบสเปร์ย์น้ำของบริษัท KM Grand Pack จำกัด รุ่น KM-214SS โดยดัดแปลงให้ติดตั้งอุปกรณ์เขย่าเข้ากับหม้อฆ่าเชื้อโดยใช้แรงหมุนของมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ด้านนอกส่งกำลังผ่านแกนเพลลาเข้าไปด้านในหม้อฆ่าเชื้อทางช่องเปิดด้านข้าง เพื่อทำให้ตระกร้าด้านในเกิดการเคลื่อนที่ตามความถี่และระยะขจัดที่ต้องการ โดยใช้เครื่องปรับความเร็วรอบ (inverter) เพื่อควบคุมความเร็วรอบหรือความถี่ในการเขย่า

### 2.2 การเตรียมน้ำกะทิสำหรับบรรจุกระป๋อง

น้ำกะทิสำหรับบรรจุเตรียมจากหัวกะทิผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 2.5 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก เติมน้ำทำให้คงตัว CMC (Carboxy Methyl Cellulose) ที่ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ การทำโฮโมจิไนซ์นาน 10 นาที เพื่อให้กะทิเกิดความคงแล้วบรรจุลงในกระป๋อง 2 ขนาดคือ 307×409 (20 ออนซ์) และ 401×411 (30 ออนซ์) ให้มีช่องว่างเหนืออาหาร 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปไล่อากาศแล้วปิดฝา

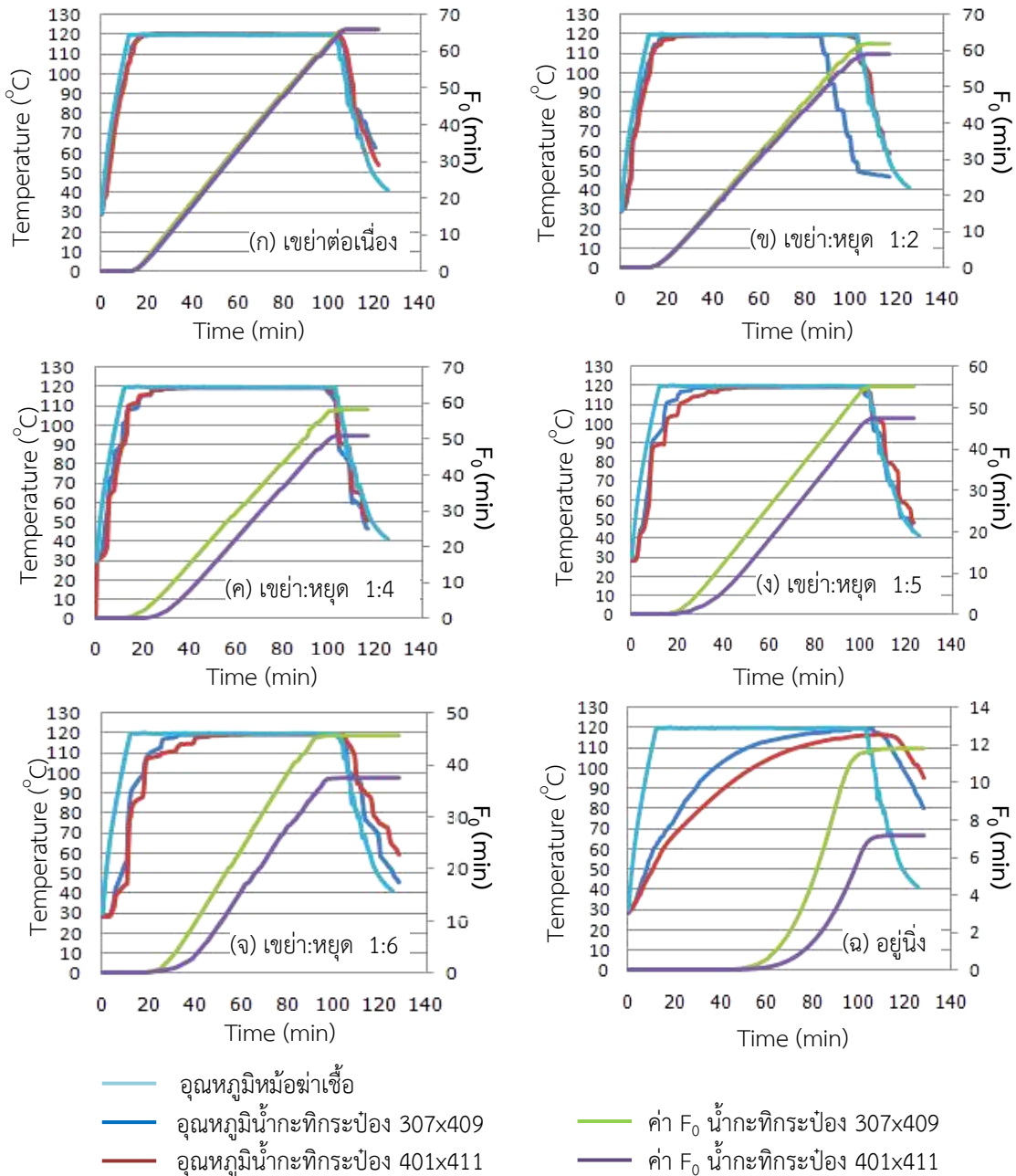
### 2.3 การวัดอุณหภูมิและค่า $F_0$

ทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิและค่า  $F_0$  ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิจี่ห้อ Ellab รุ่น CTF 9008 วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1/2 ของความสูงจากฐานกระป๋อง วางกระป๋องในตระกร้าในแนวนอน [4] ยึดกระป๋องกับตะกร้าเขย่าให้แน่น อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 120 องศาเซลเซียส

เตรียมกะทิบรรจุในกระป๋องทั้ง 2 ขนาด คือ 307x409 และ 401x411 ตัวอย่างละ 3 กระป๋อง ติดตั้งเข้ากับตะกร้าเขย่า ทำการทดลองในสภาวะกระป๋องอยู่นิ่ง เขย่าต่อเนื่อง

และเขย่าแล้วหยุดที่อัตราส่วนเขย่าต่อหยุด 1:2 1:4 1:5 และ 1:6 นาที ตามลำดับ

### 2.4 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่า  $F_0$  ของน้ำกะทิกระป๋องทั้งสองขนาดที่สภาวะต่าง ๆ

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการเขย่าที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋อง

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำกะทิบรรจุกระป๋องที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าการแทรกผ่านความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดของกระป๋อง คือน้ำกะทิบรรจุกระป๋อง 307x409 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วกว่าน้ำกะทิบรรจุกระป๋องขนาด 401x411 เนื่องจากกระป๋องขนาดเล็กเกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่จุดร้อนเข้าได้เร็วกว่ากระป๋องขนาดใหญ่ [5] อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำกะทิกระป๋องมีค่าสูงที่สุดในสภาวะการเขย่าแบบต่อเนื่อง และในสภาวะดังกล่าวอุณหภูมิภายในของน้ำกะทิกระป๋องทั้ง 2 ขนาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงเขย่าทำให้น้ำกะทิในกระป๋องเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงทำให้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน แต่สำหรับน้ำกะทิในสภาวะอัตราเขย่าแล้วหยุด ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิต่างกันมากขึ้นตามระยะเวลาที่หยุดเขย่าโดยที่สภาวะอยู่นิ่งน้ำกะทิมีอุณหภูมิต่างกันมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแสดงอุณหภูมิที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าลักษณะเส้นกราฟสภาวะเขย่าแล้วหยุดมีลักษณะกราฟคล้ายขั้นบันได คือเมื่อถูกเขย่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้าลงในสภาวะหยุดเขย่าเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อน้ำกะทิถูกเขย่าทำให้เกิดการผสมกันภายในกระป๋อง อัตราการแทรกผ่านความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อหยุดเขย่าทำให้อุณหภูมิน้ำกะทิบริเวณข้างกระป๋องกับบริเวณกึ่งกลางกระป๋องมีอุณหภูมิแตกต่างกันมากขึ้นตามเวลาที่หยุดเพราะการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ช้าลง อุณหภูมิภายในจึงเปลี่ยนแปลงได้ช้าลงในเวลานี้ ลักษณะดังกล่าวปรากฏชัดในสภาวะที่หยุดเป็นเวลานานและในกระป๋องขนาด 401x411

#### 3.2 ผลการเขย่าที่มีต่อค่า $f_h$ ของน้ำกะทิ

ค่าดัชนีอัตราการให้ความร้อน (heating rate index) หรือค่า  $f_h$  ในการเขย่าน้ำกะทิทั้ง 6 สภาวะแสดงในตารางที่ 1 พบว่ากระป๋อง 307x409 และ 401x411 เมื่อถูกเขย่าต่อเนื่องมีค่า  $f_h$  เท่ากับ 14.83 และ 15.64 นาทีตามลำดับ

ในขณะที่สภาวะอยู่นิ่งมีค่า 70.95 และ 94.23 นาที แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่อยู่นิ่ง  $f_h$  มีค่ามากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Berry et al. [6] ที่ทำการหาค่า  $f_h$  ของครีมข้าวโพดในหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนแล้วพบว่าค่า  $f_h$  มีค่าลดลงเมื่อถูกหมุนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นและ Garrote et al. [7] ได้ทดลองเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนภายในกระป๋อง พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามจำนวนการหมุนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเร็วขึ้นและส่งผลให้ค่า  $f_h$  ลดลงเมื่อถูกเขย่าบ่อยครั้งขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของขนาดกระป๋องต่อค่า  $f_h$  ที่อัตราเขย่าและหยุด 1:2 1:3 และ 1:4 ของกระป๋อง 307x409 และ 401x411 พบว่าค่า  $f_h$  ของกระป๋อง 401x411 มีค่ามากกว่าประมาณ 1 นาที แต่เมื่อหยุดเขย่ามากขึ้นคือที่อัตราการเขย่า 1:5 และ 1:6 ค่า  $f_h$  เริ่มต่างกันมากขึ้น เพราะน้ำกะทิในกระป๋องอยู่นิ่งนานขึ้นเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในบริเวณด้านข้างกระป๋องกับกลางกระป๋องมากขึ้น [4]

ตารางที่ 1 ค่า  $f_h$  ของน้ำกะทิบรรจุกระป๋องที่สภาวะต่าง ๆ (หน่วย: นาที)

สภาวะการทดลอง	ขนาดกระป๋อง	
	304x409	401x411
อยู่นิ่ง	70.95	94.30
เขย่าต่อเนื่อง	14.83	15.64
อัตราส่วนเขย่า:หยุด 1:2	16.07	17.63
อัตราส่วนเขย่า:หยุด 1:4	20.34	21.05
อัตราส่วนเขย่า:หยุด 1:5	21.02	31.68
อัตราส่วนเขย่า:หยุด 1:6	27.81	38.36

และเมื่อทำการเขย่าทำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำกะทิบริเวณด้านข้างกระป๋องกับกลางกระป๋องทำให้อุณหภูมิภายในมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า  $f_h$  และเวลาในหยุดเขย่าได้ดังสมการที่ 1 และ 2

กระป๋องขนาด 307x409:

$$\log f_h = (0.0650t_i + 1.1487); R^2 = 0.88 \quad (1)$$

กระป๋องขนาด 401x411:

$$\log f_h = (0.0425t_i + 1.1460); R^2 = 0.90 \quad (2)$$

เมื่อ  $f_h$  = ค่า heating index

$t_i$  = ระยะเวลาการหยุดเขย่า (นาที)

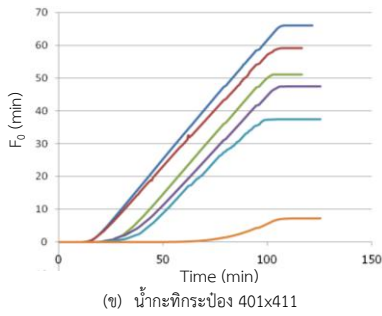
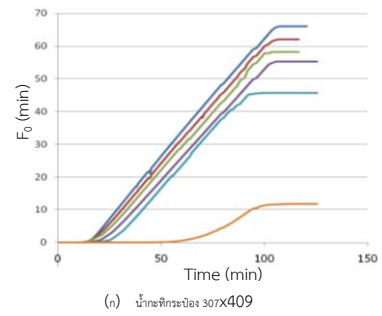
### 3.3 ผลการเขย่าที่มีต่อค่า $F_0$ ของน้ำกะทิ

เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า  $F_0$  ใน น้ำกะทิกระป๋องที่สภาวะการทดลองต่างๆ ของกระป๋องทั้ง 2 ขนาด เปรียบเทียบกันตามรูปที่ 2 พบว่าการเขย่าทั้ง แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องช่วยให้การแทรกผ่านความร้อนมี ค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากอาหารนั้นมีการถ่ายโอนแบบบังคับ การเขย่าทำให้อาหารภายในกระป๋อง มีการเคลื่อนที่และผสมกันทำให้การถ่ายโอนความร้อนเร็วขึ้น และในสภาวะที่เวลาในการหยุดเขย่าสั้นลงพบว่าการแทรกผ่านความร้อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการเขย่าแบบต่อเนื่อง เพิ่มขึ้นตามลำดับ

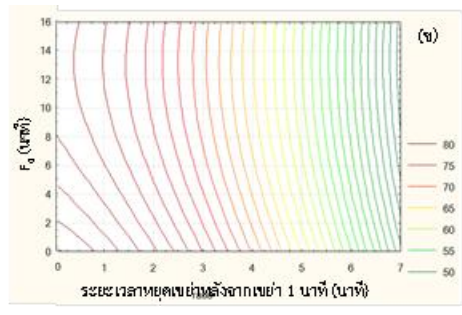
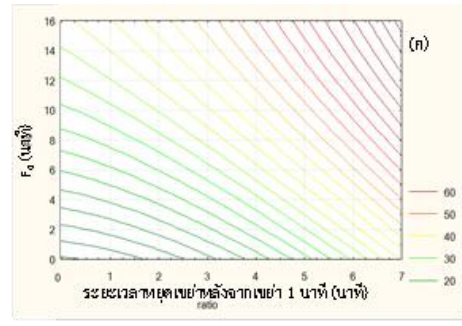
ระยะเวลาในการทำให้ค่า  $F_0$  เท่ากับ 5 นาที ของ น้ำกะทิกระป๋องขนาด 307x409 อัตราส่วนเขย่า 1:2 1:4 1:5 และ 1:6 ใช้เวลา 24.5 36.0 นาที 39.5 และ 43.5 นาที ตามลำดับ สภาวะอยู่นิ่งและเขย่าแบบต่อเนื่องใช้เวลา 97.0 และ 23.5 นาที เมื่อเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง การเขย่าด้วย อัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาการให้ความร้อนลดลง 75.77 เปอร์เซ็นต์และที่อัตราส่วนเขย่า 1:6 สามารถลดเวลาให้ ความร้อนลงได้ 55.15 เปอร์เซ็นต์

### 3.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฆ่าเชื้อ ค่า $F_0$ และช่วงเวลากระป๋องหยุดเขย่า

ข้อมูลจากการทดลองนำมาสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้ความ ร้อนเพื่อฆ่าเชื้อ ตามค่า  $F_0$  ที่ต้องการและระยะเวลากระป๋อง หยุดนิ่งหลังจากเขย่า 1 นาที โดยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ดังกล่าวแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่า  $F_0$  ที่สภาวะเขย่าต่าง ๆ



(ก) น้ำกะทิกระป๋องขนาด 307x409  
(ข) น้ำกะทิกระป๋องขนาด 401x411

รูปที่ 3 เวลาในการฆ่าเชื้อ (หน่วย: นาที) ที่ค่า  $F_0$  และอัตราส่วนเวลา เขย่าต่าง ๆ

น้ำกะทิกระป๋องขนาด 307x409:  

$$t = 14.303 - (0.642t_1) + (1.693F_0) + (0.367t_1^2) + (0.039t_1F_0) - (0.022F_0^2); R^2 = 0.95 \quad (1)$$



น้ำกะทิกระป๋องขนาด 401x411:

$$t = 13.660 + (0.690t_i) + (1.973F_0) + (0.405t_i^2) + (0.0796t_i F_0) - (0.038F_0^2); R^2 = 0.95 \quad (2)$$

เมื่อ  $t$  = เวลาในการให้ความร้อนถึงค่า  $F_0$   
(นาที)  $t_i$  = ระยะเวลาการหยุดเขย่า (นาที)  
 $F_0$  = ค่า  $F_0$  ที่ต้องการ (นาที)

สมการดังกล่าวใช้สำหรับทำนายเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำกะทิกระป๋องในสถานะเขย่า 1 นาทีแล้วหยุดที่เวลาในช่วงเวลา 0-6 นาที ที่ค่า  $F_0$  ตามต้องการ จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การเขย่าระหว่างการให้ความร้อนทำให้อัตราการแทรกผ่านความร้อนในน้ำกะทิกระป๋องสูงขึ้น และการเขย่าแบบไม่ต่อเนื่องขณะเขย่าเชื้อในน้ำกะทิกระป๋องสามารถลดระยะเวลาการฆ่าเชื้อลงได้ถึง 2-4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะอยู่นิ่ง โดยน้ำกะทิกระป๋องขนาด 401x411 เวลาในการให้ความร้อนมากกว่าน้ำกะทิกระป๋องขนาด 307x409 การหยุดเขย่าด้วยช่วงเวลานานขึ้นทำให้อัตราการแทรกผ่านความร้อนลดลง การเขย่าแบบต่อเนื่องใช้เวลาในการให้ความร้อนสั้นที่สุดแต่การเขย่าแล้วหยุดที่อัตราส่วน 1:6 ก็ลดเวลาในการให้ความร้อนลงได้ประมาณ 50% และเมื่อเปรียบเทียบกับกรเขย่าแบบต่อเนื่องที่ค่า  $F_0$  ต่ำกว่า 10 นาที เวลาในการให้ความร้อนก็แตกต่างกันเพียง 10-20 นาทีเท่านั้น จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากที่นำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่อนุญาตให้ติดตั้งชุดอุปกรณ์เขย่าสำหรับการทดลอง บริษัท รอยแลคแคนอินดัสทรีส์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อกระป๋องที่ใช้ในการทดลอง นางสาวสัณฐิตา ศิริเชตรและ

นางสาวณพศ อาชาวพรสำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Anantheswaran, R. C. and Rao, M. A. (1985). Heat transfer to model non-Newtonian fluid foods in cans during end-over-end rotation, *Journal of Food Engineering*, Vol. 4(1), pages 21-35.
- [2] Dwivedi, M and Ramaswamy, HS. (2010). Comparison of heat transfer rates during thermal processing under end-over-end and axial modes of rotation, *LWT-Food Science and Technology*, Vol 43(2), March 2010, pages 350-360.
- [3] Tattiyakul J, Rao MA, Datta AK. (2001). Simulation of heat transfer to a canned corn starch dispersion subjected to axial rotation, *Chem Eng Process*, Vol. 40, pages 391-399.
- [4] Price, R.B. and Bhowmik, S.R. (1994). Heat transfer in canned foods undergoing agitation, *Journal of Food Engineering*, Vol. 23, pages 621-629.
- [5] Meng, Y. and Ramaswamy, HS. (2006). Heat transfer to canned particulates in high viscosity Newtonian fluids during agitation processing, *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 30(6), December 2006, pages 643-658.
- [6] Berry, M. R., Savage, R. A. and Pflug, I. J. (1979). Heating characteristics of cream-style corn processed in a steritort: effects of headspace reel speed and consistency, *Journal of Food Science*, Vol.44, pages 831-835. Vol. 44(3), May 1979, pages 831-835.



- [7] Garrote, R. L. Silva, E. R. Roa, R. D. Bertone, R. A. (2006). Heat transfer coefficients to canned green peas during end-over-end sterilization, *International Journal of Food Science & Technology*, Vol. 41(9), November 2006, pages 1016–1022.