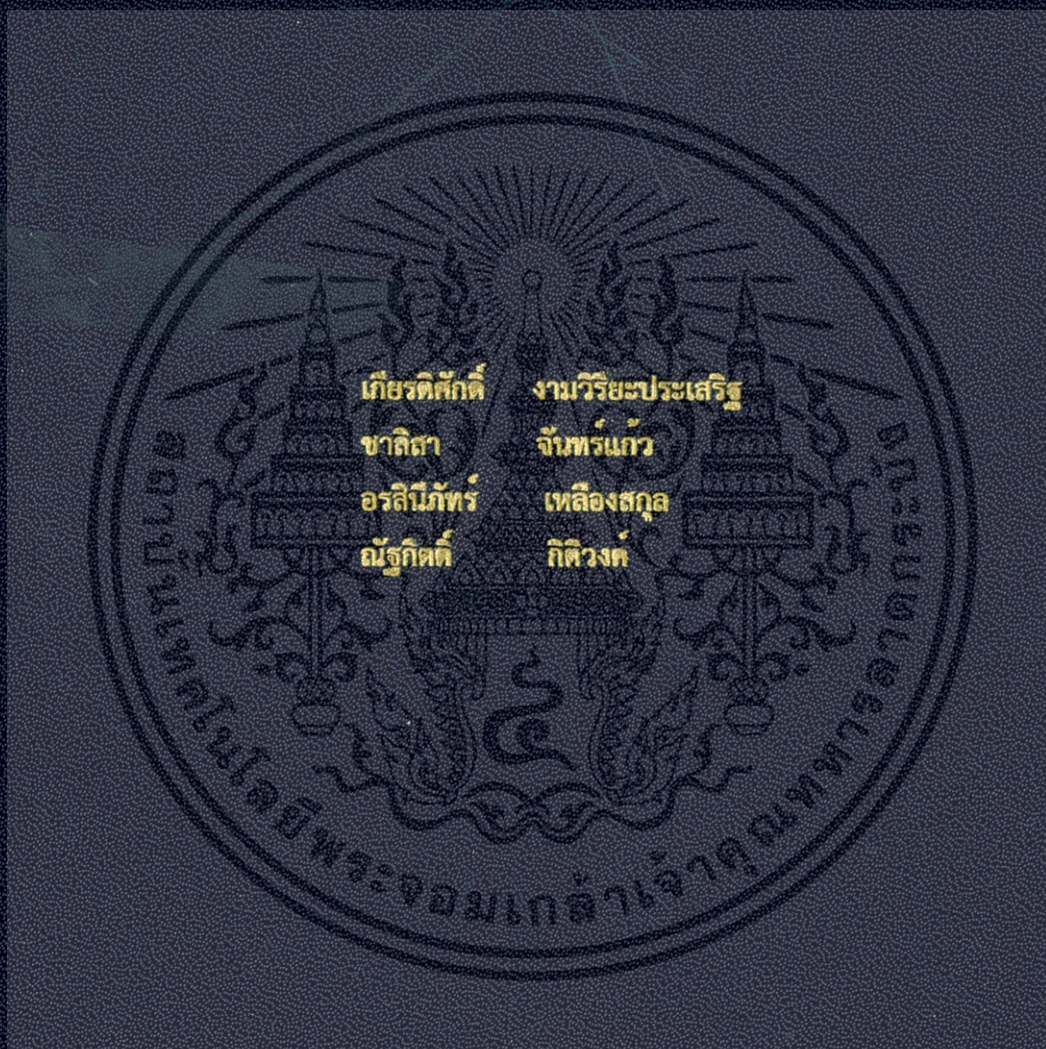


ผลกระทบของการสั่นสะเทือนระหว่างการให้ความร้อนในภาชนะปิดสนิท
Effect of vibration during thermal process in hermetically sealed container



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

ผลกระทบของการสั่นสะเทือนระหว่างการให้ความร้อนในภาชนะปิดสนิท
Effect of vibration during thermal process in hermetically sealed container



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of vibration during thermal process in hermetically
sealed container



THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF FOOD ENGINEERING
DEPARTMENT OF FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลกระทบของการสั่นสะเทือนระหว่างการให้ความร้อนในภาชนะปิดสนิท

Effect of vibration during thermal process in hermetically sealed container

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------------|-------------------|----------|
| 1. นายเกียรติศักดิ์ | งามวิริยะประเสริฐ | 54010133 |
| 2. นางสาวชาลิสา | จันทร์แก้ว | 54010328 |
| 3. นางสาวอรสินีภัทร์ | เหลือองสกุล | 54010359 |
| 4. นายณัฐกิตติ์ | กิตติวงศ์ | 54010392 |



(อาจารย์ สมัคร รักแม่)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ผลกระทบของการสันสะเทือนระหว่างการให้ความร้อนในภาชนะปิดสนิท	
นักศึกษา	นายเกียรติศักดิ์	งามวิริยะประเสริฐ
	นางสาวชาลิสา	จันทร์แก้ว
	นางสาวอรสิณีภัทร์	เหลืองสกุล
	นายณัฐกิตต์	กิตติวงศ์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร	
	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์	
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ สมัคร รักแม่	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการสันสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อนในภาชนะปิดสนิทระหว่างการให้ความร้อนในหม้อฆ่าเชื้อ โดยศึกษาการแทรกผ่านความร้อนระหว่างสภาวะกระป๋องอยู่นิ่ง และสภาวะที่เกิดการสันสะเทือน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการสันสะเทือนด้วยระบบนิวแมติก ใช้แรงดันลม 3 ระดับ ได้แก่ 4 5 และ 6 บาร์ ทำให้เกิดการสันสะเทือนทั้ง 3 แนวแกน โดยมีความถี่ 111 138 และ 168 เฮิร์ตซ์ และแอมพลิจูด 5 7 และ 8 มิลลิเมตรตามลำดับ การทดลองใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 3 ระดับได้แก่ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นตัวแทนของอาหารที่มีความหนืดระดับต่างๆ โดยมี บรรจุในกระป๋อง 2 ขนาด ได้แก่ 307x409 ความจุ 20 ออนซ์ และ 401x411 ความจุ 30 ออนซ์ ช่องว่างเหนืออาหาร 1 เซนติเมตร และ อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ 121 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาการให้ความร้อนจนค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที ผลการวิจัยพบว่า การสันสะเทือนด้วยความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ ทำให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักบรรจุกระป๋อง ขนาด 30 ออนซ์ ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อลดลงจาก 22.5 25.0 29.50 นาที เหลือเวลา 20.0 21.0 และ 21.5 นาที ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง พบว่าการสันสะเทือนระหว่างการให้ความร้อนช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนลงได้ตั้งแต่ 11.11 ถึง 27.11 เปอร์เซ็นต์ และลดลง 11.90 ถึง 22.22 เปอร์เซ็นต์ ในกระป๋องขนาด 20 ออนซ์

คำสำคัญ ; การสันสะเทือน, การแทรกผ่านความร้อน

Thesis Title	Effect of vibration during thermal process in hermetically sealed container	
Students	Mr. Kiattisak	Ngamviriyaprasert
	Miss Chalisa	Jankeaw
	Miss Onsineephat	Leangsakul
	Mr. Nattakit	Kitiwong
Thesis for	Bachelor's Degree in Food Engineering	
	Department of Food Engineering	
	Faculty of Engineering	
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Year	2014	
Advisor	Mr. Samak	Rakmae

ABSTRACT

This project was to study effect of vibration during thermal process in hermetically sealed container. We focus on heat penetration in static and vibrating container. Set up of pneumatic vibrator to vibrate 3 levels (4, 5 and 6 bar) at 3 frequencies (111, 138 and 168 Hz.) and 3 amplitudes (5, 7 and 8 mm.), respectively. Syrup was represented concentrate food (20, 40 and 60 % by weight) contained in 2 sizes of can (307 x 409; 20 oz and 401 x 411; 30 oz) head space 1 cm and retort temperature was 121 °C and process time required to achieve lethality of 6 minutes. The results indicated that vibration at 168 Hz decreased sterilizing time of 30 onz (20, 40 and 60%) from 22.5, 25.0 and 29.5 minutes to 20.0, 21.0 and 21.5 minutes, respectively. Moreover when compared the results with static container found that vibration effect during thermal process reduced heating time to $F_0 = 6$ about 11.11 – 27.11 % and about 11.90 -22.22 % in 20 oz container.

Keywords; vibration, heat penetration, thermal process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมอาหารและให้ความรู้แนวทางการแก้ไขปัญหาและบุคลากรทุกฝ่ายของภาควิชาวิศวกรรมทางผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์ สมัคร รักแม่ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและคำแนะนำในแนวทางต่างๆในการทำงานรวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดจนการดูแลเอาใจใส่และยังให้แนวคิดต่างๆเพื่อเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในโครงการครั้งนี้

คุณอำนาจ คุณตะคุ ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือคำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ตลอดจนระยะเวลาในการทำโครงการ

คุณวราภรณ์ มากไพศาล นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในการยื่นอุปกรณ์และคำแนะนำในการทดลองโครงการครั้งนี้

เพื่อนๆนักศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาเป็นอย่างยิ่งที่ให้ความสนับสนุนและให้คำปรึกษาและให้กำลังใจพร้อมทั้งทุกคนในครอบครัวที่ช่วยให้กำลังใจและแก้ไขปัญหาในทุก ๆ ด้านตลอดมา

คณะผู้วิจัย

นายเกียรติศักดิ์	งามวิริยะประเสริฐ
นางสาวชาลิสา	จันทร์แก้ว
นางสาวอรสินีภัทร์	เหลื่องสกุล
นายณัฐกิตติ์	กิตติวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร	4
2.2 อาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิท	5
2.3 กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง	6
2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	6
2.3.2 การลวกด้วยน้ำร้อน	6
2.3.3 การบรรจุ	6
2.3.4 การไล่อากาศ	6
2.3.5 ปิดผนึกสนิท	6
2.3.6 การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน	6
2.3.7 การทำให้เย็น	6
2.3.8 การปิดฉลากบรรจุหีบห่อ	7
2.4 หลักการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง	7
2.4.1 การใช้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์	7
2.4.1.1 Low temperature long time (LTLT)	7
2.4.1.2 High temperature short time (HTST)	7
2.4.2 การสเตอริไลซ์	7
2.5 ผลของความร้อนต่อเชื้อจุลินทรีย์	8
2.6 การคำนวณเวลาในการฆ่าด้วยความร้อน	10
2.6.1 General method	10
2.6.2 Formula method	10
2.7 ความหนืดคุณลักษณะของของไหล	13
2.8 ลักษณะการไหลของของไหล	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 Newtonian fluid	14
2.8.2 Non Newtonian fluid	14
2.8.2.1 Pseudo plastic fluid	14
2.8.2.2 Dilatant fluid	14
2.8.2.3 Bingham plastic fluid	15
2.8.2.4 Plastic fluid	15
2.9 อัตราการแทรกผ่านความร้อน	16
2.9.1 องค์ประกอบและคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหาร	16
2.9.2 ขนาดของบรรจุภัณฑ์	17
2.9.3 การหมุนกระป๋องในแนวนอน	17
2.9.4 อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ	17
2.9.5 รูปร่างของบรรจุภัณฑ์	17
2.9.6 ชนิดของบรรจุภัณฑ์	17
บทที่ 3 หม้อฆ่าเชื้อ	19
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อฆ่าเชื้อ	19
3.2 การแบ่งลักษณะของหม้อฆ่าเชื้อ	19
3.2.1 หม้อฆ่าเชื้อที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่อง	19
3.2.1.1 การแบ่งตามลักษณะการจัดวางตัว	19
3.2.1.2 การแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของบรรจุภัณฑ์ภายใน	20
3.2.1.3 การแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	20
3.2.2 หม้อฆ่าเชื้อที่มีการทำงานต่อเนื่อง	21
3.2.3 หม้อฆ่าเชื้อแบบไอน้ำ	22
3.2.4 หม้อฆ่าเชื้อแบบเขย่าไม่ต่อเนื่อง	22
3.3 ส่วนประกอบของหม้อฆ่าเชื้อ	23
3.3.1 ท่อไอน้ำเข้า	23
3.3.2 วาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติ	23
3.3.3 ท่อไอน้ำเดี่ยว	23
3.3.4 ท่ออัดอากาศสำหรับควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ	23
3.3.5 อุปกรณ์กรองอากาศ	23
3.3.6 อุปกรณ์วัดความดัน	24
3.3.7 ท่อระบายน้ำ	24
3.3.8 ท่อน้ำเข้า	24
3.3.9 ท่อกระจายไอน้ำ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.10 ที่รองรับตะกร้าหรือตะแกรงใส่อาหารกระป๋อง	24
3.3.11 กำบังน้ำเข้า	24
3.3.12 ช่องระบายไอน้ำหรือระบายไอน้ำ	24
3.3.13 เทอร์โมมิเตอร์	25
3.3.14 มาตรการวัดความดัน	25
3.3.15 วาล์วนิรภัย	25
3.3.16 ท่อน้ำล้น	25
3.3.17 ท่อใส่อากาศ	25
3.3.18 เครื่องควบคุมและบันทึกอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อ	26
3.3.19 อุปกรณ์ส่งสัญญาณวัดอุณหภูมิ	26
3.3.20 ท่อลมเข้า	26
3.4 หลักการถ่ายเทความร้อน	26
3.4.1 การนำความร้อน	26
3.4.2 การพาความร้อน	26
3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน	27
บทที่ 4 การสิ้นสະเทือน	28
4.1 การสิ้นสະเทือน	28
4.1.1 ที่มาของการสิ้นสະเทือน	28
4.1.2 หลักการสิ้นสະเทือนของเครื่องสิ้นสະเทือนด้วยลม	28
4.2 รูปแบบการสิ้นสະเทือน	29
4.2.1 การสิ้นสະเทือนโดยอิสระ	29
4.2.2 การสิ้นสະเทือนแบบขนกัน	29
4.2.3 การสิ้นสະเทือนจากแรงเสียดทาน	30
4.3 ตัวแปรพื้นฐานที่ใช้วัดแรงสิ้นสະเทือน	30
4.3.1 ความถี่	30
4.3.2 การวัดระยะทางของการสิ้นสະเทือน	30
4.3.3 การวัดความเร็ว	30
4.3.4 การวัดอัตราเร่ง	30
4.4 การวิเคราะห์การสิ้นสະเทือน	31
บทที่ 5 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง	32
5.1 วัสดุและอุปกรณ์	32
5.1.1 วัสดุดิบ	32
5.1.2 อุปกรณ์	32
5.2 ขั้นตอนการทดลอง	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.1 วัตถุประสงค์	32
5.1.2 อุปกรณ์	32
5.2 ขั้นตอนการทดลอง	34
5.2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำเชื่อม	34
5.2.2 การหาค่าความหนืด	34
5.2.3 วิธีการทดลอง	34
5.2.4 หลักการวัดการสั่นสะเทือน	39
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์	40
6.1 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน	40
6.2 ผลของระดับการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน	47
6.3 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อค่า F_0	61
6.4 ผลของระดับการสั่นสะเทือน ที่มีผลต่อค่า F_0	66
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	78
7.1 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน	78
7.2 ผลของความถี่การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน	78
7.3 ผลของความเข้มข้นที่มีต่อค่าเวลาเป็นนาทีที่มีใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6	78
7.4 ผลของความถี่การสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6	78
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	81

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
4.1 ตารางแสดงการเลือกใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือน	31
5.1 คุณสมบัติของเครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม (Pneumatic vibrator) รุ่น GT-8	32
5.2 คุณสมบัติของท่อลมทนความร้อน	34
5.3 ค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อม	34
5.4 ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม	35
5.5 ความถี่ และ แอมพลิจูด ของการสั่นสะเทือน ที่ความดันลมในระดับต่าง ๆ	39
6.1 แสดงค่า f_h ครอบงำขนาด 20 ออนซ์	52
6.2 แสดงค่า f_h ครอบงำขนาด 30 ออนซ์	52
6.3 แสดงค่า j_h ของครอบงำขนาด 20 ออนซ์	56
6.4 แสดงค่า j_h ของครอบงำขนาด 30 ออนซ์	56
6.5 แสดงเวลาเป็นนาฬิกาของน้ำเชื่อมที่ค่า F_0 เท่ากับ 6	73
6.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของเวลาที่เร็วขึ้นที่ค่า F_0 เท่ากับ 6	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	12
2.2 แสดงการเกิด velocity gradient เมื่อมีแรงมากระทำในแนวขนานกับพื้นผิวของของไหล	14
2.3 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว	15
2.4 การวัดที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในอาหารกระป๋องที่บรรจุอาหารแข็งและเหลว และลักษณะของอุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำที่สุด	18
3.1 หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวตั้ง	19
3.2 หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวนอน	20
3.3 ส่วนประกอบของหม้อฆ่าเชื้อ	23
4.1 กราฟแสดงรูปคลื่นการเคลื่อนที่ของลูกบอลที่ติดกับสปริง	28
4.2 การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร	29
4.3 การสั่นสะเทือนแบบชนกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน	29
4.4 การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน	30
5.1 เครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม รุ่น GT-8	32
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) น้ำตาลทรายขาว (ข) เครื่องวัดแรงสั่นสะเทือน (ค) กระจกป้องกันขนาด 307×409 (ง) กระจกป้องกันขนาด 401×411 (จ) อุปกรณ์ปรับความดัน (ฉ) เครื่อง Data logger รุ่น Ellab CTF 9008	33
5.3 ท่อลมทนความร้อน	34
5.4 การวัดความหนืดของน้ำเชื่อม	35
5.5 ตำแหน่งการเจาะรูกระจกป้องกันขนาด 307×409 และ 401×411	35
5.6 การปิดฝากระจกป้องกันด้วยเครื่องปิดฝากระจกป้องกัน	36
5.7 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเข้าในหม้อรีทอร์ท	36
5.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องสั่นสะเทือน	37
5.9 แสดงตำแหน่งการต่อท่อลมเข้ากับหม้อรีทอร์ท	37
5.10 ตำแหน่งการวางกระจกป้องกันภายในหม้อรีทอร์ท	38
5.11 แสดงหน้าจอการตั้งค่าอุณหภูมิและความดันของหม้อฆ่าเชื้อ	38
5.12 การติดตั้งเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน	39
6.1 ลักษณะของผิวหน้าของของเหลวที่มีการสั่นสะเทือนในระดับต่างๆ	40
6.2 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่สภาวะอยู่นิ่ง กระจกป้องกันขนาด 20 ออนซ์	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 20 ออนซ์	42
6.4 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 20 ออนซ์	43
6.5 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 20 ออนซ์	44
6.6 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่สภาวะอยู่นิ่ง กระจบองขนาด 30 ออนซ์	44
6.7 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 30 ออนซ์	45
6.8 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 30 ออนซ์	46
6.9 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ กระจบองขนาด 30 ออนซ์	47
6.10 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 20 ออนซ์	48
6.11 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 20 ออนซ์	48
6.12 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 20 ออนซ์	49
6.13 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 30 ออนซ์	50
6.14 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 30 ออนซ์	50
6.15 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจบองขนาด 30 ออนซ์	51
6.16 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระจบองขนาด 20 ออนซ์	53
6.17 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระจบองขนาด 20 ออนซ์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.18 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	54
6.19 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	55
6.20 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	57
6.21 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	58
6.22 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	59
6.23 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	60
6.24 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่สภาวะอยู่นิ่ง กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	61
6.25 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 111 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	62
6.26 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 138 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	62
6.27 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 168 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	63
6.28 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่สภาวะอยู่นิ่ง กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	64
6.29 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 111 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	64
6.30 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 138 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	65
6.31 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 168 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	66
6.32 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	67
6.33 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	68
6.34 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่างๆของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์	69
6.35 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่างๆของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 30 ออนซ์	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.36 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่างๆของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 30 วินาที	71
6.37 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่างๆของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 30 วินาที	72
6.38 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ เวลาเป็นนาที ที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ระยะเวลา 20 วินาที	74
6.39 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่าเวลาเป็นนาที ที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ระยะเวลา 20 วินาที	75
6.40 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ เวลาเป็นนาที ที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ระยะเวลา 30 วินาที	76
6.41 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และเวลาเป็นนาที ที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ระยะเวลา 30 วินาที	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารมีเติบโตและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตอาหารกระป๋องเป็นส่วนหนึ่งที่ได้รับคามนิยมจากคนทั่วโลก เนื่องจากมีอายุการเก็บรักษาได้นาน และสะดวกต่อการบริโภค รวมถึงมีความหลากหลายของอาหารหลายประเภท ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค

กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง เป็นอีกวิธีหนึ่งในการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด การผลิตอาหารกระป๋องเป็นวิธีหนึ่งที่ยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น เนื่องจากกระป๋องสามารถปกป้องอาหารจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์และปัจจัยเสื่อมเสียอื่นๆ และมีการแพร่หลายภายในอุตสาหกรรมอาหารโดยจะทำการฆ่าเชื้อด้วยหม้อฆ่าเชื้อ (Retort) ซึ่งปัจจุบันหม้อฆ่าเชื้อส่วนใหญ่เป็นหม้อฆ่าเชื้อแบบอยู่นิ่ง แต่ได้มีการคิดค้นและพัฒนาหม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนและหม้อฆ่าเชื้อเขย่าขึ้น เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการแทรกผ่านความร้อนให้สามารถเข้าไปถึงจุดร้อนซ้ำได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง รวมถึงลดระยะเวลาในการให้ความร้อนลงด้วย

คณะผู้จัดทำจึงได้ทำออกแบบ ปรับปรุงและดัดแปลงหม้อฆ่าเชื้ออยู่นิ่งชนิดละอองน้ำพ่นฝอย ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่บริเวณตะแกรงที่ใช้ใส่อาหารกระป๋อง โดยใช้อุปกรณ์สั่นสะเทือนแบบนิวแมติกเป็นอุปกรณ์สร้างการสั่นสะเทือน

ผลจากการศึกษาดังกล่าว จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนต่อการแทรกผ่านความร้อน ช่วยลดระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่อาหาร ซึ่งจะเป็นการช่วยให้อาหารยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการ เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อนในภาชนะปิดสนิทระหว่างการให้ความร้อน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการถ่ายแทรกผ่านความร้อนในภาชนะปิดสนิท
2. เป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อลดระยะเวลาในการผลิต และลดการใช้พลังงาน

1.4 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อนในภาชนะปิดสนิทระหว่างการให้ความร้อน โดยการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการทดลอง มีปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ

1. ระดับการสั่นสะเทือน ที่ 0 111 138 168 เฮิรตซ์

2. ขนาดของภาชนะปิดสนิท ครอบขนาด 307×409 และ 401×411
3. ความหนืดของน้ำเชื่อม ที่ความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. ช่องว่างเหนืออาหาร 1 เซนติเมตร

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมธิธา ถาวรสุขศิริ และคณะ (2550) [1] ได้ศึกษาเรื่องอิทธิพลของการเขย่าที่มีต่อการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องขณะฆ่าเชื้อ โดยใช้สารละลายเบนโทไนด์ ที่มีความเข้มข้น 0 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ศึกษาเกี่ยวกับการเขย่าที่ความถี่ 5 ระดับ คือ 0 160 230 310 และ 380 ครั้งต่อ นาที พบว่าผลเวลาเป็นนาทีของสารละลายเบนโทไนด์ที่ค่า F_0 เท่ากับ 6 สารละลายเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความถี่ในการเขย่าสามารถลดเวลาในการฆ่าเชื้อที่ค่า F_0 เท่ากับ 6 ลงได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับสารละลายเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้นอื่นๆ และจากการศึกษาผลของการเขย่าต่อการกระจายความร้อนในกระป๋องที่ตำแหน่ง 1/2 1/3 และ 1/6 จากความสูงที่ฐานกระป๋อง พบว่าตำแหน่งที่มีการแทรกผ่านความร้อนน้อยที่สุดคือ 1/3 ซึ่งก็คือจุดร้อนช้าของสารละลายเบนโทไนด์

Ali และคณะ (2006) [5] ศึกษากระบวนการทางความร้อนของอาหารที่บรรจุในรีโอร์ทเพาซ์ โดยใช้ปลาทูน่าในน้ำมันบรรจุในรีโอร์ทเพาซ์ ขนาด 20 × 17 เซนติเมตร ใช้หม้อฆ่าเชื้อแบบหมุนภายใต้สภาวะการหมุนที่ต่างกันคือ ความเร็วรอบ 0 2 4 และ 6 รอบต่อนาที และกำหนดค่า F_0 เท่ากับ 10 นาที จากการผลการศึกษาพบว่า ค่า f_h มีค่าลดลงเมื่อมีการหมุนด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น โดยที่สภาวะอยู่หนึ่ง ค่า f_h เท่ากับ 27.76 นาที และที่การหมุนด้วยความเร็วรอบ 6 รอบต่อนาที มีค่า f_h เท่ากับ 10.00 นาที ซึ่งช่วยลดค่า f_h ลงได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบค่า F_0 เดียวกัน การหมุนด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการให้ความร้อนลดลงได้ด้วย เนื่องจากของเหลวในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน อนุภาคหรือของเหลวในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่ผสมกันทำให้การแทรกผ่านความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการวางกระป๋องอยู่หนึ่ง

Anubhav และ คณะ (2014) [6] ได้ศึกษาผลกระทบของการเขย่าในหม้อฆ่าเชื้อแบบเขย่า โดยใช้สารละลายกลีเซอรินความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และใช้ช้อนนุกาในลอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร แทนอนุภาคอาหาร บรรจุลงในกระป๋อง 307 × 409 ช่องว่างเหนืออาหาร 1 เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ 110 ถึง 130 องศาเซลเซียส ความถี่ 0 ถึง 4 เฮิร์ตซ์ และระยะเวลาการกระจัด 5 ถึง 25 เซนติเมตร จากการศึกษพบว่า เวลาที่ใช้ในการถึงอุณหภูมิจุดร้อนช้าลดลงได้ 52 ถึง 87 เปอร์เซ็นต์ และเวลาในการฆ่าเชื้อที่ F_0 เท่ากับ 10 นาที ลดลงจาก 45 นาทีเหลือเพียง 17 ถึง 24 นาที เมื่อเทียบกับสภาวะอยู่หนึ่ง

Dwivedi และ Ramaswamy (2010) [7] ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรต่างๆ คือ ลักษณะการหมุนของหม้อฆ่าเชื้อ ความเร็วรอบของการหมุน อุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อ และความเข้มข้นของสารละลาย ที่มีผลกระทบต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยใช้สารละลายกลีเซอรินที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร บรรจุในกระป๋องขนาด 307 × 409 อุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ 111.6 ถึง 128.4 องศาเซลเซียส และความเร็วในการหมุน 0 ถึง 20 รอบต่อนาที จากผลการ

ทดลองพบว่า ค่า $f_{h,jh}$ และ C_p/F_0 มีค่าลดลง แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบในการหมุน และอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ เพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าลดลงเมื่อ ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทั้งการหมุนแบบทั่วถึง และการหมุนตามแนวแกน

Meng และ Ramaswamy (2006) [8] ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนของหม้อฆ่าเชื้อ อุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ ความเข้มข้นของสารละลาย ขนาดอนุภาค และขนาดกระป๋องที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการหมุนแบบทั่วถึง ในการทดลองใช้สารละลายกลีเซอรินที่มีความหนืดสูงบรรจุในกระป๋อง โดยมีความเข้มข้น 75 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการหมุน อุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ และความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย และขนาดกระป๋องเพิ่มขึ้น

Meng และ Ramaswamy (2007) [9] ศึกษาผลกระทบของ ความเร็วรอบในการหมุน ความหนืดของสารละลาย ความหนาแน่นของอนุภาค อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ และขนาดกระป๋อง ภายใต้สภาวะการหมุนแบบทั่วถึง ซึ่งในการทดลองจะใช้อนุภาคของโพลีโพรพิลีน ไนลอน และ เทฟลอน เพื่อเลียนแบบอนุภาคอาหารในสารละลาย C.M.C (Carboxymethyl cellulose) ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับอนุภาคภายในกระป๋อง จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบในการหมุน ความหนาแน่นของอนุภาค และอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง เมื่อความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น และขนาดกระป๋องลดลง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพอาหาร ทั้งในด้านกลิ่น สี รสชาติ และความอร่อยให้คงอยู่จนกระทั่งถึงมือผู้บริโภค ทั้งยังช่วยให้การขนส่งผลิตภัณฑ์มีความสะดวกมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการส่งเสริมการตลาด บรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบสวยงามสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และใช้เป็นตัวโฆษณาได้ด้วยตัวเอง การใช้ภาชนะบรรจุจะขึ้นอยู่กับบรรจุภัณฑ์ที่สำคัญ คือ บรรจุภัณฑ์ในภาชนะบรรจุก่อนแล้วจึงนำไปทำให้ปราศจากเชื้อหรืออาหารที่ผ่านกระบวนการถนอมอาหารต่าง ๆ แล้วจึงนำมาบรรจุเพียงอย่างเดียว ซึ่งพอจะแบ่งอาหารออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 6 กลุ่ม ตามลักษณะอาหารและการใช้ภาชนะบรรจุ ดังนี้

1. อาหารที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนหลังบรรจุ
2. อาหารแห้ง
3. อาหารแช่เย็นและแช่เยือกแข็ง
4. อาหารฉายรังสี
5. อาหารสด
6. อาหารเหลวบรรจุในสภาพปลอดเชื้อ

โดยจะเลือกใช้กลุ่มที่ 1 การบรรจุอาหารที่ต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนหลังบรรจุ อาหารในกลุ่มนี้โดยทั่วไป ได้แก่ อาหารกระป๋องและอาหารที่บรรจุภาชนะขวด ภาชนะบรรจุสำหรับอาหารประเภทนี้ ได้แก่ กระป๋องโลหะ ภาชนะบรรจุประเภทนี้มีความสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง เมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยวัสดุอื่น เนื่องจากมีความแข็งแรง ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอาหารที่บรรจุอยู่ภายในเนื่องจากแสงแดดและจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี และทนต่อความร้อนและความดันสูงในขณะการแปรรูปด้วยความร้อน

การเลือกใช้กระป๋องให้เหมาะสมกับอาหารมีหลักเกณฑ์ ดังนี้

1. กระป๋องเคลือบดีบุก ใช้บรรจุอาหารแห้งหรืออาหารที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับกระป๋อง มักจะใช้บรรจุผลไม้ที่มีส่วนประกอบของสีแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสีในดอกไม้และผลไม้บางชนิด สารนี้จะให้สีแดงม่วงหรือน้ำเงิน ดังนั้น จึงควรใช้บรรจุผลไม้แห้งจำพวก สับปะรด ลำไย มะม่วง แอปเปิ้ล เป็นต้น

2. กระป๋องเคลือบแลคเกอร์ เหมาะสำหรับบรรจุอาหารที่ทำปฏิกิริยากับเหล็กหรือดีบุกได้ ซึ่งจะทำให้สูญเสียของคุณภาพอาหารไป เช่น ผลไม้ ผักบางชนิด อาหารจากพวกเนื้อสัตว์ และปลาที่มีสารประกอบของกำมะถัน กระป๋องแลคเกอร์แบ่งออกได้อีก 2 ประเภทคือ

- แลคเกอร์ทนกรด (Acid resistant lacquer) ครอบงวด้านในมีสีทอง ใช้บรรจุผลไม้ที่มีสีจัด และสีละลายน้ำได้ เช่น องุ่น สตรอเบอรี่ หากใช้ครอบเคลือบตีบุก ตีบุกที่หลุดออกมาจากครอบจะพอกสีของผลไม้ทำให้สีของผลไม้ซีดลง

- แลคเกอร์ทนกำมะถัน (Sulfur resistant lacquer) ครอบงวด้านในมีสีเทา ใช้บรรจุอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ และมีโปรตีนสูง เช่น ถั่ว ข้าวโพด ปลา

ข้อดีของครอบ คือ เป็นตัวกลางในการนำความร้อนที่ดี มีความทนทาน ไม่แตกง่าย น้ำหนักเบา สะดวกต่อการขนส่ง

ข้อเสียของครอบ คือ หากไม่เคลือบด้วยแลคเกอร์อาจผุกร่อนได้ บางครั้งอาจทำให้อาหารมีกลิ่นโลหะ มองไม่เห็นอาหารที่บรรจุภายใน เมื่อใช้แล้วไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนั้นยังต้องมีเครื่องมือสำหรับปิดฝาอีกด้วย

2.2 อาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิท

อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท คือ อาหารที่ผ่านกรรมวิธีที่ใช้ทำลายหรือยับยั้งการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ด้วยความร้อนภายหลังหรือก่อนการบรรจุหรือปิดผนึก ซึ่งเก็บรักษาไว้ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (hermetically sealed container) ที่เป็นโลหะหรือวัสดุอื่นที่คงรูป ที่สามารถป้องกันมิให้อากาศภายนอกเข้าไปในภาชนะบรรจุได้ และสามารถเก็บรักษาไว้ได้ที่อุณหภูมิปกติ หรืออาหารในภาชนะบรรจุชนิดลามิเนต (laminated) ฉาบ เคลือบ อัด หรือติดด้วยโลหะ หรือสิ่งอื่นใด หรืออาหารในภาชนะบรรจุที่เป็นขวดแก้วที่ฝามียางหรือวัสดุอื่นผนึก หรืออาหารในภาชนะบรรจุอื่น ซึ่งสามารถป้องกันมิให้ความชื้นหรืออากาศผ่านซึมเข้าภายในภาชนะบรรจุได้ในภาวะปกติ และสามารถเก็บรักษาไว้ได้ที่อุณหภูมิปกติ ประเภทของอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท แบ่งได้ดังนี้

1. อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทจำแนกตามค่า ความเป็นกรด-ด่าง และค่าแอกติวิตีของน้ำ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1.1 อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (low acid food) คือ อาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85

1.2 อาหารที่ปรับสภาพกรด (acidified low-acid food) คือ อาหารที่ตามธรรมชาติของผลิตภัณฑ์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 4.5 แต่ในการผลิตมีการปรับสภาพความเป็นกรดของอาหาร โดยการลวกหรือแช่ชิ้นอาหารในสารละลายกรด เติมกรด หรือเติมอาหารที่มีความเป็นกรด จนทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่เกิน 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85

1.3 อาหารที่มีความเป็นกรด (acid food) คือ อาหารที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่เกิน 4.5 และมีค่าแอกติวิตีของน้ำมากกว่า 0.85

2. อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท จำแนกตามค่าแอกติวิตีของน้ำ ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.1 อาหารที่มีค่าแอกติวิตีของน้ำต่ำ (low water activity food) คือ อาหารที่มีค่าแอกติวิตีของน้ำไม่เกิน 0.85

2.2 อาหารที่มีค่าแอกติวิตีของน้ำสูงเกิน 0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง [10]

การผลิตอาหารกระป๋องประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ (raw material preparation)

เพื่อเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปที่พร้อมสำหรับการบรรจุกระป๋อง เริ่มจากการทำความสะอาดวัตถุดิบเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอมออกไป แล้วทำการคัดขนาดและความแก่อ่อนเพื่อความสม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการตัดแต่งส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

2.3.2 การลวกด้วยน้ำร้อน (Blanching)

มีหลายวิธีทั้งจุ่มบรรจุภัณฑ์ลงในน้ำเดือดหรือการนึ่งด้วยไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจะมีเครื่องมือเฉพาะที่สำหรับลวกวัตถุดิบเรียกว่า “Blancher” ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาได้อย่างเหมาะสม

2.3.3 การบรรจุ (filling)

อาหารที่บรรจุ อาจเป็นของเหลวอย่างเดียว เช่น น้ำผลไม้ ของแข็ง เช่น ขึ้นฉะผัก ขึ้นเนื้อ ผสมกับส่วนที่เป็นของเหลวเช่น น้ำเชื่อม น้ำเกลือ น้ำมัน ซอส ในการบรรจุจะต้องบรรจุให้อาหารมีปริมาตรน้ำหนักบรรจุ (ไม่บรรจุจนเต็มพอดี เพราะระหว่างการให้ความร้อนจะมีการขยายตัวของของเหลว

2.3.4 การไล่อากาศ (exhausting)

เพื่อให้ภายในกระป๋องมีสถานะเป็นสุญญากาศ เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน และป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดกับอาหาร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สี กลิ่น และรสชาติทำได้โดยการพ่นไอน้ำร้อนไปที่ผิวหน้าของอาหาร ด้วยเครื่องไล่อากาศ เมื่อปิดฝา ไอน้ำร้อนจะควบแน่นทำให้ที่ว่างเหนือกระป๋องเป็นสุญญากาศ หรืออาจใช้การ ดูดอากาศออกก่อนการปิดผนึก

2.3.5 ปิดผนึกสนิท (hermitically seal)

โดยใช้ hermetically sealed container เพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ และสิ่งปนเปื้อนจากภายนอก รวมทั้ง ไอน้ำ อากาศ ผ่าน เข้าไปภายในบรรจุภัณฑ์ ภายหลังจากฆ่าเชื้อแล้ว การปิดฝากระป๋องใช้เครื่องปิดฝากระป๋อง

2.3.6 การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (thermal processing)

โดยการใช้ความร้อนเพื่อทำลายจุลินทรีย์ ให้เพียงพอกับการฆ่าเชื้อระดับการค้า ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำในหม้อฆ่าเชื้อภายใต้ความดันสูง หากฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า สามารถฆ่าเชื้อในหม้อต้มที่ความดันบรรยากาศปกติได้ เพื่อให้อาหารปลอดภัยและเก็บรักษาไว้ได้ในระยะเวลาที่กำหนด

2.3.7 การทำให้เย็น (cooling)

มีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพของอาหารเนื่องจากความร้อนส่วนเกิน โดยการลดอุณหภูมิของอาหารหลังจากการฆ่าเชื้อแล้วทำให้เย็นทันที จนอุณหภูมิลดลงถึงระดับหนึ่งซึ่งยังมีความร้อนเหลือความร้อนเหลืออยู่พอที่จะทำให้ผิวหน้าของกระป๋องแห้งกระป๋องแห้งสนิท ปราศจากหยดน้ำที่เกาะอยู่บนกระป๋องเพื่อป้องกันการเกิดสนิมบนกระป๋องขณะเก็บรักษา

2.3.8 การปิดฉลากและบรรจุหีบห่อ (Labeling)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต ก่อนที่จะจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ไปยังผู้บริโภคต่อไป

2.4 หลักการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง [2]

การฆ่าเชื้อโดยการใช้ความร้อนหมายถึง การใช้ความร้อนหรือระดับอุณหภูมิสูง ในช่วงเวลา สั้น ๆ เพื่อทำลายสารพิษ จุลินทรีย์ เอ็นไซม์ พยาธิ และแบคทีเรียต่าง ๆ ในการเลือกใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ ในการแปรรูปโดยใช้ความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยแบ่งวิธีการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ เป็น 2 วิธีคือ

2.4.1 การใช้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสเพื่อยืดอายุของ ผลิตภัณฑ์อาหารให้นานหลายวัน เช่น นม น้ำผลไม้ วิธีนี้สามารถใช้ในการถนอมอาหารได้ โดยยับยั้งการ ทำงานของเอนไซม์ และทำลายจุลินทรีย์ที่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ เช่น แบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ ยีสต์ และรา โดยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณค่าของอาหารได้น้อยที่สุด แบ่งได้ 2 วิธี

2.4.1.1 Low temperature long time (LTLT)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนต่ำประมาณ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วทำให้เย็นทันที

2.4.1.2 High temperature short time (HTST)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนสูงประมาณ 72 องศาเซลเซียส นาน 15 วินาที แล้วทำให้เย็นทันที
ข้อควรพิจารณาในการใช้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์

- องค์ประกอบของอาหาร
- PH เกลือ น้ำตาล
- คุณค่าทางโภชนาการ
- จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น
- จุลินทรีย์ที่รอดชีวิต (ต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ)

การเก็บรักษาอาหารที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์

- เก็บในตู้เย็น (4-10°C)
- เติมน้ำบางชนิด เช่น เติมนมสดในน้ำผลไม้
- ควบคุมสภาพปราศจากอากาศ เช่น บรรจุในสุญญากาศ
- ดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ เช่น นมข้นหวาน
- เติมวัตถุกันเสีย เช่น โซเดียมเบนโซเอตในน้ำผลไม้

2.4.2 การสเตอริไลซ์ (Sterilization)

เป็นกระบวนการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้เพียง เล็กน้อยก็มีผลในการฆ่าเซลล์ของแบคทีเรียได้ ขณะที่สปอร์ของแบคทีเรียสามารถอยู่รอดได้ แม้อุณหภูมิ จะสูงกว่านั้นมาก เนื่องจากสปอร์ของแบคทีเรียมีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าเซลล์ปกติมาก จุดมุ่งหมายของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์จึงเป็นสปอร์ของแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่

คำว่า “สเตอริไลซ์” ซึ่งหมายถึงการทำให้ปลอดเชื้ออาจไม่ใช่คำที่ถูกต้องนักในการนำมาใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งนี้เนื่องจากจุดมุ่งหมายหลักของการสเตอริไลซ์คือการทำให้อาหารปราศจากเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเชื้อจุลินทรีย์หรือสปอร์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าเสียซึ่งสามารถที่จะเจริญในอาหารภายใต้สภาวะอุณหภูมิในการเก็บรักษาตามปกติ นั่นคืออาหารที่ผ่านการให้ความร้อนต้องเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้องโดยไม่เกิดการเน่าเสีย หมายความว่าอาจมีจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเหลือรอดอยู่บ้างในอาหาร แต่พวกที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคตายหมดแต่สภาวะแวดล้อมทำให้มันไม่สามารถเจริญเติบโตขึ้นมาได้ จึงเรียกกระบวนการให้ความร้อนตามหลักการนี้ว่า “การฆ่าเชื้อเชิงการค้า (commercial sterilization)”

ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการสเตอริไลซ์อาหารได้แก่

1. จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ที่ทนต่อความร้อนที่อาจมีอยู่ในอาหาร
2. เงื่อนไขการให้ความร้อน
3. pH ของอาหาร
4. ขนาดของบรรจุภัณฑ์
5. ลักษณะทางกายภาพของอาหาร

ในอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ ($pH > 4.5$) *Clostridium botulinum* ซึ่งเป็นการเชื้อจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีอันตรายที่สุดที่สามารถสร้างสปอร์และมีความทนทานต่อความร้อน เชื้อสามารถเจริญเติบโตและผลิตสารพิษอีกโซทอกซิน (exotoxin) ซึ่งเป็นอันตรายแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ได้ด้วยภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ปิด โดยทั่วไปจะมีการให้ความร้อนแก่อาหารมากกว่าความต้องการต่ำที่สุดนี้ เนื่องจากอาจมีจุลินทรีย์อื่นที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียที่คงทนต่อความร้อนมากกว่าอยู่ในอาหาร จุลินทรีย์จะมีความทนทานต่อความร้อนในอาหารที่เป็นกรดต่ำมากกว่าในอาหารที่มีความเป็นกรดสูง สำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดมาก สามารถใช้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่น เช่น ยีสต์หรือเอนไซม์ที่ทนความร้อนเป็นตัวกำหนดเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน สำหรับวัตถุประสงค์หลักในการให้ความร้อนในอาหารที่เป็นกรดสูง (pH ต่ำกว่า 3.7) คือ การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยเงื่อนไขการให้ความร้อนจะรุนแรงน้อยกว่าจึงเรียกว่าเป็นการพาสเจอร์ไรซ์

2.5 ผลของความร้อนต่อเชื้อจุลินทรีย์

การฆ่าจุลินทรีย์ด้วยความร้อน (thermal destruction) ตามกระบวนการผลิตอาหารกระป๋อง ค่าที่ต้องหาเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณเวลาในการให้ความร้อนได้แก่ ค่า D ค่า Z และค่า F ทั้งสามค่าจะแสดงถึงความทนทานต่อความร้อนของแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์แต่ละชนิดในอาหารและประสิทธิภาพของความร้อนที่ใช้ในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เป้าหมาย

1. ค่า D (Decimal Reduction Time หรือ Death Rate Constant)

ความสามารถในการทนทานต่อความร้อนของจุลินทรีย์ ถูกกำหนดให้แสดงอยู่ในรูปของค่า D (D Value) ซึ่งหมายถึงระยะเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการทำลายจำนวนสปอร์ของจุลินทรีย์ลง 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนสปอร์ที่มีอยู่ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่า D แตกต่างกันไปซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่า D ได้แก่ ชนิดของสปอร์และชนิดของอาหารที่สปอร์แขวนลอยอยู่เป็นต้น

2. ค่า Z (Z-value)

ค่า Z หมายถึง จำนวนองศาเซลเซียส (°C) หรือองศาฟาเรนไฮต์ (°F) ที่ทำให้ค่า D เปลี่ยนไป 1 วงจรล็อก ค่า Z ได้จากการสร้างกราฟเวลาที่ทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อนโดยพลอตระหว่างค่า D ของจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งกับอุณหภูมิค่าที่ใช้ฆ่าเชื้อ

ถ้าค่า Z มีค่าสูง เช่น $Z = 12^{\circ}\text{C}$ เปรียบเทียบ $Z = 7^{\circ}\text{C}$ หมายถึงว่าที่ $Z = 12^{\circ}\text{C}$ จะต้องเปลี่ยนอุณหภูมิในการให้ความร้อนมากกว่าเพื่อให้มีการเปลี่ยนค่า D ของจุลินทรีย์นั้นๆ ค่า Z มีประโยชน์ในการคำนวณกระบวนการให้ความร้อนที่ให้ผลเท่ากันที่อุณหภูมิต่างๆ เทียบกับค่าอ้างอิง

3. ค่า F (Sterilizing Value)

ค่า F หมายถึง ระยะเวลาเป็นนาทีที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งใช้ทำลายจุลินทรีย์ที่ทราบจำนวนในอาหารภายใต้สภาวะที่กำหนด การใช้ค่า F จะเป็นต้องระบุอุณหภูมิ (process temperature) ที่ใช้และค่า Z ของจุลินทรีย์ที่เป็นเป้าหมาย

สัญลักษณ์ที่ใช้คือ F_z เช่น F_{121}^{10} ถ้า $Z = 10^{\circ}\text{C}$ และ $T = 121^{\circ}\text{C}$ นั่นคือ F_{121}^{10} จะใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น F_0 ดังนั้น F_0 คือระยะเวลาเป็นนาทีที่ 121°C ที่ใช้ทำลายจุลินทรีย์ซึ่งมีค่า $Z = 10^{\circ}\text{C}$ ลงจำนวนหนึ่ง

ค่า F_0 เป็นค่าที่สำคัญมาก มักเรียกว่า Process lethality ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน อาจแสดงค่า F_0 หรือค่า Lethality (L)

$$L = 10^{(T-T_{ref})/Z} \quad (1)$$

ค่า L คือค่า F_0 ต่อนาที ซึ่งสามารถเปลี่ยน 1 นาที ที่อุณหภูมิอื่นมาเทียบเท่ากับ F_0 โดยค่าจำกัดความแล้ว F_0 เท่ากับ 1 เมื่อ T เท่ากับ 250°F หรือ 121.1°C ซึ่งทดสอบได้โดยการแทนค่าในสูตรสมการที่ (1) ค่า L มีประโยชน์ในการเปลี่ยนเวลาในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เป็นเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่ 121.1°C ซึ่งเป็นพื้นฐานในการหาเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโดยวิธี General Method

ในระหว่างขั้นตอนการทำลายจุลินทรีย์ในอาหารบรรจุกระป๋อง อุณหภูมิภายในกระป๋องซึ่งนิยมวัดจากจุดที่เย็นที่สุดจะมีการเปลี่ยนไปตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งการทำให้เย็นลง รวมเรียกว่า "Thermal Process Cycle" ซึ่งเราสามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจากนั้นนำมาคำนวณหาค่า F_0 ของ Process จากสูตรสมการที่ (2)

$$F_0 = \int_0^1 L_t dt \quad (2)$$

เมื่อ	L	คือ Lethality ที่เวลาต่างๆ
	T	คือ อุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในภาชนะบรรจุ
	T_{ref}	คือ reference Temperature (250°F องศาฟาเรนไฮต์)
	t	คือ เวลา (วินาที)
	F_0	คือ Process Lethality

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดค่า F_0 ขึ้นกับการทดลองเพราะต้องมีปัจจัยอื่นๆเกี่ยวข้องด้วย จึงมีการแนะนำให้บวกค่าความปลอดภัยค่าหนึ่งเข้าไปด้วยในการออกแบบกระบวนการแปรรูปคือได้จากการหาค่าการแทรกผ่านความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อค่า F_0 ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นในวัตถุดิบ จำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการเตรียมวัตถุดิบ คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและอุณหภูมิในการเก็บรักษา ค่า F_0 จะแปรเปลี่ยนไปตามประเภทของอาหารต่างๆ ซึ่งค่า F เป็นค่าความสามารถในการทำลายจุลินทรีย์ของกระบวนการ (lethality) หรืออัตราการทำลาย (lethal rate) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญโดยเฉพาะเมื่อต้องการประสิทธิภาพในการทำลาย (lethal effect) ของช่วงอุณหภูมิที่กำลังให้ความร้อนแต่ยังไม่ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และช่วงที่กำลังทำให้เย็น (Cooling) ในรูปของความสามารถในการทำลายจุลินทรีย์ของกระบวนการที่จะใช้

2.6. การคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Thermal Process Calculation)

ในการกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ถูกต้องในการฆ่าเชื้ออาหารนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องได้รับข้อมูลการให้ความร้อนหรือการทำให้อาหารเย็นลงในภาชนะบรรจุที่ถูกตั้งด้วย การแทรกผ่านความร้อนเป็นข้อมูลที่ได้จากเส้นกราฟแทรกผ่านความร้อนและเส้นกราฟทำให้เย็น ซึ่งมีวิธีที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

2.6.1 General หรือ Graphical method

เป็นการหาค่า Lethality ของกระบวนการฆ่าเชื้อที่สภาวะหนึ่งๆ ทำได้หลายวิธีโดยมีหลักการเดียวกันคือ วัดอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุดของอาหารในกระป๋องที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ฆ่าเชื้อตลอดช่วงเวลารการให้ความร้อนและช่วงต้นของการทำให้เย็น นั่นคือ จนอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าลดลงมาถึง 200 องศาฟาเรนไฮต์ (เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาฟาเรนไฮต์ จะไม่มีผลในการฆ่าเชื้อ) โดยปกติมักวัดทุกๆ 1 นาที แล้วนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณจากสูตรสมการที่ (1)

2.6.2 Formula method

เป็นวิธีใช้หาเวลาในการฆ่าเชื้อที่สภาวะอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ (RT) และอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋อง(IT) การหาระยะเวลาในการฆ่าเชื้อวิธีนี้จะอาศัยหลักการคำนวณโดยข้อมูลที่ได้จะนำมาพล็อตบนกระดาษ Semi logarithmic โดยเริ่มตั้งแต่เวลาที่เปิดไอน้ำเป็นต้นไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทำให้เย็น (Cooling) เวลาที่อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อขึ้นถึงอุณหภูมิที่ต้องการเรียกว่า "Come-up Time"

1. การเขียน Heat Penetration Curve

เป็นการพล็อตข้อมูลบนกระดาษ 3-Cycle Semi logarithmic โดยพล็อตข้อมูลบนสเกล logarithmic และเวลาบนสเกลปกติ หลักการของวิธีคือการหา Heating Curve จากสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคือ

$$\log (RT-CT) = -t/f_h + \log (j(RT-IT)) \quad (3)$$

เมื่อ	CT	คือ อุณหภูมิภายในกระป๋องที่จุดร้อนช้า (องศาฟาเรนไฮต์)
	RT	คือ อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ (องศาฟาเรนไฮต์)
	IT	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋อง (องศาฟาเรนไฮต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log(RT-CT)$ กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-t/f_h$ นั่นคือเวลาที่ Heating curve เปลี่ยนไป 1 log cycle หรือ 90 เปอร์เซ็นต์ นั้นเอง สำหรับการพล็อตกราฟสามารถพล็อตค่า CT ได้โดยตรง โดยกลับหัวท้ายของกระดาษกราฟ 180 องศา และให้กำหนดค่าบรรทัดบนบรรทัดบนสุดของ Cycle บนสุดด้วยค่า (RT-1) และบรรทัดแรกสุดของ Cycle ถัดลงมาเป็น (RT-10) และ (RT-100) ตามลำดับ แล้วพล็อตอุณหภูมิบนสเกล Logarithmic นี้ ส่วนเวลาจะเริ่มจากซ้ายไปขวา คือ ตั้งแต่เริ่มทำการเปิดไอน้ำจนกระทั่งสิ้นสุดการให้ความร้อน ลากเส้นตรงผ่านข้อมูลที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 212 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 100 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ช่วงนี้คือ “lag” (j) ที่อาหารที่จุดร้อนช้าที่สุด (Cold -point) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ lag นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะการถ่ายโอนความร้อน ถ้าถ่ายโอนความร้อนช้าเช่น ในการนำความร้อนจะพบว่าส่วนโค้งนี้จะกว้างและกางออก ถ้าอาหารสามารถถ่ายโอนความร้อนได้เร็วแบบการพาความร้อนส่วนที่เป็นเส้นโค้งจะสั้น Heating Curve ที่มีส่วนที่เป็นเส้นตรงนี้เรียกว่า “Simple heating curve”

ในบางกรณีจะพบว่าอาหารนั้นมี Heating curve ส่วนที่เป็นเส้นตรงมากกว่า 1 เส้น ซึ่งจะเรียกว่า “Broken heating curve” ตัวอย่างอาหารแบบนี้เช่น อาหารที่มีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบผสม (Complex Heating)

2. คำจำกัดความของพารามิเตอร์ต่างๆ

1. ค่า f_h และ f_c หมายถึง เวลาที่ต้องการสำหรับส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงของ Heating - curve และ Cooling curve เปลี่ยนไป 1 cycle หรือ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยค่า f_h และ f_c นี้จะบอกถึงความเร็วในการเพิ่มหรือลดลงของอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุด ตัวอย่างเช่น กระจ่าง 2 กระจ่างซึ่งมีขนาดต่างกันภายในบรรจุวัสดุชนิดเดียวกัน ค่า f_h ของกระจ่างขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าค่า f_c ของกระจ่างใหญ่ ในกรณีที่ไม่ได้สร้าง Cooling curve อาจประมาณค่า $f_h = f_c$

2. ค่า $I'T'$ หมายถึง Pseudo - initial temperature ซึ่งหมายถึงจุดตัดของส่วนที่เป็นเส้นตรงกับแกนอุณหภูมิที่เวลา Correct zero

3. IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของกระจ่าง

4. RT คือ อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ

ค่า j_h หรือ j_c คือ lag factor สำหรับ Heating curve และ Cooling curve เป็น lag time ก่อนที่ผลต่างของ (RT-CT) จะเป็นเส้นตรงคำนวณจากสมการที่ (4)

$$j = (RT - I'T') / RT - IT \quad (4)$$

เมื่อ $j = 1$ จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบพาความร้อน (Pure Convection)

$j = 2$ จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบนำความร้อน (Pure Conduction)

$1 < j < 2$ จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบผสมระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อน

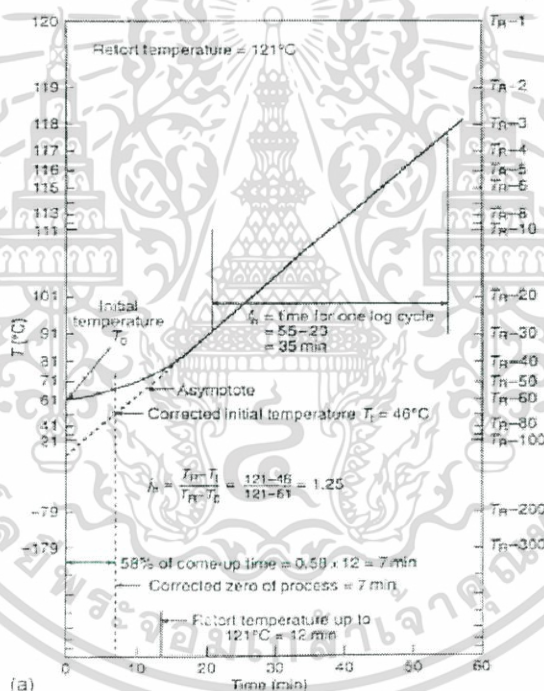
CZ (Correct zero) คือเวลาที่เริ่มต้น process ที่แก้ไขแล้วจะคิดจาก 60 เปอร์เซ็นต์ ของ Come-up time (CUT)

Thermal diffusivity คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ∞ มีหน่วยเป็น (ตารางเมตรต่อวินาที) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\infty_h = 0.398 / ((1/R^2) + (0.427/H^2)) f_h \quad (5)$$

$$\infty_c = 0.398 / ((1/R^2) + (0.427/H^2)) f_c \quad (6)$$

เมื่อ ∞_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนในช่วงของการให้ความร้อน (ตารางเมตรต่อวินาที)
 ∞_c คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนในช่วงของการ cooling (ตารางเมตรต่อวินาที)
 R คือ รัศมีของกระป๋อง (เมตร)
 H คือ ความสูงของกระป๋อง (เมตร)



รูปที่ 2.1 แสดงการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ตัวอย่าง ในการทดลองเก็บข้อมูล Heat penetration ของอาหารในกระป๋องขนาด 303x406 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารเท่ากับ 61 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 121 องศาเซลเซียส CUT เท่ากับ 12 นาที

$$\begin{aligned} CZ &= 0.58 \times 12 \\ &= 7 \text{ นาที} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{จากรูป อ่านค่าที่ CZ = 5.8 นาที ได้ } I'T' &= 120 \\
 j &= (RT - I'T') / (RT - IT) \\
 &= (121 - 46) / (121 - 61) \\
 &= 1.25 \\
 f_h &= 55 - 20 \\
 &= 35 \text{ นาที}
 \end{aligned}$$

2.7 ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (ของไหล หมายถึง สสารที่สามารถไหลได้เช่น ก๊าซ และของเหลว) ของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูงของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ แต่ในขณะที่ของไหลที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อน และไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้ การวัดความหนืดทำได้โดยวัดแรงต้านทานการไหลภายในของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (F) ในแนวขนานกับพื้นผิว เรียกแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า “แรงเฉือน” (Shear force) เมื่อพิจารณาถึงก้อนของของไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน (ดังรูปที่ 2.2) ชั้น ที่อยู่ล่างสุดของของไหลจะถูกยึดไว้ ถ้าแผ่นด้านบนของของไหลได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงจากระยะทางแผ่นไหล ชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างความเร็ว (dv) ระหว่างของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (dx) คืออัตราเฉือน (Shear rate) ที่อยู่เ็นเทอมของ Velocity gradient (dv/dx, s) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้เกิดการไหลเรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (shear stress หรือ F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงชั้นก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิมดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแนวเฉือน ดังสมการที่ (7)

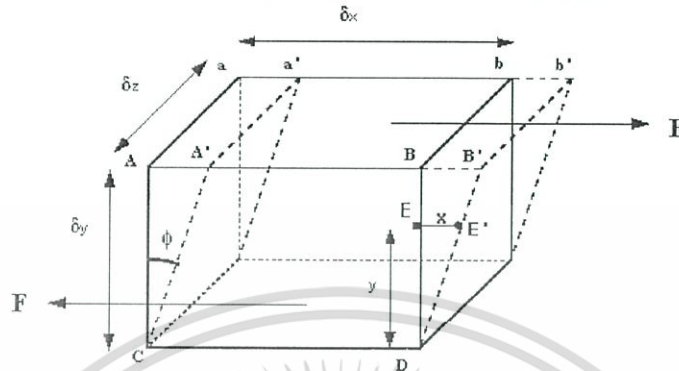
$$F/A = \eta (dv/dx) \quad (7)$$

เมื่อ η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า “ความหนืด” ตามหลักของ เซอร์ ไอแซก นิวตัน (I Sac newton) ค่าจำกัดความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (8)

$$\eta = F'/s \quad (8)$$

เมื่อ	η	คือ	ความหนืด (พอยซ์)
	F'	คือ	แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (ปาสคาล)
	s	คือ	อัตราเฉือน (1/วินาที)

โดย 1 พอยซ์ คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (เซนติเมตรต่อวินาที) ซึ่ง พอยซ์ เท่ากับ 100 เซนติเมตรพอยซ์



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิด velocity gradient เมื่อมีแรงมากระทำในแนวขนานกับพื้นผิวของของไหล

2.8 ลักษณะการไหลของของไหล

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

2.8.1 Newtonian Fluid

เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามสันนิษฐานของนิวตัน คือ อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนไม่ว่าจะเป็นการกวนเร็วหรือช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น

2.8.2 Non Newtonian Fluid

เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามสันนิษฐานของนิวตัน มีลักษณะการไหลที่ไม่เป็นลักษณะการไหลแบบนิวตัน คือที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าที่ไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ ได้แก่

2.8.2.1 Pseudo plastic fluid

ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน (Shear rate) หรือยิ่งกวนยิ่งเร็วยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thinning fluid เนื่องจากความหนืดของของเหลวประเภทนี้ไม่คงที่ จึงเรียกว่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ตัวอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ และสารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.8.2.2 Dilatant fluid

ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนหรือยิ่งกวนเร็วยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear thickening เช่น น้ำดินขุ่น และน้ำแป้ง เป็นต้น

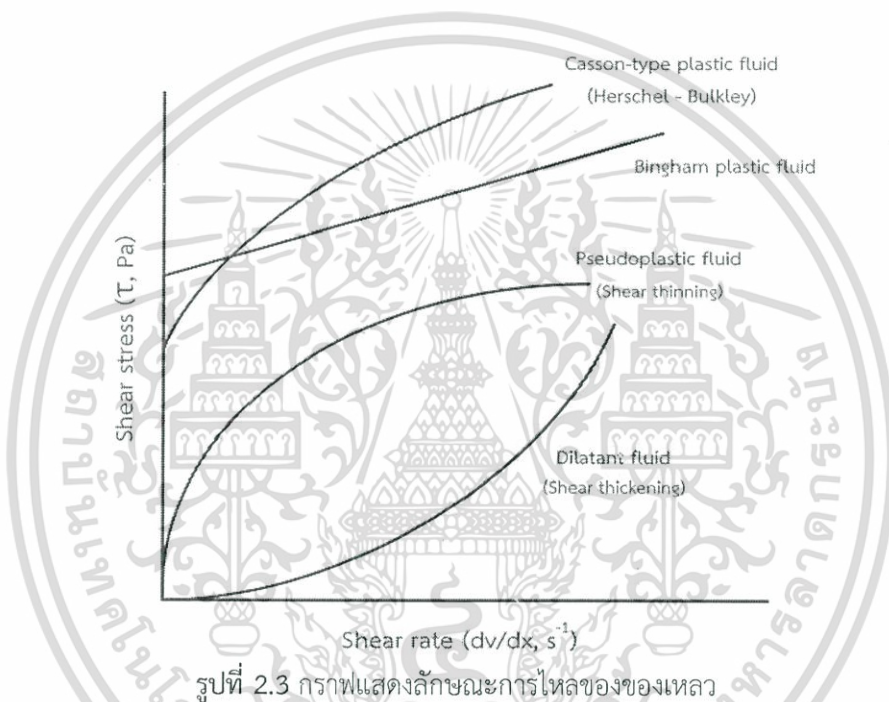
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2.3 Bingham Plastic fluid

ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำมากกว่าแรงที่เรียกว่า Yield value จึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian Fluid แต่เมื่อไม่มีแรงกระทำจะมีพฤติกรรมเหมือนของแข็งคือไม่มีการไหล เช่น ยาสีฟัน น้ำสลিপของเซรามิก และนมช็อคโกแลต เป็นต้น

2.8.2.4 Plastic fluid

ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) ก็จะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบ Pseudo plastic หรือตามโมเดลของ Herschel-Buckley เช่น ซอสมะเขือเทศ มายองเนส และยาน้ำแขวนตะกอน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว

เนื่องจากความหนืดเป็นลักษณะเฉพาะตัวของของไหลแต่ละชนิด การวัดค่าความหนืดจึงเป็นการหา ลักษณะเฉพาะของของไหล ลักษณะการไหลจะเป็นการตอบสนองของคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น น้ำหนักโมเลกุล และการกระจายตัวของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ ประโยชน์ได้ในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับของเหลว เช่น สาเหตุของการ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการผลิต ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์นอกจากนั้นยังใช้ประโยชน์ในด้านการเตรียมวัตถุดิบที่เป็นของเหลวเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพของยาได้อีกด้วย

2.9 อัตราการแทรกผ่านความร้อน

ความร้อนจะถ่ายเทจากไอน้ำหรือน้ำที่ถูกแรงดันอัดผ่านภาชนะเข้าสู่อาหาร โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงมาก และไม่ใช่ปัจจัยที่จำกัดการถ่ายเทความร้อน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการแทรกผ่านความร้อนไปสู่อาหารมีดังต่อไปนี้

2.9.1 องค์ประกอบและคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหาร

ของเหลวหรืออาหารบางชนิด เช่น เมล็ดถั่วลันเตาในน้ำเกลือ จะเกิดการถ่ายเทความร้อน โดยการพามากกว่าในอาหารแข็งซึ่งเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน อาหารมีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงเป็น ข้อจำกัดที่สำคัญในการถ่ายเทความร้อนสำหรับอาหารที่ได้รับความร้อนจากการนำความร้อนเป็นหลัก องค์ประกอบและธรรมชาติของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะปริมาณกรดหรือ pH มีผลต่อปริมาณความร้อนที่ต้องการในกระบวนการผลิต ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

1. pH ในอาหารกระป๋องเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อชนิดของจุลินทรีย์ที่จะเจริญได้และปริมาณ ความร้อนที่ต้องการในการฆ่าเชื้อ อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (pH สูงกว่า 4.5) จะต้องการความร้อนมากกว่า อาหารที่มีความเป็นกรดสูง (pH สูงกว่า 4.5)

2. aw คือปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สำหรับอาหารกระป๋องส่วนใหญ่มีค่า aw > 0.95 เชื้อจุลินทรีย์ที่พบ เช่น *Staphylococcus aureus* จะถูกยับยั้ง ดังนั้นจะทำให้ความร้อนที่ต้องการในการฆ่าเชือน้อยลง

3. น้ำหนักบรรจุ (Fill weight) ถ้ามักเกินไปจะทำให้อัตราการแทรกผ่านความร้อนลดลง ในการทดลองให้ใช้น้ำหนักบรรจุที่มากที่สุดที่จะเกิดขึ้นในการผลิตจริง

4. ขนาดชิ้นอาหารหรือที่เรียกว่า “Cut” และการเรียงตัวของอาหารในกระป๋อง ชิ้นอาหารขนาดใหญ่จะใช้เวลาในการฆ่าเชือนานกว่าชิ้นขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามต้องระวังว่าอาหารที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะตกลงมาอัดแน่นที่ก้นกระป๋องหรืออาหารที่เรียงตัวตามแนวนอนหรือแนวตั้งจะมีการเคลื่อนที่ของของเหลวอย่างง่ายต่างกัน

5. ความข้นหนืด (Viscosity/Consistency) ความข้นหนืดจะมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน และระดับของการผสม (Agitation) ที่ช่องว่างเหนืออาหาร (Headspace) การใส่แก๊สมากเกินไปหรือใช้แปรงผัดประเภทอาจทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง ซึ่งจะเกิดปัญหาการให้ความร้อนไม่เพียงพอ (Under processing)

6. การดูดคืนน้ำ (Rehydration) ขององค์ประกอบ สปอร์อาจจะเจริญเติบโตได้ถ้าในอาหารและองค์ประกอบการดูดคืนน้ำได้ไม่เพียงพอระหว่างการแปรรูป ในความร้อนแห้งสปอร์เหล่านี้จะทนความร้อนได้นานกว่าในความชื้น ดังนั้นจำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานของขนาดและความหนาแน่นของส่วนผสมแห้ง

7. วัตถุประสงค์กันเสีย และสารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และสปอร์ เช่น เกลือไนเตรท ไนไตรท์ ที่ใช้ในผลิตภัณฑ์เนื้อหมัก ไส้กรอก

8. อัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่บรรจุ การบรรจุของแข็งลงกระป๋องมากเกินไปจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนช้าลง

9. การเตรียมวัตถุดิบ เช่น มีการลวก หรือแช่น้ำหรือสารละลายก่อนหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ช่องว่างเหนืออาหารในกระป๋อง ถ้าช่องว่างมีไม่เพียงพอ จะทำให้การหมุนเวียนของอาหารในกระป๋องไม่เพียงพอ และอาจเกิดการให้ความร้อนไม่เพียงพอ

11. อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารก่อนเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ

2.9.2 ขนาดของบรรจุภัณฑ์

การส่งผ่านความร้อนไปยังจุดกึ่งกลางในบรรจุภัณฑ์ขนาดเล็กจะทำได้เร็วกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า

2.9.3 การหมุนกระป๋องในแกนนอน หรือในแกนตั้ง

จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนและเพิ่มอัตราการแทรกผ่านความร้อนในอาหารที่มีความหนืดหรืออาหารกึ่งแข็ง เช่น เมล็ดถั่วในซอสมะเขือเทศ

2.9.4 อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอาหารและตัวกลางในการให้ความร้อนสูงกว่าจะให้การแทรกผ่านความร้อนที่เร็วกว่า

2.9.5 รูปร่างของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะสูงจะส่งเสริมให้เกิดการพาความร้อนดีขึ้นในอาหารที่ได้รับความร้อนโดยการพาความร้อน

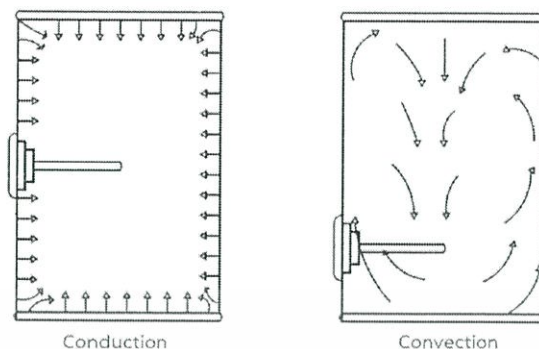
2.9.6 ชนิดของบรรจุภัณฑ์

การส่งผ่านความร้อนผ่านโลหะจะเร็วกว่าผ่านแก้วหรือพลาสติก เนื่องจากความแตกต่างเรื่องคุณสมบัติของการนำความร้อน

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น การเรียงกระป๋องในเครื่องฆ่าเชื้อ วิธีการทำให้เย็น ใช้น้ำเย็นหรืออากาศที่มีอุณหภูมิและความดันเท่าไร ตำแหน่งของคู่ควบคุมความร้อน (Thermocouple) ในกระป๋อง การดูแลกระป๋องหลังปิดฝาแล้ว เวลาที่ใช้จนกระทั่งเครื่องฆ่าเชื้อจะมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดหรือ Come-Up-Time (CUT) การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฆ่าเชื้อ ตำแหน่งของกระป๋องในเครื่องฆ่าเชื้อ

อัตราที่ปริมาณความร้อนแทรกผ่านไปยังจุดร้อนช้าที่สุด (Slowest heating หรือ Cold point, CT) ของอาหารกระป๋องขึ้นกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของอาหารนั้น ๆ การถ่ายโอนความร้อนในอาหารจะซับซ้อน และมีผลต่อระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ที่จะแบ่งดังนี้

1.อาหารที่ถ่ายเทความร้อนแบบเหนียวนำ (conductive heating pack) ความร้อนจะถูกถ่ายเทในทิศทางผ่านผนังกระป๋อง แล้วผ่านโมเลกุลของอาหารที่ไม่เคลื่อนที่ จุดร้อนช้าที่สุดจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางกระป๋อง ดังแสดงในรูป การถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะช้ากว่าการพาความร้อน



รูปที่ 2.4 การวัดที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในอาหารกระป๋องที่บรรจุอาหารแข็งและเหลว และลักษณะของอุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำที่สุด

2. อาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (convective heating packs) ความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยที่โมเลกุลของอาหารเคลื่อนที่ไปด้วย เช่น อาหารเหลวที่มีความข้นหนืดต่ำหรือผลิตภัณฑ์ที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กในน้ำเกลือ เมื่อได้รับความร้อนส่วนที่เป็นของเหลวที่จะได้รับความร้อนก่อนทำให้ความหนาแน่นน้อยลงจึงเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าและความหนาแน่นมากกว่าเคลื่อนที่ลงล่าง ทำให้เกิดการหมุนเวียนของอาหารภายในกระป๋องจุดร้อนซ้ำที่สุดจะอยู่ที่ปริมาณ 3/4 นิ้ว จากด้านล่างสำหรับกระป๋องขนาดเล็ก ถ้าเป็นกระป๋องขนาดใหญ่ เช่นกระป๋องเบอร์ 10 จุดร้อนซ้ำที่สุดจะอยู่ที่ปริมาณหนึ่งนิ้วครึ่งจากด้านล่างกระป๋อง

3. อาหารที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบผสม (complex heat packs) เช่น อาหารที่มีส่วนผสมของสารให้ความหนืด ซึ่งในช่วงแรกจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อน และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอาหารจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น และการถ่ายโอนความร้อนจะเปลี่ยนเป็นการนำความร้อน หรือผลิตภัณฑ์ที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่ในของเหลว ซึ่งส่วนของของเหลวจะร้อนเร็วกว่าส่วนที่เป็นชิ้นอาหารที่เป็นของแข็ง จุดที่ความร้อนเข้าไปถึงที่ซ้ำที่สุดจะอยู่ระหว่างจุดที่ความร้อนเข้าไปถึงซ้ำที่สุดของอาหารที่มีการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำและแบบการพา

การหาอัตราการแทรกผ่านความร้อนทำได้โดยการวัดอุณหภูมิที่จุดที่ร้อนซ้ำที่สุดของอาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่เรียกว่า คู่ควบความร้อน (Thermocouple) เพื่อวัดอุณหภูมิในอาหารในกระบวนการให้ความร้อน โดยการประเมินว่าจุดอื่น ๆ ของอาหารในบรรจุภัณฑ์จะได้รับความร้อนสูงกว่าจุดนี้ ในการสแตอริไลซ์แบบต่อเนื่องจะมีคู่ควบความร้อนต่ออยู่ที่จุดศูนย์กลางความร้อนของบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่แน่นอนของจุดดังกล่าวจะแตกต่างกันไปสำหรับลักษณะของอาหารเหลวในแต่ละชนิด ซึ่งควรหาค่านี้ก่อนการทดลองการใช้เวลาในการให้ความร้อนโดยการพาแล้วจึงเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วมากในช่วงของการทำความร้อน โดยเฉพาะในอาหารที่มีความเข้มข้นสูงและอยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

หม้อฆ่าเชื้อ

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อฆ่าเชื้อ [1]

หม้อฆ่าเชื้อเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากโลหะหนาทนความร้อนมีฝาครอบปิดสนิทและมีที่ล็อคแน่นหนา หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนส่วนใหญ่ท่อหุ้มด้วยฉนวนใช้สำหรับบรรจุและใช้กระบวนการทางความร้อนแก่อาหารในการทำลายจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และสปอร์ในอาหารที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท โดยผ่านตัวกลางไอน้ำหรือน้ำร้อนในการถ่ายเทความร้อน

3.2 การแบ่งลักษณะของหม้อฆ่าเชื้อตามลักษณะต่างๆได้ ดังนี้

หม้อฆ่าเชื้อในอาหารกระป๋องสามารถแบ่งตามลักษณะต่างๆได้ ดังนี้

3.2.1. หม้อฆ่าเชื้อที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่อง (Batch retort system)

วิธีการโดยพื้นฐานประกอบด้วยการนำตะกร้าภาชนะเข้าไปยังภาชนะเหล็ก ปิดฝาหม้อและให้ความร้อนโดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยระยะเวลาที่ให้ความร้อนหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าไปยังภาชนะ เมื่อได้เวลาที่ได้กำหนดแล้วจะให้ความเย็นโดยการปิดท่อจ่ายความร้อน แล้วเปิดน้ำเย็นเข้าไป อย่างไรก็ตามภาชนะบรรจุโลหะขนาดใหญ่ และขวดแก้วที่มีฝาปิดแบบกดจำเป็นต้องกำจัดความดันอากาศก่อนเริ่มต้นให้ความเย็น เนื่องจากความดันที่แตกต่างระหว่างความดันภายนอกและความดันภายในภาชนะจะสามารถทำให้กระป๋องโค้งงอและฝาหลุดได้ ซึ่งหม้อฆ่าเชื้อที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่องสามารถแบ่งออกตามลักษณะต่างๆได้ดังนี้

3.2.1.1 การแบ่งตามลักษณะการจัดวางตัว (Retort arrangement) ได้แก่

1. หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวตั้ง (Vertical retort)

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากไหลคของบรรจุภัณฑ์ไม่สะดวก แต่ข้อดีก็คือประหยัดพื้นที่



รูปที่ 3.1 หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวตั้ง (Vertical retort)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวนอน (Horizontal retort)

หม้อฆ่าเชื้อแบบนี้เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากสะดวกในการขนย้ายบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 3.2 หม้อฆ่าเชื้อแบบวางแนวนอน (Horizontal retort)

3.2.1.2 การแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของบรรจุภัณฑ์ภายใน (Container movement)

ได้แก่ หม้อฆ่าเชื้อแบบอาหารอยู่กับที่ (Stationary) และหม้อฆ่าเชื้อแบบอาหารระบอบหมุนแกว่ง (Rotary)

3.2.1.3 การแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่

1. หม้อฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำโดยตรง (Direct Steam Retort)

เครื่องฆ่าเชื้อแบบให้ความร้อนจากไอน้ำโดยตรง เป็นวิธีดั้งเดิม สำหรับการฆ่าเชื้ออาหารที่บรรจุลงภาชนะซึ่งภาชนะที่สามารถใช้ได้กับเครื่องฆ่าเชื้อประเภทนี้ต้องเป็นกระป๋องเท่านั้น เมื่อไอน้ำอ้อมตัวกลั่นตัวลงที่ด้านนอกจะมีการถ่ายเทความร้อนแฝงไปยังอาหาร ถ้ามีอากาศอยู่ในหม้อฆ่าเชื้ออากาศนี้จะรวมตัวเป็นฉนวนฟิล์มอยู่รอบๆกระป๋องและขัดขวางการควบแน่นของไอน้ำอ้อมตัว จึงต้องกำจัดอากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อทั้งหมดออกไปก่อนโดยการแทนที่ด้วยไอน้ำ หลังการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนจะเป็นการทำให้เย็นในบรรจุภัณฑ์ด้วยน้ำเย็น ไอน้ำจะควบแน่นอย่างรวดเร็ว ส่วนอาหารจะเย็นลงอย่างช้าๆแต่ความดันภายในบรรจุภัณฑ์จะยังคงสูงอยู่ ความดันอากาศที่ยังสูงนี้จะป้องกันแรงเค้นที่รอยปิดผนึก เมื่ออาหารเย็นลงต่ำกว่า 100°C ความดันอากาศจะลดลงและเย็นลงจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 40°C ที่อุณหภูมินี้บรรจุภัณฑ์จะแห้งเองเพื่อป้องกันสนิม

ข้อดี

- เหมาะสำหรับภาชนะที่เป็นกระป๋องเกือบทุกชนิด
- ต้นทุนต่ำโดยเฉพาะกับตัวโครงสร้างที่เป็นเหล็ก
- ขั้นตอนการใช้งานง่าย

ข้อเสีย

- ใช้งานจำกัดเฉพาะภาชนะที่แข็งแรง เช่น กระป๋อง
- สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากต้องใช้ไอน้ำในปริมาณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หม้อฆ่าเชื้อแบบใช้ไอน้ำและอากาศร้อนผสมกัน (Steam-Air heating)

เป็นการใช้ไอน้ำในการฆ่าเชื้อในขณะที่มีการอัดอากาศ เพื่อต่อต้านความดันที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิฆ่าเชื่อนั้นๆทำให้สามารถใช้ฆ่าเชื้อในอาหารในบรรจุภัณฑ์ได้หลายชนิดมากกว่าเครื่องที่ใช้ไอน้ำเพียงอย่างเดียว การควบคุมอัตราส่วนของไอน้ำต่ออากาศเป็นจุดควบคุมที่สำคัญ เพื่อให้ทั้งอุณหภูมิและความดันเป็นไปตามกำหนดการฆ่าเชื้อ ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การที่ต้องการออกแบบให้มีพัดลมหรือกลไก ที่ทำให้ไอน้ำและอากาศนั้นผสมกันอย่างสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในหม้อฆ่าเชื้อ

3. หม้อฆ่าเชื้อแบบน้ำท่วม (Full Immersion Retort)

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้จะใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางการให้ความร้อน (Heating Media) โดยน้ำร้อนจะท่วมบรรจุภัณฑ์ตลอดเวลาการฆ่าเชื้อ สามารถใช้ได้กับบรรจุภัณฑ์หลายประเภท เช่น อาหารบรรจุถุง ขวดแก้ว ขวดพลาสติก กระจงเหล็ก กระจงอะลูมิเนียม และอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้ทั้งการฆ่าเชื้อแบบพาสเจอร์ไรส์ และแบบสเตอริไรส์ โดยการอัดความดันเข้าไปในหม้อฆ่าเชื้อ การอัดความดันอาจใช้ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) หรือใช้อากาศก็ได้ แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้อากาศในการควบคุมความดันภายในหม้อฆ่าเชื้อ ส่วนวิธีการทำน้ำร้อนอาจใช้ไอน้ำฉีดเข้าผสมกับน้ำโดยตรง หรือใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) โดยบีมน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหมุนวนภายในหม้อฆ่าเชื้อตลอดเวลา

4. หม้อฆ่าเชื้อแบบใช้น้ำร้อนภายใต้ความดันสูง (Cascade หรือ Raining water retort)

หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้ใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางการให้ความร้อน แต่เพื่อเป็นการประหยัดน้ำจึงออกแบบให้น้ำตกลงมาเป็นสายผ่านบรรจุภัณฑ์ตลอดเวลา และต้องมีการหมุนเวียนน้ำด้วยปั๊มน้ำ การทำให้น้ำร้อนมีทั้งระบบพ่นไอน้ำผสมกับน้ำโดยตรง แต่โดยทั่วไปมักนิยมใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหม้อฆ่าเชื้อและควบคุมความดันด้วยอากาศอัด ซึ่งควบคุมได้ง่ายกว่าเครื่องฆ่าเชื้อแบบน้ำท่วม อุณหภูมิของน้ำจะค่อยๆสูงขึ้นจากการบีมน้ำหมุนเวียนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้สามารถลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลงอย่างฉับพลันได้ (Thermal Shock) โดยการจัดเรียงภาชนะต้องมีแผ่นกั้นและเรียงสลับเพื่อให้ น้ำร้อนสัมผัสกับภาชนะบรรจุได้อย่างทั่วถึง อุณหภูมิน้ำต้องวัดที่อุณหภูมิขาออกเพื่อความปลอดภัย สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ อัตราการไหลของน้ำร้อนและความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านภาชนะบรรจุ เพราะถ้าอัตราการไหลต่ำเกินไปอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อจะแตกต่างกันมาก ส่งผลให้การฆ่าเชื้อเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์

3.2.2 หม้อฆ่าเชื้อที่มีการทำงานต่อเนื่อง (Continuous Retort)

มีลักษณะการทำงานใช้สายพานนำผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องเคลื่อนตัวเข้าหม้อฆ่าเชื้อผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์แล้วจึงนำออกจากเครื่องอัตโนมัติ หม้อฆ่าเชื้อประเภทนี้จะมีกำลังการผลิตสูง แต่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดของกระป๋องและต้นทุนค่าหม้อฆ่าเชื้อสูงมาก หม้อฆ่าเชื้อแบบนี้มีข้อดี คือ อาหารกระป๋องเกิดการช็อค เนื่องจากอุณหภูมิและความดันน้อยที่สุด ใช้ได้กับภาชนะบรรจุทุกชนิด และสามารถใช้น้ำและไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.3 หม้อฆ่าเชื้อแบบไอน้ำ (Water spray retort)

หม้อฆ่าเชื้อมีกระบวนการพ่นน้ำหมุนวนทั้งจาก ด้านบนและด้านข้างผสมกับไอน้ำและ ลมทำให้เกิด กระจายความร้อนภายในหม้ออย่างทั่วถึงทั้งในช่วงขณะฆ่าเชื้อและทำความเย็น มีลักษณะการทำงานเป็น รอบและรูปแบบการวางแนวอน เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหารประเภทกรดต่ำ

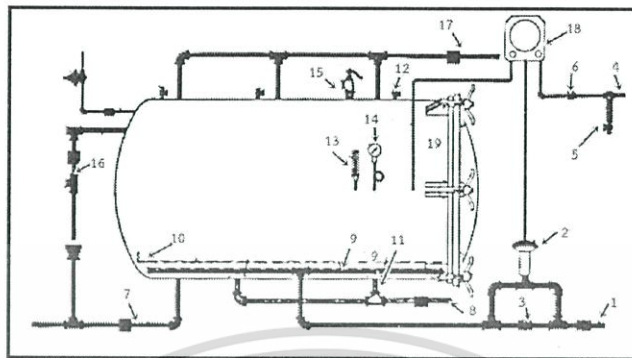
อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาหม้อฆ่าเชื้อเป็นแบบเขย่าและแบบหมุนแกว่งขึ้น เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเขย่าจะมีแรงภายนอกมาบังคับให้โมเลกุลของอาหาร เคลื่อนที่และเกิดการผสมกันภายในกระป๋องจะทำให้การถ่ายโอนความร้อนเร็วขึ้น ส่วนการหมุนในขณะ กระบวนการฆ่าเชื้อนั้น ภายในจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแบบไม่หมุน ดังนั้นจึงประหยัด พลังงานได้มากกว่า เนื่องจากการหมุนทำให้เกิดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาหารได้เร็วกว่าปกติ ทำให้ สามารถฆ่าเชื้อที่ค่า F_0 ตามต้องการได้ โดยใช้เวลาน้อยกว่าหม้อฆ่าเชื้อแบบอยู่นิ่ง และการหมุนจะช่วยให้ เกิดการเคลื่อนที่ของอาหารภายในภาชนะบรรจุทำให้การกระจายความร้อนของอาหารภายในกระป๋อง สามารถเกิดขึ้นได้เร็วและสม่ำเสมอช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารเนื่องจากความร้อนที่ แตกต่างกัน

3.2.4 หม้อฆ่าเชื้อแบบเขย่าไม่ต่อเนื่อง

วิธีฆ่าเชื้อแบบเร็วสำหรับอาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิท หรือ Rapid shake method ที่เรียกว่า Zine Tec's Shaka™ process โดยใช้เวลาตลอดกระบวนการฆ่าเชื้อสั้นลงกว่าเดิมมาก ทำให้อาหาร ยังคงคุณภาพเดิมโดยไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน ซึ่งผู้ผลิตได้ทำการทดลองประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อใน ชุบฝึกผสมมะเขือเทศบรรจุกระป๋อง พบว่าใช้ระยะเวลาการฆ่าเชื้อไม่ถึง 8 นาที น้อยกว่าการฆ่าเชื้อด้วย วิธีอื่นที่ใช้เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง

หม้อฆ่าเชื้อแบบเขย่าไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นเครื่องฆ่าเชื้อแนวอนโดยมีตัวยึดตะกร้าบรรจุ กระป๋องผลิตจากวัสดุที่มีความทนทานและแข็งแรงเป็นพิเศษขณะฆ่าเชื้อตัวยึดจะหมุน แกว่ง ตะกร้าทำให้อาหารได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงประมาณ 20 ครั้งต่อหนึ่งรอบการฆ่าเชื้อ (รูปที่ 3.8) ใช้ได้กับอาหาร ประเภทซूप ซอส ผัก อาหารสำหรับเด็กทารก พาสต้าในซอส และอาหารพร้อมบริโภค ทั้งที่บรรจุกระป๋อง ขวดแก้วและถุง Pouch

3.3 ส่วนประกอบของเครื่องฆ่าเชื้อ



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของหม้อฆ่าเชื้อ

3.3.1 ท่อไอน้ำเข้า (Steam inlet) เป็นท่อไอน้ำต่อจากท่อไอน้ำหลัก (Main steam pipe) หรือท่อพักไอน้ำที่บริเวณติดตั้งเครื่องฆ่าเชื้อ ท่อไอน้ำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อไม่ควรยาวเกินไป หรือมีส่วนหักงอมาก ควรเดินท่อให้ตรงและสั้นที่สุดเพื่อลดแรงเสียดทาน ที่ทำให้เกิดความดันลดต่ำลงภายในเส้นท่อ และควรหุ้มฉนวนกันความร้อนบริเวณท่อไอน้ำทั้งหมด ท่อไอน้ำเข้าต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้ไอน้ำเข้าสู่ภายในเครื่องฆ่าเชื้อมีความดันมากเพียงพอในการไล่อากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อได้สมบูรณ์ ท่อไอน้ำเข้าต้องอยู่ตรงข้ามกับท่อทางระบายอากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อ

3.3.2 วาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติ (Steam control valve) เพื่อควบคุมไอน้ำเข้าหม้อฆ่าเชื้อ โดยต่อเชื่อมโยกกับเครื่องควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ ควรเป็นวาล์วควบคุมด้วยระบบการทำงานโดยความดันของอากาศอัด (Air to open type) หรือระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อให้คงความต้องการ ไม่ควรใช้วาล์วแบบที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันในเครื่องฆ่าเชื้อ

3.3.3 ท่อไอน้ำเบี่ยง (Steam bypass) เป็นท่อต่อคร่อมขนานไปกับท่อไอน้ำเข้าที่ติดตั้งวาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติ เป็นท่อไอน้ำที่มีวาล์วปิดเปิดแบบโกล์บวาล์วหรือวาล์วชนิดอื่นที่เหมาะสมบังคับด้วยมือ เพื่อควบคุมไอน้ำให้ไหลผ่าน ใช้งานเมื่ออุปกรณ์วาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติขัดข้อง หรือเปิดใช้เพื่อเร่งระยะเวลาในการไล่อากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อให้เร็วขึ้น ในกรณีใช้วาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติขนาดเล็กกว่าท่อไอน้ำเข้าหม้อฆ่าเชื้อแต่ต้องมีพนักงานควบคุมดูแลตลอดเวลาขณะเปิดวาล์วท่อไอน้ำเบี่ยงนี้

3.3.4 ท่ออัดอากาศสำหรับอุปกรณ์ควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ (Compressed air inlet) เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมินี้ใช้ร่วมกับวาล์วควบคุมไอน้ำอัตโนมัติที่มีการบังคับปิดเปิดวาล์วด้วยอากาศอัด จึงต้องมีท่ออัดอากาศเพื่อจ่ายอากาศอัดใช้ในระบบ

3.3.5 อุปกรณ์กรองอากาศ (Air filter) ติดตั้งที่ท่ออัดอากาศสำหรับอุปกรณ์ควบคุมและบันทึกอุณหภูมิเพื่อใช้กรองฝุ่นผง ละอองสิ่งสกปรกสิ่งสกปรกที่อาจติดไปกับอากาศอัดเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้ระบบเสียหายได้

3.3.6 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure regulator) ใช้ควบคุมความดันของอากาศอัดโดยอัตโนมัติเพื่อให้ได้ความดันของอากาศอัดอยู่ในช่วงความดันที่เหมาะสมต่อการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมและบันทึกอุณหภูมิ

3.3.7 ท่อระบายน้ำ (Drain) ทำหน้าที่ระบายน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องออกจากหม้อฆ่าเชื้อเมื่อสิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อแล้ว ดังนั้นท่อระบายน้ำควรมีขนาดใหญ่เพียงพอในการระบายน้ำออกจากเครื่องฆ่าเชื้อได้รวดเร็ว นอกจากนี้อาจมีการติดตั้งท่อที่เกี่ยวข้องกับการระบายน้ำได้แก่

1 ท่อระบายน้ำควบแน่น (Condensate) อาจเป็นท่อเดียวกับท่อระบายน้ำหรือเป็นท่อที่ติดตั้งเพิ่มเพื่อใช้ระบายน้ำควบแน่นในช่วงไล่อากาศ

2 ท่อระบายน้ำรวม (Drain manifold) เป็นท่อขนาดใหญ่ ที่ท่อระบายน้ำของ retort แต่ละเครื่องมาต่อรวมกัน ทำหน้าที่ระบายน้ำออกนอกอาคาร หรือนำน้ำที่ใช้หล่อเย็นผลิตภัณฑ์แล้วสู้อุปกรณ์

การต่อท่อระบายน้ำ หรือท่อระบายน้ำควบแน่นเข้ากับท่อระบายน้ำรวมควรใช้ปลายท่ออยู่สูงกว่าระดับน้ำที่ค้างอยู่ในท่อ เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำที่ใช้แล้วจากหม้อฆ่าเชื้อหนึ่งไปสู่อีกเครื่องหนึ่ง ซึ่งอาจทำให้การปนเปื้อนข้ามได้ และควรติดตั้งวาล์วควบคุมการปิดเปิดควรใช้เป็นวาล์วแบบประตูน้ำ (Gate valve) หรือวาล์วประเภทอื่นที่เหมาะสม แต่ไม่ควรใช้โกล์บวาล์ว

3.3.8 ท่อน้ำเข้า (Water inlet) เป็นท่อที่นำน้ำเข้าหม้อฆ่าเชื้อ เพื่อทำอาหารกระป๋องเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนแล้ว ท่อน้ำเข้าต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอ และมีการติดตั้งวาล์วควบคุมการปิดเปิดด้วยวาล์วประเภทโกล์บวาล์ว หรืออาจติดตั้งเป็นวาล์วสามทาง เพื่อป้องกันน้ำรั่วไหลเข้าเครื่องในขณะปฏิบัติการฆ่าเชื้อ

3.3.9 ท่อกระจายไอน้ำ (Steam spreader) เป็นท่ออุปกรณ์กระจายไอน้ำที่ติดตั้งภายในหม้อฆ่าเชื้อต่อจากท่อไอน้ำเข้าบริเวณตอนกลางเครื่องฆ่าเชื้อ ปลายท่อปิด โดยจะวางท่อกระจายไอน้ำตามยาวตลอดแนวยาวของความยาวเครื่อง เพื่อให้ไอน้ำกระจายออกทั่วตลอดทั้งเครื่องฆ่าเชื้อ

3.3.10 ที่รองรับตะกร้าหรือตะแกรงใส่อาหารกระป๋อง (Crate/Basket support) เป็นอุปกรณ์ภายในหม้อฆ่าเชื้อลักษณะเป็นรางรองรับตะกร้าบรรจุอาหารกระป๋องสำหรับเครื่องฆ่าเชื้อประเภทอยู่กับที่ลักษณะแนวนอน

3.3.11 ท่อกระจายน้ำ (Water spreader) เป็นท่อที่ติดตั้งภายในหม้อฆ่าเชื้อแบบแนวนอนต่อจากท่อน้ำเข้า ซึ่งส่วนใหญ่ติดตั้งบริเวณด้านบนของหม้อฆ่าเชื้อ ท่อกระจายน้ำเย็นต้องมีการเจาะรูเพื่อให้สามารถกระจายน้ำได้อย่างทั่วถึงและอย่างรวดเร็ว

3.3.12 ช่องระบายไอน้ำหรือระบายน้ำ (Bleeder) เป็นรูเปิดขนาด 3-6 มม. (1/8 – 1/4 นิ้ว) ติดตั้งเพื่อให้ไอน้ำไหลออกจากหม้อฆ่าเชื้อได้สะดวกตลอดเวลาและทำให้เกิดการหมุนเวียนของไอน้ำภายในเครื่องฆ่าเชื้อ

3.3.13 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อต้องเป็นชนิดปรอทในกระเปาะแก้ว (MIG – Mercury in glass thermometer) และต้องติดตั้งในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมสามารถอ่านค่าได้อย่างชัดเจน

3.3.14 มาตรวัดความดัน (Pressure gauge) หม้อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารกระป๋องควรติดตั้งมาตรวัดความดันภายในหม้อฆ่าเชื้อที่มีช่วงวัดความดันระหว่าง 0-3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (0-40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) โดยติดตั้งกับหม้อฆ่าเชื้อผ่านอุปกรณ์ไซฟอน (Gauge siphon) หรือทางหมุน เพื่อป้องกันความเสียหายต่อมาตรวัดความดัน

3.3.15 วาล์วนิรภัย (Safety valve) เป็นวาล์วที่ติดตั้งกับหม้อฆ่าเชื้อโดยตรง เพื่อป้องกันความดันไอน้ำที่อยู่ภายในหม้อฆ่าเชื้อสูงเกินกำหนดระดับความปลอดภัยนี้ และระบายออกจากหม้อฆ่าเชื้ออย่างรวดเร็ว

3.3.16 ท่อน้ำล้น (Overflow) เป็นท่อระบายน้ำหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ หลังจากให้น้ำท่วมล้นผลิตภัณฑ์ชั้นบนสุด เพื่อป้องกันแรงดันน้ำไปกระทบผนังเครื่องด้านที่มีก้านวัดของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งอาจจะทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นชำรุดเสียหายได้ สำหรับท่อน้ำล้นควรมีขนาดใหญ่กว่าท่อน้ำเข้าเพื่อสามารถระบายน้ำหล่อเย็นออกจากเครื่องฆ่าเชื้อได้เพียงพอ และควรติดตั้งวาล์วปิดเปิดประเภทวาล์วประตูน้ำหรือวาล์วประเภทอื่นที่เหมาะสม

3.3.17 ท่อไล่อากาศ (Vent) เป็นท่อระบายอากาศใช้ในการไล่อากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อ เป็นช่องทางออกขนาดใหญ่เพียงพอให้ใช้ความดันไอน้ำขับเคลื่อนอากาศภายในหม้อฆ่าเชื้อให้ระบายออกไปสู่บรรยากาศโดยตรง ท่อไล่อากาศต้องอยู่ตรงกันข้ามท่อไอน้ำเข้าหม้อฆ่าเชื้อเสมอ โดยทั่วไปท่อระบายอากาศควรมีขนาดใหญ่กว่าท่อไอน้ำเข้าขนาดหนึ่งขนาดท่อ เช่น ท่อไอน้ำเข้ามีขนาด 1 $\frac{1}{2}$ นิ้ว ดังนั้นท่อระบายอากาศควรมีขนาด 2 นิ้ว เป็นต้น หรือในกรณีที่หม้อฆ่าเชื้อมีการติดตั้งท่อระบายอากาศหลายท่อ พื้นที่หน้าตัดของท่อไล่อากาศทั้งหมดรวมกันแล้วต้องมากกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อไอน้ำเข้า นอกจากนี้ท่อไล่อากาศแล้วยังมีท่อที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ท่อรวมท่อไล่อากาศ (Vent manifold) เป็นท่อที่ต่อเข้าเชื่อมท่อระบายอากาศหลายท่อของหม้อฆ่าเชื้อต่อรวมเข้าเป็นท่อรวมขนาดใหญ่เดียวกัน ซึ่งขนาดของท่อต้องมีพื้นที่หน้าตัดของท่อไล่อากาศรวมกันเพื่อให้ระบายอากาศเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

- ท่อรวมทางระบายอากาศของหม้อฆ่าเชื้อหลายๆเครื่อง (Vent manifold header) เป็นท่อที่ต่อท่อไล่อากาศของหม้อฆ่าเชื้อหลายเครื่องเข้าด้วยกันเป็นท่อรวมขนาดใหญ่ เพื่อระบายอากาศออกนอกอาคาร พื้นที่หน้าตัดของท่อรวมขนาดใหญ่ต้องมีพื้นที่เท่ากับ หรือใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อรวมท่อไล่อากาศรวมของจำนวนหม้อฆ่าเชื้อที่ไล่อากาศพร้อมกัน การต่อท่อรวมห้ามต่อท่อไล่อากาศและท่อรวมไล่อากาศเข้ากับทางระบายน้ำ และถ้ามีการติดตั้งวาล์วปิดเปิดท่อไล่อากาศหรือท่อรวมไล่อากาศติดตั้งวาล์วประเภทวาล์วประตูน้ำหรือวาล์วประเภทอื่นที่เหมาะสมเพื่อให้เปิดระบายอากาศได้เร็วขึ้น ไม่มีการกีดขวางไล่อากาศออกจากหม้อฆ่าเชื้อ

3.3.18 เครื่องควบคุมและบันทึกอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อ (Temperature controller and recorder) เป็นอุปกรณ์ต่อร่วมกับวาล์วควบคุมการไหลของไอน้ำและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อให้คงที่สม่ำเสมอในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมวัดและบันทึกอุณหภูมิ โดยสามารถบันทึกช่วงเวลาฆ่าเชื้อได้ มีกระดาษกราฟบันทึกอุณหภูมิขนาดกว้างไม่น้อยกว่า 7.5 ซม. และติดตั้งให้ผู้ควบคุมหม้อฆ่าเชื้อสามารถอ่านค่าการบันทึกได้ชัดเจน ต้องปรับการบันทึกอุณหภูมิให้ตรงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ของหม้อฆ่าเชื้อและมีวิธีการป้องกันการแก้ไขปรับแต่งการบันทึกข้อมูลโดยพลการ

3.3.19 อุปกรณ์ส่งสัญญาณวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) เป็นสายส่งสัญญาณวัดค่าอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อไปที่อุปกรณ์เครื่องควบคุมอุณหภูมิสัญญาณจะถูกแปลงให้เป็นความดันอากาศอัดที่จะไปควบคุมการเปิดปิดวาล์วควบคุมไอน้ำให้เปิดปิดตามต้องการ

3.3.20 ท่อลมเข้า (Air inlet) หม้อฆ่าเชื้ออาจมีการติดตั้งท่อลมเข้าใช้อัดความดันเพื่อรักษาความดันในช่วงทำเย็น เพราะมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วด้วย ซึ่งถ้าไม่มีการอัดความดันจะทำให้ภาชนะบรรจุเสียรูปทรง เช่น กระป๋องโป่งบวม (Buckling) วิธีการทำเย็นแบบนี้เรียกว่า การทำเย็นแบบใช้ความดัน (Pressure cooling)

3.4 หลักการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) จัดเป็นหน่วยปฏิบัติการหน่วยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการแปรรูปอาหาร ซึ่งกระบวนการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่จำเป็นต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อน ทั้งในแง่ของการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์อาหารและในแง่ของการนำความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อส่วนของระบบทั้ง 2 ระบบ แต่ละส่วนมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากนั้นความร้อนจะถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 3 วิธี ดังนี้

1.การนำความร้อน (Conduction)

กลไกของการนำความร้อนเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยอาศัยตัวกลางที่เป็นของแข็งในการนำความร้อน

2.การพาความร้อน (Convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยตัวกลางที่เป็นของไหลในการพาความร้อนซึ่งเกิดขึ้นระหว่างผิวของแข็งและของไหลในบริเวณใกล้เคียงกันที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยของไหลที่กล่าวถึงได้แก่ ก๊าซ ของเหลว อากาศ เป็นต้น ซึ่งการพาความร้อน เกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นในกรณีที่ของไหลพาความร้อนผ่านผิวของแข็งด้วยแรงภายนอก เช่น พัดลม เป็นต้น

- การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นในกรณีที่ของไหลพาความร้อนไหลผ่านผิวของของแข็งด้วยแรงลอยตัวที่เกิดขึ้น จากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหลเพราะมีอุณหภูมิต่างกัน

3.การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

กลไกการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี มีความแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพาความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนไม่ต้องอาศัยตัวกลางและจะถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์



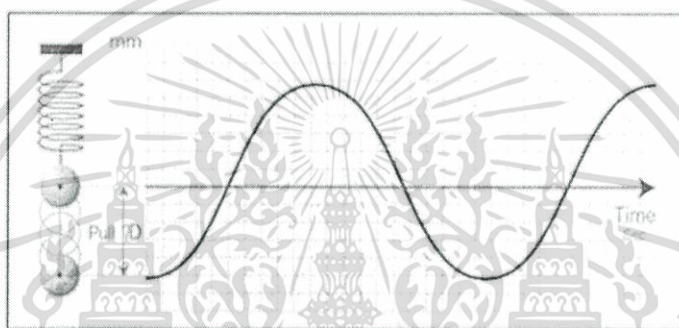
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสั่นสะเทือน

4.1 การสั่นสะเทือน (Vibration) [3]

การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุในทิศทางซ้ำๆ เช่น จากข้างหน้าไปข้างหลัง จาก ซ้ายไปขวาหรือจากบนลงล่างยกตัวอย่างตุ้มน้ำหนักและสปริงเมื่อดึงตุ้มน้ำหนักลงและปล่อยทิศทางเคลื่อนที่จะเป็นแบบขึ้น และ ลงซ้ำไปซ้ำมา การเคลื่อนที่ดังกล่าวจะทำให้เกิดรูปคลื่น ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงรูปคลื่นการเคลื่อนที่ของลูกบอลที่ติดกับสปริง

4.1.1 ที่มาของการสั่นสะเทือน (Vibration Source)

โดยปกติแล้วการทำงานของชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือเครื่องจักรนั้นย่อมมีการสั่นสะเทือนเป็นธรรมชาติของตัวเครื่องเองอยู่แล้ว ถ้าระดับการสั่นสะเทือนนั้นไม่มากหรืออยู่ในเกณฑ์ปกติก็ถือว่าเป็นเรื่องธรรมดา ซึ่งการสั่นสะเทือนนั้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น

- ความไม่สมดุลในการหมุน (Unbalance) จะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของการหมุนและจุดศูนย์กลางของมวลไม่อยู่ในจุด ๆ เดียวกัน เช่น การไม่สมดุลหรือการแกว่งของเพลลาที่คดงอหรือชำรุด การไม่สมดุลของใบพัด ล้อช่วยแรง ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมีหรือในรูปวงกลม

- ความไม่ได้ศูนย์ (Misalignment) ระหว่างเพลลาของมอเตอร์และปั๊มหรือเพลลาของต้นกำลังกับเพลลาของเครื่องจักร

4.1.2. หลักการสั่นสะเทือนของเครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม(Pneumatic vibrator)

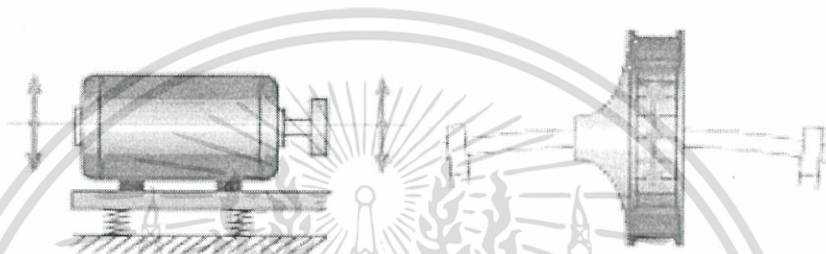
เครื่องสั่นสะเทือนด้วยลมเป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงสั่นสะเทือนโดยอาศัยหลักการ ความไม่สมดุลในการหมุน(Unbalance) ของ โรลเลอร์เหล็กรูปทรงกระบอก หรือ Turbine ภายในตัวเครื่อง โดยจะใช้ลมเป็นตัวสร้างการเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดการหมุน จึงเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของโรลเลอร์เหล็กรูปทรงกระบอก หรือ Turbine สำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้นความไม่สมดุลของชิ้นส่วนที่หมุนก็จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการสั่นสะเทือน

4.2 รูปแบบของการสั่นสะเทือน (Vibration Type)

การสั่นสะเทือนแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบด้วยกันตามลักษณะและองค์ประกอบ คือ

4.2.1. การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration)

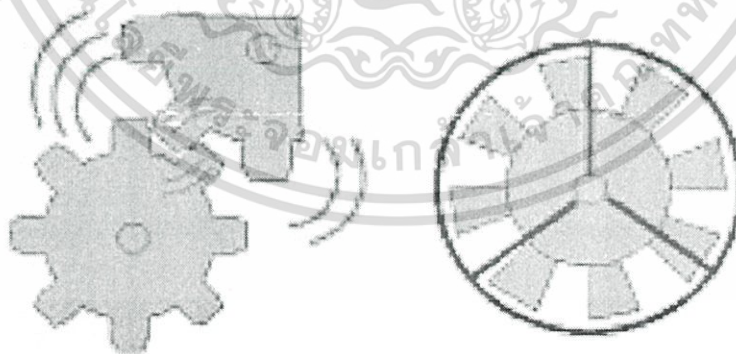
การสั่นสะเทือนโดยอิสระ คือการสั่นสะเทือนที่ทิศทางของการสั่นสะเทือนเป็นไปได้อย่างอิสระตามทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนโดยไม่มีส่วนที่เป็นวัตถุแข็งเกร็งมาขัดขวางทิศทางของชิ้นส่วนที่สั่นสะเทือนนั้น ๆ เช่น เครื่องจักรหรือมอเตอร์ที่วางอยู่บนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นและฐานที่มีความเป็นสปริง หรือใบพัดที่หมุนอยู่บนเพลายาวดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Body Vibration) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร

4.2.2. การสั่นสะเทือนแบบขบกัน (Meshing Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบขบกัน คือการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่งที่ชิ้นส่วนที่เราวิเคราะห์การสั่นสะเทือนหมุนหรือเคลื่อนที่ผ่าน เช่น การสั่นสะเทือนของเฟืองที่ขบกันและหมุนไปเรื่อย ๆ โดยในตอนที่ฟันแต่ละฟันขบและจากกันก็จะมี การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น หรือการสั่นสะเทือนของใบพัดของพัดลมดังรูปที่ 4.3



การสั่นสะเทือนของเฟืองที่ขบกัน

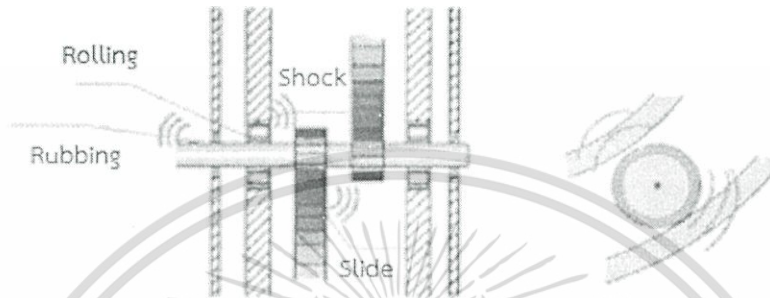
การสั่นสะเทือนของใบพัดที่หมุนถ่าย

รูปที่ 4.3 การสั่นสะเทือนแบบขบกันหรือเคลื่อนที่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3. การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน (Frictional Vibration)

การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในการหมุนหรือเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักร เช่นการหมุนหรือเคลื่อนที่ของเม็ดลูกปืนหรือตลับลูกปืน การเคลื่อนที่และไถล (Slide) ของบูชที่รองรับการหมุนของชิ้นส่วนเครื่องจักรดังรูปที่ 4



รูปที่ 4.4 การสั่นสะเทือนจากแรงเสียดทาน

4.3 ตัวแปรพื้นฐานที่ใช้วัดแรงสั่นสะเทือน

พื้นฐานในการวัดแรงสั่นสะเทือน จะต้องทำความรู้จักกับ องค์ประกอบ 4 ตัว ดังนี้

4.3.1 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ คือความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของการเคลื่อนที่หรือรอบของการหมุนต่อหน่วยเวลา รอบต่อวินาที

4.3.2. การวัดระยะทางของการสั่นสะเทือน (Displacement)

การวัดระยะทางของการสั่นสะเทือน คือการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนว่า “มีการเคลื่อนที่ไปจากจุดอ้างอิงเท่าใดในการสั่นสะเทือนแต่ละรอบ” โดยปกติจะนิยมวัดเป็นมิลลิเมตร หรือ นิ้วในการวัดระยะทางจะวัดแบบ PEAK ส่วนมากจะใช้กับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วรอบต่ำๆ ความถี่จะอยู่ในช่วง 10 เฮิร์ตซ์ – 150 เฮิร์ตซ์ เช่น การสั่นสะเทือนของท่อ การวัดแรงสั่นสะเทือนบนพื้น

4.3.3. การวัดความเร็ว (Velocity)

การวัดความเร็วในการสั่นสะเทือนหมายถึง วัดภูมิความเร็วเท่าไรในแต่ละรอบของการสั่นสะเทือน โดยปกตินิยมวัดเป็นมิลลิเมตร/วินาที (mm/s) และนิ้ว/วินาที (inch/sec) ในการวัดความเร็วเรามักจะวัดแบบ RMS เราจะใช้หน่วยนี้กับการวัดการสั่นสะเทือน ที่มีความถี่ระหว่าง 100 เฮิร์ตซ์ -1,000 เฮิร์ตซ์ เช่น การเยื้องศูนย์ (Misalignment) ความไม่สมดุล (Unbalance)

4.3.4. การวัดอัตราเร่ง (Acceleration)

การวัดอัตราเร่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลาของวัตถุที่มี เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อหน่วยเวลาของวัตถุที่มีการสั่นสะเทือน ใช้ในการใช้ในการวัดการสั่นสะเทือน ที่ความถี่สูงคือ ตั้งแต่ 1,000 เฮิร์ตซ์ ขึ้นไปเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงนั้นระยะทาง การเคลื่อนที่จะน้อยและ ในขณะเดียวกันความเร็วในการเคลื่อนที่จะสูงมาก เช่น การวัดความสั่นสะเทือนของลูกปืน

4.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้น ต้องใช้ค่ามิติหรือหน่วยต่าง ๆ ในการอ้างอิง ดังนั้นต้องรู้จักและทำความเข้าใจค่า มิติและหน่วยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดการสั่นสะเทือนก่อนที่จะลงลึกในรายละเอียดต่อไป

- Peak เป็นการวัดขนาดของ Amplitude จากยอดคลื่น จะเห็นว่าเป็นการวัดขนาดของการขึ้นสุดและ ลงสุดของการสั่นสะเทือนซึ่งจะมีค่าเท่ากับระยะการสั่นสะเทือนทั้งหมดของวัตถุ การวัดขนาดการสั่นสะเทือนแบบ Peak นี้จะใช้กับการวัดการสั่นสะเทือนในหน่วย การวัดแบบการวัดระยะทาง (Displacement) ของเครื่องจักรที่มีรอบของ การสั่นสะเทือนต่ำๆ

- Root Mean Square, RMS (Standard Deviation) ของขนาด Amplitude ในกรณีทีวัดค่า Amplitude ที่ไม่มีความสม่ำเสมอค่า Root Mean Square นี้จะไม่ใช้ค่าเฉลี่ย

การเลือกใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือน

การเลือกใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนสามารถ วิเคราะห์ได้ทั้งระยะทางการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง ซึ่งในการเลือกที่จะวิเคราะห์ตัวแปรใดนั้นให้พิจารณาจากความถี่ของการสั่นสะเทือนดัง ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเลือกใช้ตัวแปรในการวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือน

การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ (Displacement)	การวัดความเร็ว (Velocity)	การวัดความเร่ง (Acceleration)
ใช้วัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำๆ ไม่เกิน 10 เฮิร์ตซ์ ส่วนมากจะใช้สำหรับวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่ความเร็วต่ำๆ ส่วนขนาดในการวัดนั้นมักจะใช้ แอมพลิจูดที่วัดเป็นแบบเต็มคลื่น(Peak to Peak)	เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด ใช้วัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ปานกลางตั้งแต่ 10 ถึง 1,000 เฮิร์ตซ์ ใช้วิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรโดย ทั่ว ๆ ไป เช่น มอเตอร์ ปั๊ม พัดลม การติดตั้งเครื่องจักรไม่ได้ศูนย์ (Misalignment) การยึดแน่นของเครื่องจักร โดยส่วนมาก แอมพลิจูด ที่ใช้ในการวัด จะวัดแบบ RMS (Root Mean Square)	ใช้วัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรที่ความถี่สูงกว่า 10,000 เฮิร์ตซ์ แต่โดยส่วนมาก มักจะใช้การวัด และวิเคราะห์การสั่นสะเทือน และการชำรุดเสียหายของลูกปืน (Bearing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

5.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 วัสดุ

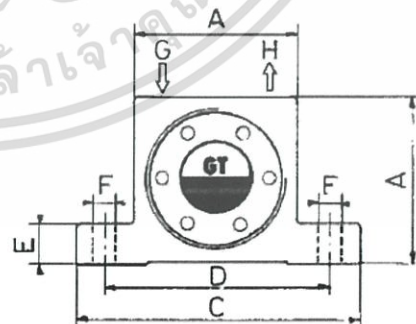
1. น้ำเปล่า
2. น้ำตาลทรายขาว

5.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดแรงสั่นสะเทือน (Accelerometer) รุ่น DEWE-43
2. เครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม (Pneumatic vibrator) รุ่น GT-8
3. อุปกรณ์ปรับความดันลม
4. กระจบองขนาด 307×409 และ 401×411
5. ท่อลมทนความร้อน
6. สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K)
7. เครื่อง Data logger รุ่น Ellab CTF 9008

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม (Pneumatic vibrator) รุ่น GT-8

Vibration 1000 /min		Centrifugal force(N)		Air consumption(L/min)		G/H	Weight(g)
2 bars	6 bars	2 bars	6 bars	2 bars	6 bars		
36	46	990	2910	46	112		
A(mm)	Width(mm)	C(mm)	D(mm)	E (mm)	F(mm)		
50	33	86	68	12	7	1/8"	255

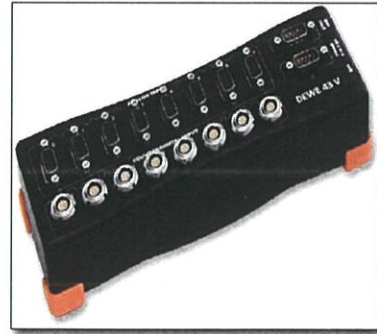


รูปที่ 5.1 เครื่องสั่นสะเทือนด้วยลม รุ่น GT-8

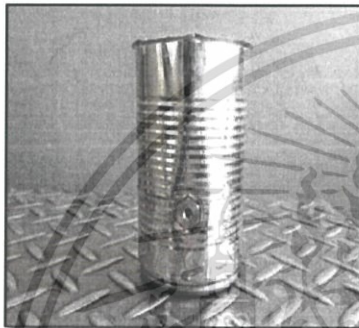
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



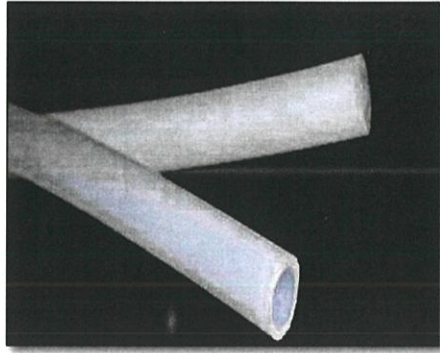
(จ)



(ฉ)

รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) น้ำตาลทรายขาว (ข) เครื่องวัดแรงดันสะเทือน
(ค) กระป๋องขนาด 307×409 (ง) กระป๋องขนาด 401×411
(จ) อุปกรณ์ปรับความดันลม (ฉ) เครื่อง Data logger รุ่น Ellab CTF 9008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ท่อลมทนความร้อน

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของท่อลมทนความร้อน

เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน (mm)	อุณหภูมิ ใช้งาน (°C)	ความดัน ใช้งาน (บาร์)	สีของ ท่อ
12	8	0-230	0-20	ขาวขุ่น

5.2 ขั้นตอนการทดลอง

5.2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำเชื่อม

1. เตรียมน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

2. ชั่งน้ำหนักน้ำเปล่า และน้ำตาลทรายด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง ดังตารางแล้วผสม

น้ำตาลกับน้ำเปล่าในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน

ตารางที่ 5.3 ค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อม

ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	น้ำเปล่า (กรัม)	น้ำตาลทราย (กรัม)
20	800	200
40	600	400
60	400	600

5.2.2 การหาค่าความหนืด

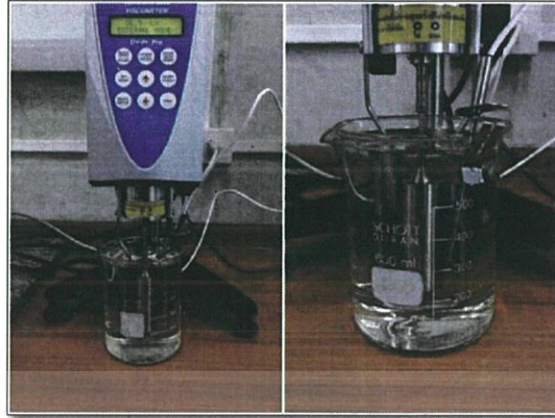
1. จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องวัดความหนืด Brookfield รุ่น DV-III

2. เตรียมตัวอย่างสารละลายซูโครสที่ได้เตรียมไว้ลงบีกเกอร์

3. ทำการวัดความหนืด แล้วทำการบันทึกค่าความหนืดของสารละลาย

4. ทำการวัดความหนืดโดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 การวัดความหนืดของน้ำเชื่อม

ใช้เครื่องหาค่าความหนืด Brookfield รุ่น DV-II+ Pro ต่อเข้ากับเครื่อง computer และใช้ software Rheocalc V3.3 เริ่มจากใช้หัววัดที่ระดับแรก และทำการอ่านค่าจากตัว โปรแกรมแล้วบันทึกผล แสดงค่าความหนืดดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม

ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)
20	7.11
40	23.13
60	65.84

5.2.3 วิธีการทดสอบ

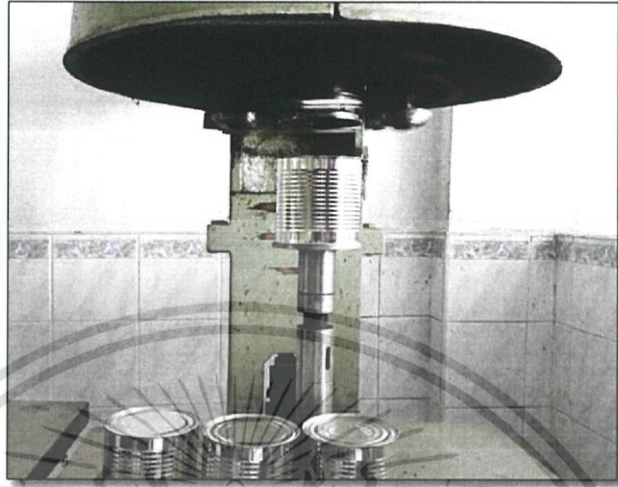
1. ทำการเจาะรูกระป๋องที่ความสูง 1 ใน 3 ของความสูงจากฐานกระป๋อง



รูปที่ 5.5 ตำแหน่งการเจาะรูกระป๋องขนาด 307×409 และ 401×411

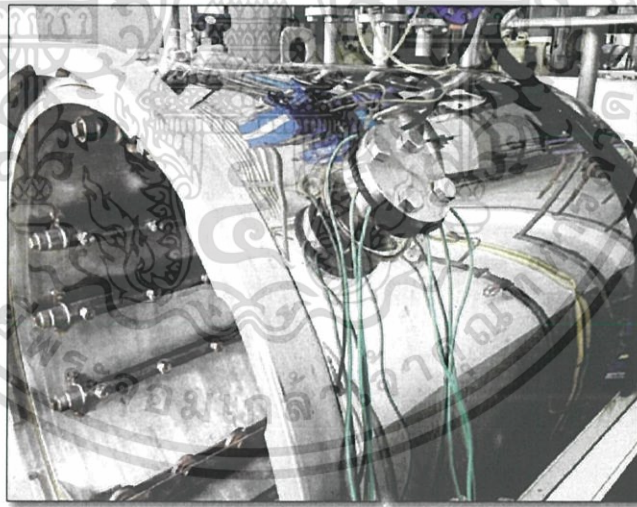
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำน้ำเชื่อมบรรจุลงกระป๋อง เว้นช่องว่างเหนืออาหาร 1 เซนติเมตร
3. ทำการปิดฝากระป๋องด้วยเครื่องปิดฝากระป๋อง



รูปที่ 5.6 การปิดฝากระป๋องด้วยเครื่องปิดฝากระป๋อง

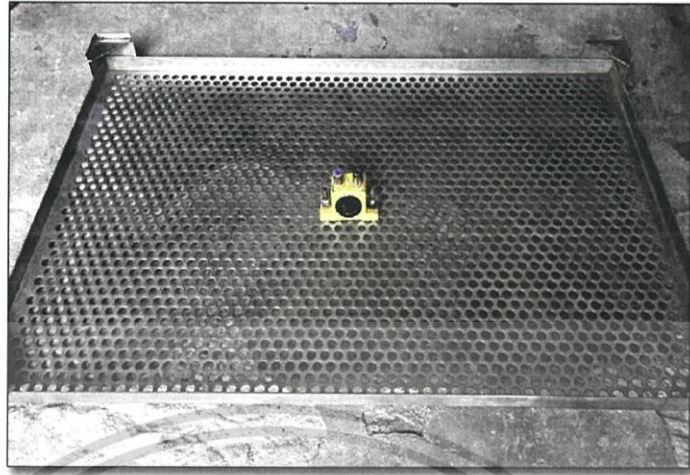
4. เสียบสายเทอร์โมคัปเปิลจากนั้นนำไปต่อเข้ากับเครื่อง Data logger แล้วตั้งค่าให้บันทึกข้อมูลทุกๆ 1 นาที



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเข้าในหม้อรีทอร์ท

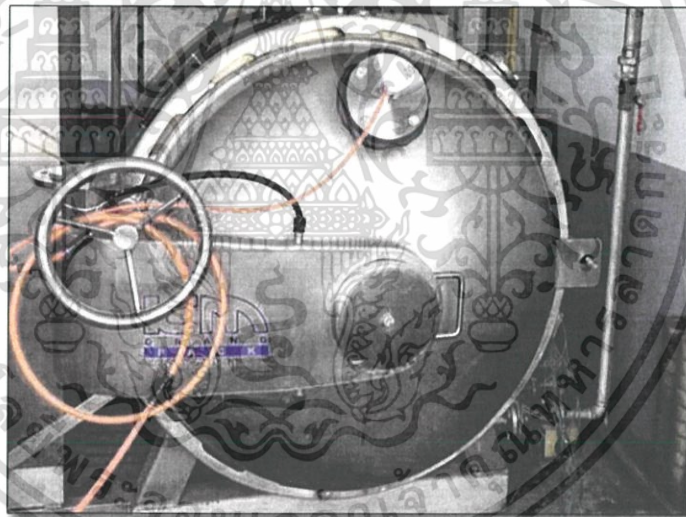
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ติดตั้งตัวสันสะท้อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางตะแกรงวางกระป๋อง ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องสันสะท้อน

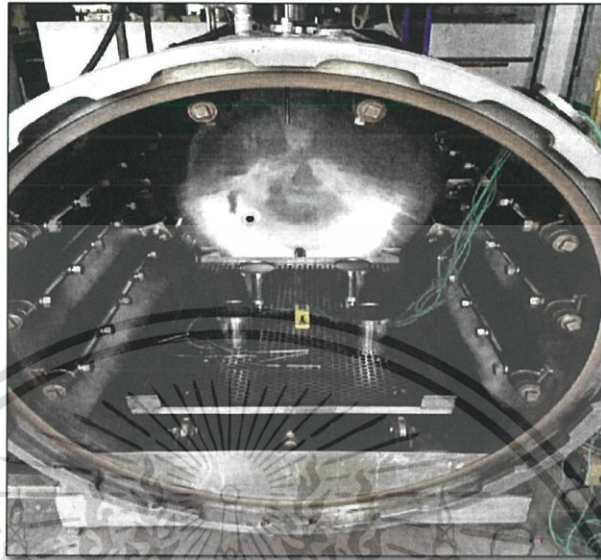
6. ทำการต่อท่อลมทนความร้อนเข้ากับเครื่องปรับความดันลม (Air regulator) แล้วต่อเข้ากับหน้าแปลนรีทอร์ทดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงตำแหน่งการต่อท่อลมเข้ากับหม้อรีทอร์ท

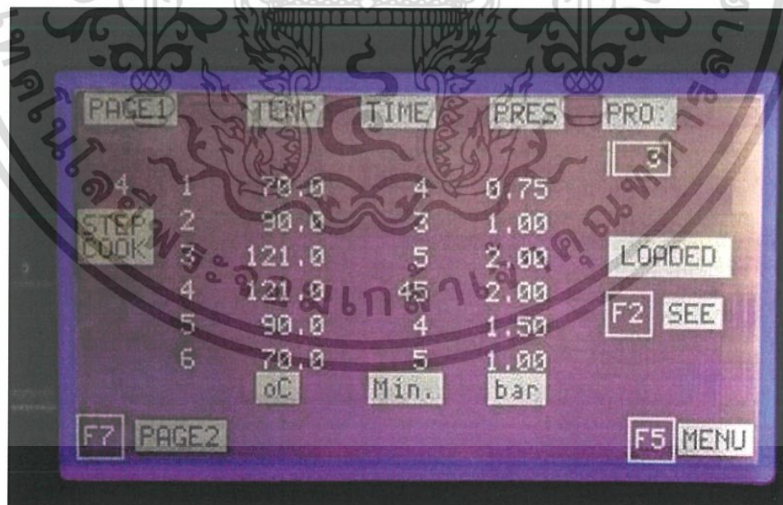
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำกระป๋องที่บรรจุสารละลายซูโครสเรียบร้อยแล้ว มาเรียงในตะแกรง ดังรูปที่ 5.10 เสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับกระป๋อง



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งการวางกระป๋องภายในหม้อรีทอร์ท

8. ทำการปิดประตูหม้อฆ่าเชื้อแล้ว ตั้งค่าอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในหน้าจอการตั้งค่าการทำงานของหม้อฆ่าเชื้อดังรูปที่ 5.11

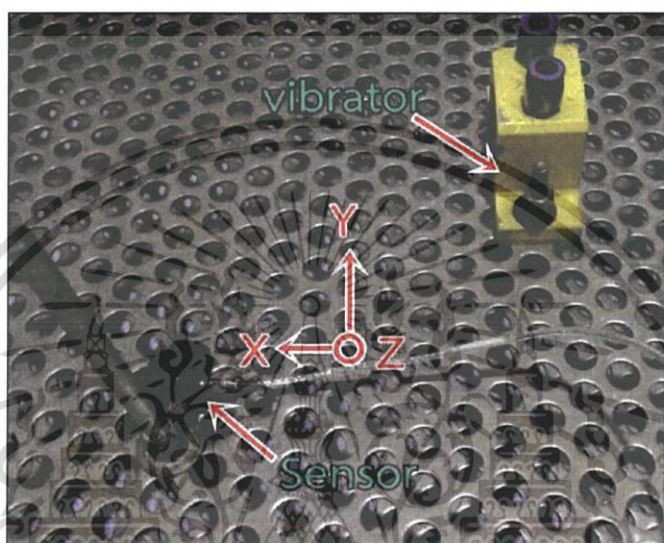


รูปที่ 5.11 แสดงหน้าจอการตั้งค่าอุณหภูมิและความดันของหม้อฆ่าเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 หลักการวัดการสั่นสะเทือน

ใช้เครื่อง Accelerometer รุ่น DEWE-43 ต่อเข้ากับ computer และใช้ software DEWESoftX2 ในการวิเคราะห์ผลของการสั่นสะเทือนทั้งสามแกน ได้แก่ X Y และ Z ซึ่งตัวเครื่องสามารถวัดได้ทั้ง ความเร่ง ความเร็ว และ การกระจัด ทำการติดตั้งหัววัดและอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนตามแนวแกน X Y และ Z ดังรูปที่ 5.12 โดยวัดความดันลม 4 5 และ 6 บาร์ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ และได้ผลดังตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.12 การติดตั้งเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

ตารางที่ 5.5 ความถี่ และ แอมพลิจูด ของการสั่นสะเทือน ที่ความดันลมในระดับต่าง ๆ

ความดันลม (บาร์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)			แอมพลิจูด (มิลลิเมตร)		
	แกน x	แกน y	แกน z	แกน x	แกน y	แกน z
4	7	111	110	3	5	5
5	8	138	137	3	7	7
6	8	177	175	3	8	8

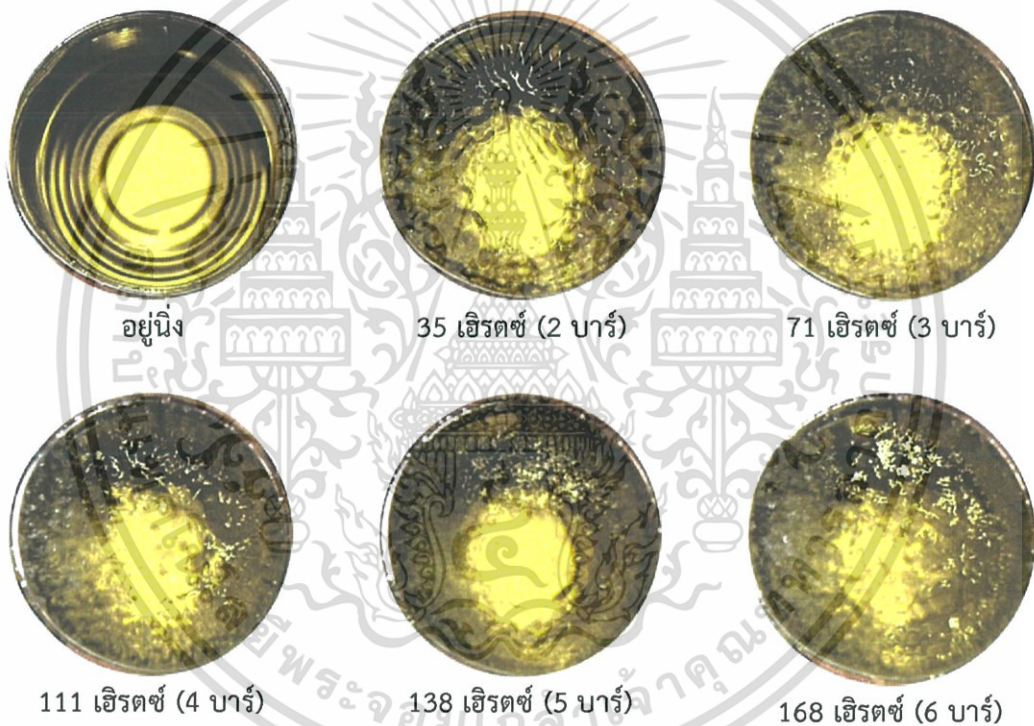
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 ผลของแรงสั่นสะเทือนต่อผิวหน้าของของเหลว

เมื่อทำการทดลองที่ระดับแรงสั่นสะเทือนด้วยความดันลม 2 3 4 5 และ 6 บาร์เพื่อสังเกตดูพฤติกรรมที่ผิวหน้าของของเหลวเมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือน พบว่าเมื่อเพิ่มแรงสั่นสะเทือนลักษณะของผิวหน้าของของเหลวจะเคลื่อนที่ขึ้นลง และโมเลกุลของเหลวจะเคลื่อนที่วนเป็นวงกลม เมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ลักษณะของผิวหน้าของของเหลวจะมีลูกคลื่นที่เล็กลงและมีจำนวนที่มากขึ้นซึ่งจะมีคลื่นที่มีการสั่นไหวที่รุนแรงมากขึ้น ซึ่ง ดังรูปที่ 6.1

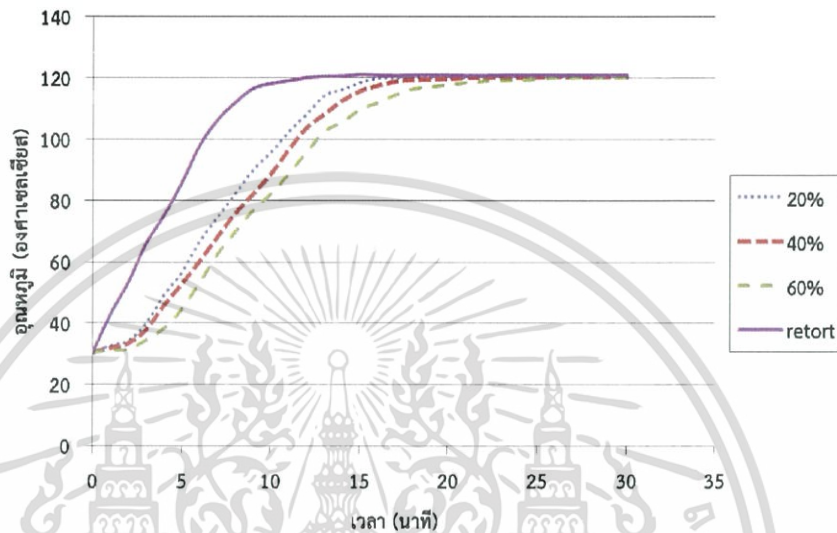


รูปที่ 6.1 ลักษณะของผิวหน้าของของเหลวที่มีการสั่นสะเทือนในระดับต่าง ๆ

6.2 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่สภาวะอยู่นิ่ง

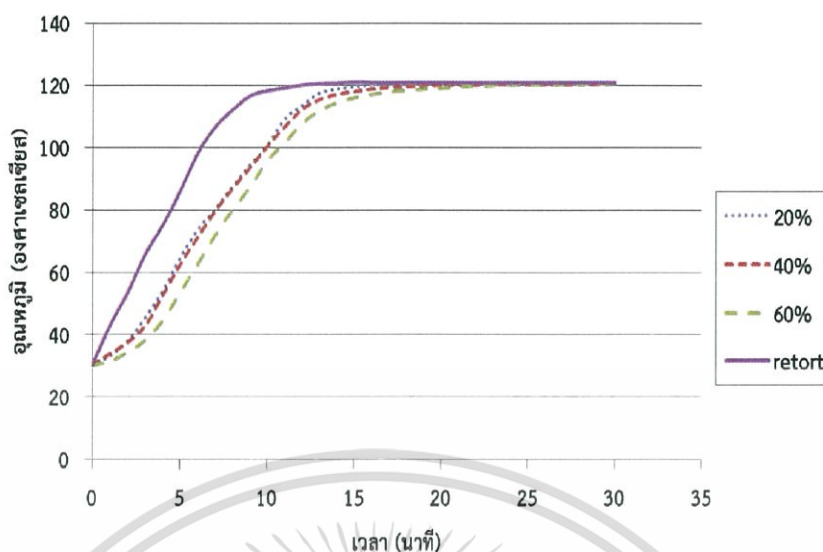
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมมีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสูงขึ้น การแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับคือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่สภาวะอยู่นิ่ง กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่ความถี่ 111 เฮิรตซ์

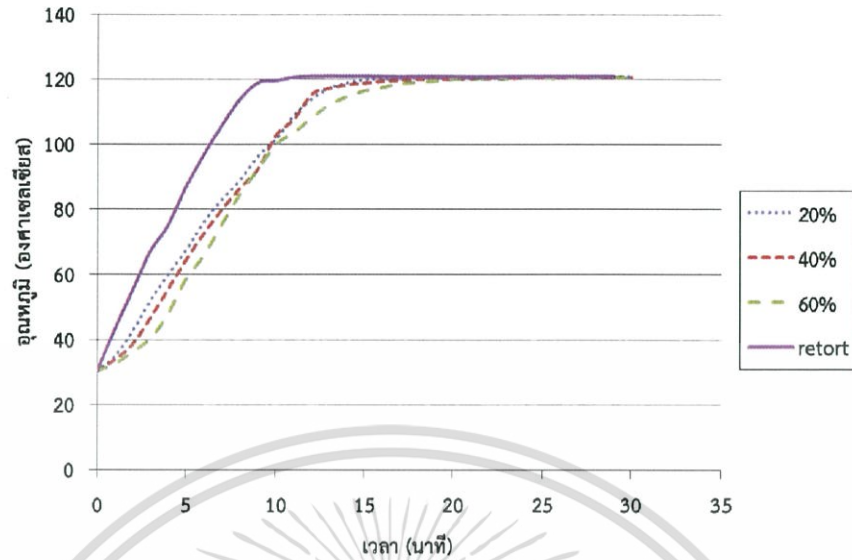
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 111 เฮิรตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ส่งผลเพียงเล็กน้อยกับน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากความถี่การสั่นสะเทือนไม่เพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อมได้ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 6.3 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสันสเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์

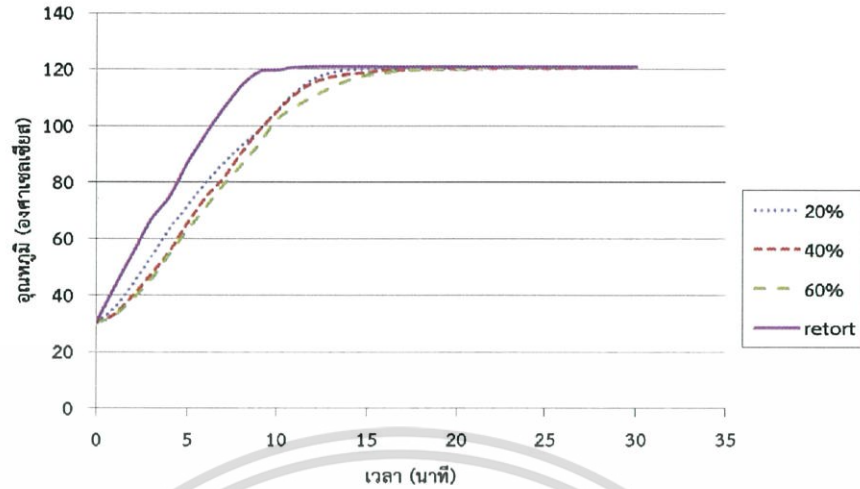
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถี่การสันสเทือนมากเพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อม ทำให้ของเหลวภายในมีการผสมกันแบบปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่เร็วขึ้น



รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสันสะเทือน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์
กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์

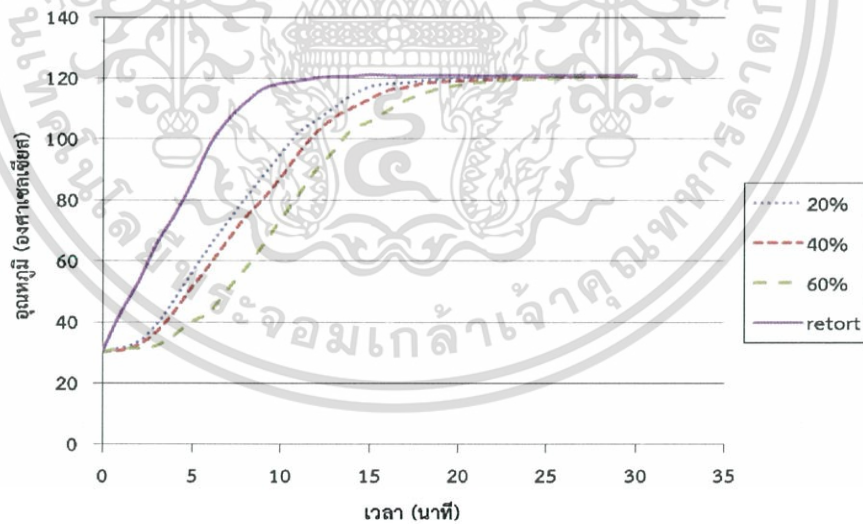
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถี่การสันสะเทือนมากเพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อม ทำให้ของเหลวภายในมีการผสมกันแบบปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่เร็วขึ้น



รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสันสะเทือน ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์
 กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่สภาวะอยู่นิ่ง

ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมมีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสูงขึ้น การแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับคือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

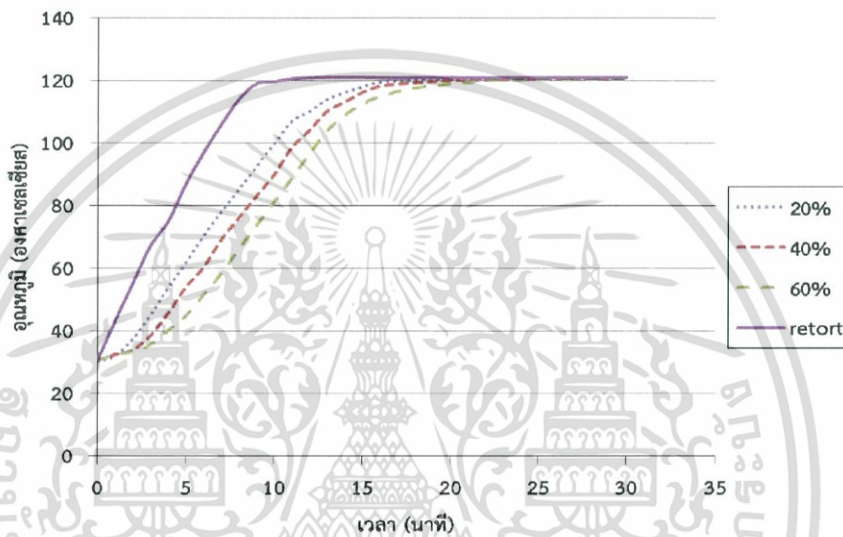


รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่สภาวะอยู่นิ่ง กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์

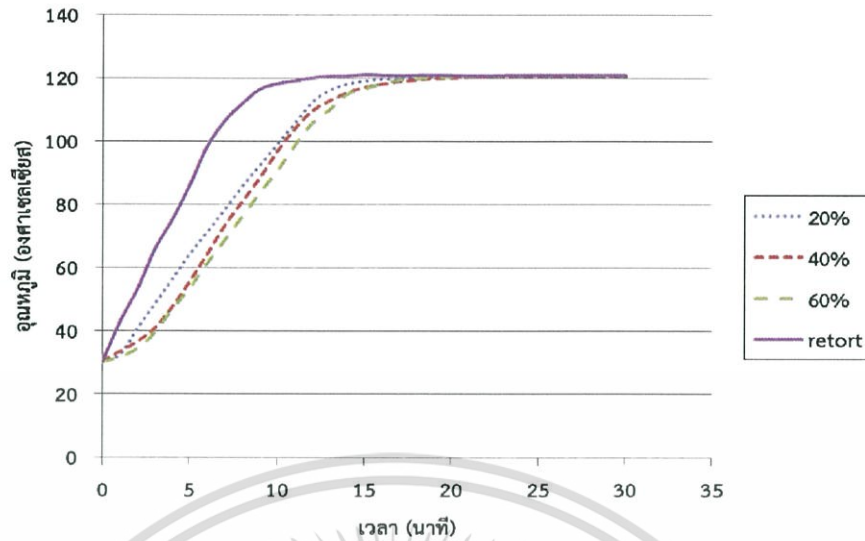
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้น แต่ส่งผลเพียงเล็กน้อยกับน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากความถี่การสั่นสะเทือนไม่เพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อมได้ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ช้า



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสั่นสะเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์

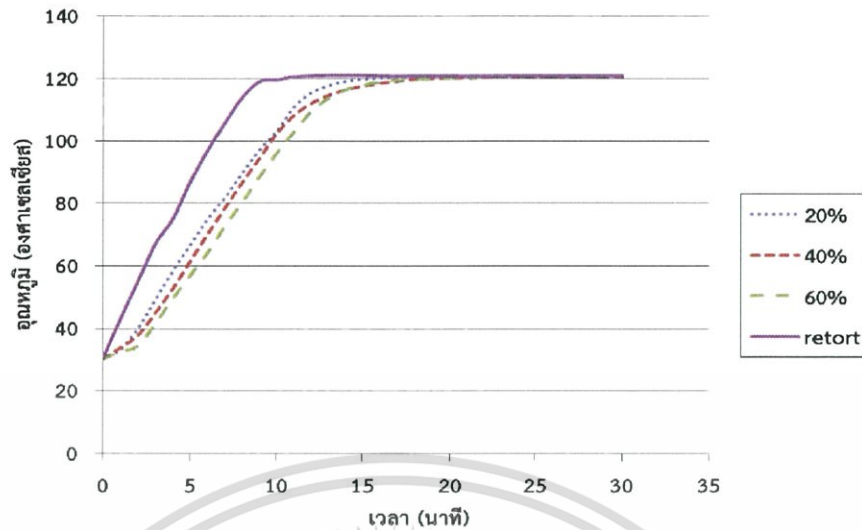
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถี่การสั่นสะเทือนมากเพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อม ทำให้ของเหลวภายในมีการผสมกันแบบปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น



รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสันสะท้อน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์
กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์

ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม มีผลต่อเวลาในการแทรกผ่านความร้อน จากกราฟความสัมพันธ์เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องจะช้าลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการแทรกผ่านความร้อนที่เร็วขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถี่การสันสะท้อนมากเพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของน้ำเชื่อม ทำให้ของเหลวภายในมีการผสมกันแบบปั่นป่วนมากขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น

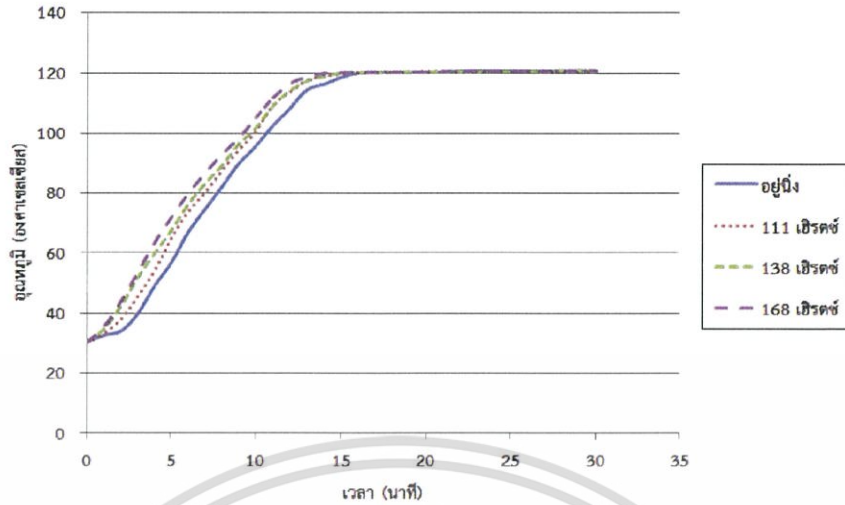


รูปที่ 6.9 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนที่การสันสะเทือน ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

6.2 ผลของระดับการสันสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก

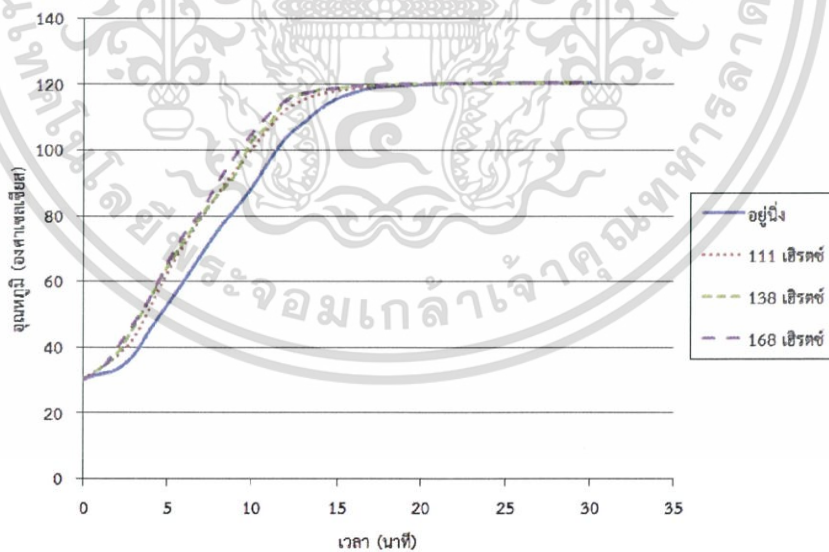
จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความถี่ในการสันสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีกว่าขณะอยู่นิ่งไม่มากนัก อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความถี่การสันสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลต่อการแทรกผ่านความร้อนไม่มากนัก ซึ่งสังเกตเห็นว่าแม้จะเพิ่มความถี่การสันสะเทือนมากขึ้นเท่าใด ลักษณะการแทรกผ่านความร้อนแตกต่างจากเดิมเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 20 วินาที

ระยะเวลา 20 วินาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนัก

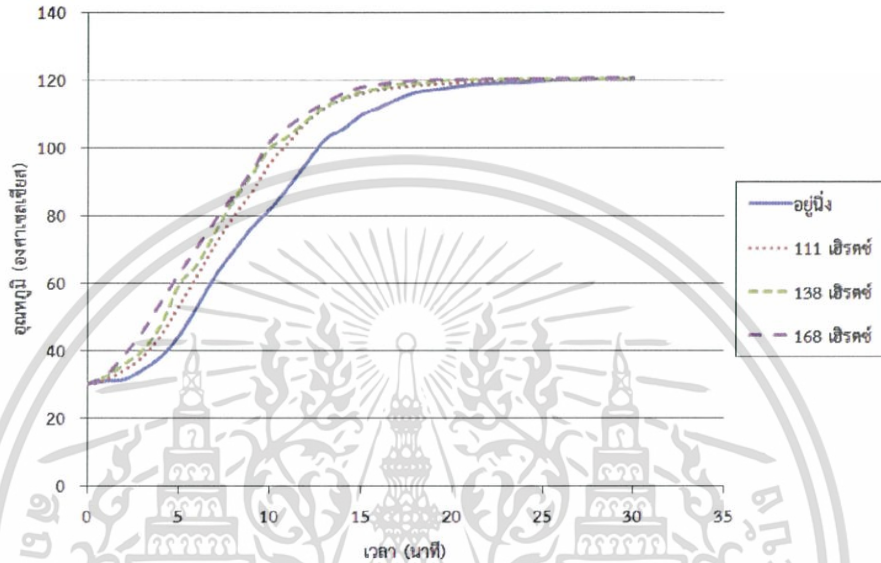
จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีขึ้น โดยถ้าเปรียบเทียบระหว่างการให้ความถี่กับสภาวะอยู่นิ่งมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันคือ ใช้เวลาน้อยลงเมื่อเพิ่มความเร็วการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยทุก ๆ ความถี่ มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 20 วินาที

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก

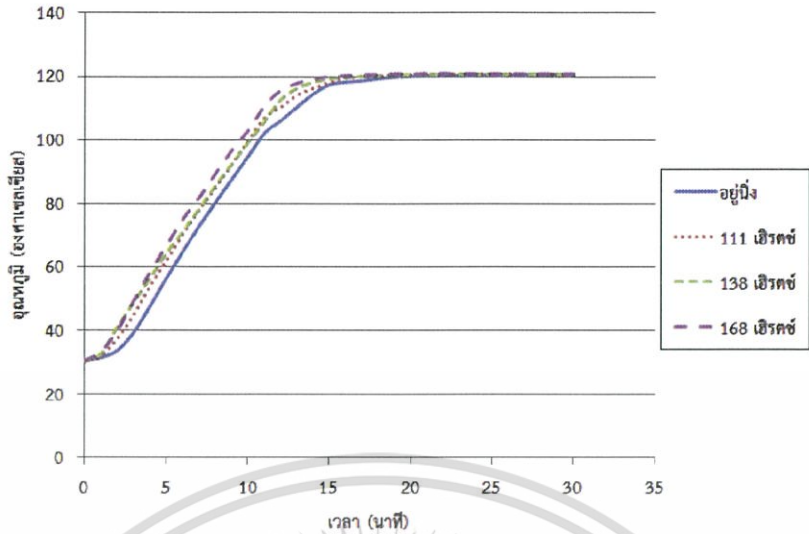
จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยถ้าเปรียบเทียบระหว่างการให้ความถี่กับสถานะอยู่นิ่งมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันคือ ใช้เวลาน้อยลงเมื่อเพิ่มความเร็วการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยทุก ๆ ความถี่มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก

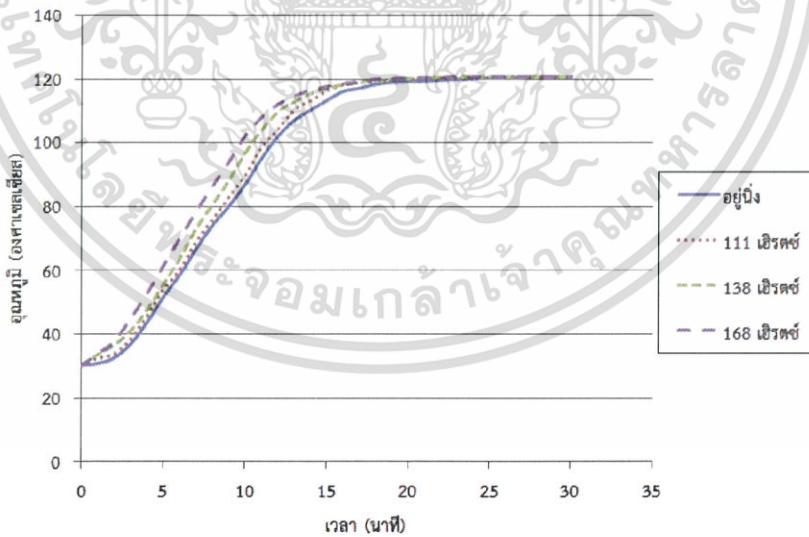
จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีกว่าขณะอยู่นิ่งไม่มากนัก อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความถี่การสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลต่อการแทรกผ่านความร้อนไม่มากนัก ซึ่งสังเกตเห็นว่าแม้จะเพิ่มความเร็วการสั่นสะเทือนมากขึ้นเท่าใด ลักษณะการแทรกผ่านความร้อนแตกต่างจากเดิมเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนัก

จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีขึ้น โดยถ้าเปรียบเทียบระหว่างการให้ความถี่กับสภาวะอยู่นิ่งมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันคือ ใช้เวลาน้อยลงเมื่อเพิ่มความถี่การสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในได้เพียงเล็กน้อย

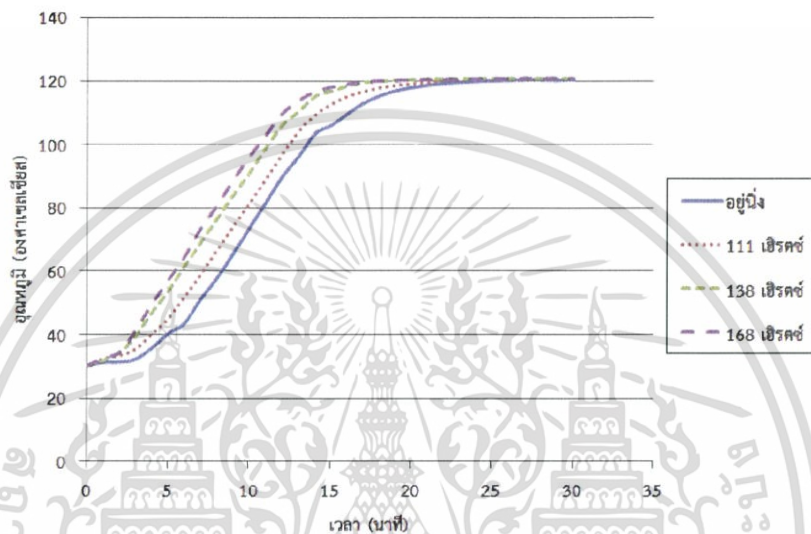


รูปที่ 6.14 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก

จากกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยถ้าเปรียบเทียบระหว่างการให้ความถี่กับสถานะอยู่นิ่งมีลักษณะกราฟที่แตกต่างกันคือ ใช้เวลาน้อยลงเมื่อเพิ่มความถี่การสั่นสะเทือนแก่น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในได้



รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบการแทรกผ่านความร้อนน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

พิจารณาผลของตัวแปรที่ทำการศึกษามีผลต่อค่า f_h

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า f_h กระจ่บองขนาด 20 ออนซ์

ความถี่ การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	20	40	60
อยู่นิ่ง	8.87	9.91	10.91
111	7.48	8.05	8.86
138	7.16	7.69	8.36
168	6.73	7.42	7.94

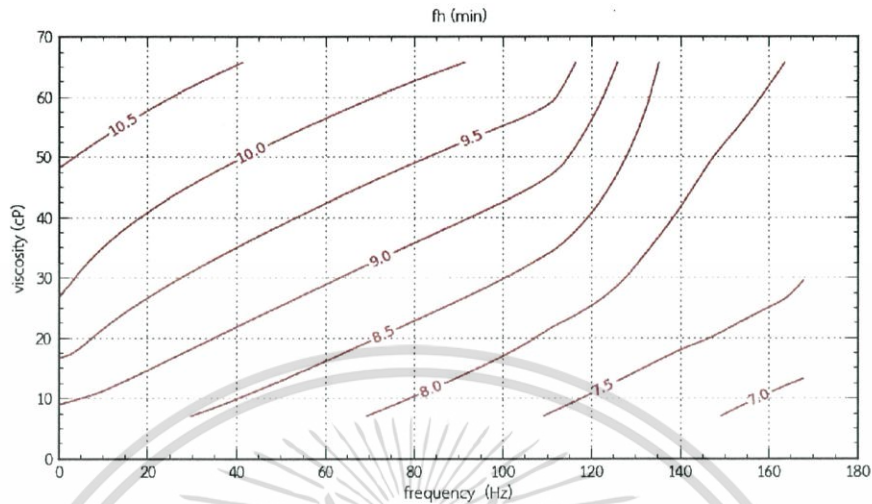
ตารางที่ 6.2 แสดงค่า f_h กระจ่บองขนาด 30 ออนซ์

ความถี่ การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	20	40	60
อยู่นิ่ง	9.51	11.08	12.71
111	7.74	9.31	10.46
138	7.35	8.31	10.24
168	6.92	8.02	9.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์



รูปที่ 6.16 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ ค่า f_h
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกัน ค่า f_h จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกัน ค่า f_h จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลง

สรุปคือ ค่า f_h จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ซึ่ง ค่า f_h จะเป็นค่าที่บอกถึงความเร็วในการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำ ซึ่งถ้ามีค่าน้อยก็แสดงว่ามี การเพิ่มอุณหภูมิที่เร็ว ซึ่งหมายถึงการแทรกผ่านความร้อนที่ดีด้วย

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถทำสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

$$f_h = 8.470 - 0.008f + 0.063\mu - 2.6e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 7.7e^{-5}f\mu ; R^2 = 0.96$$

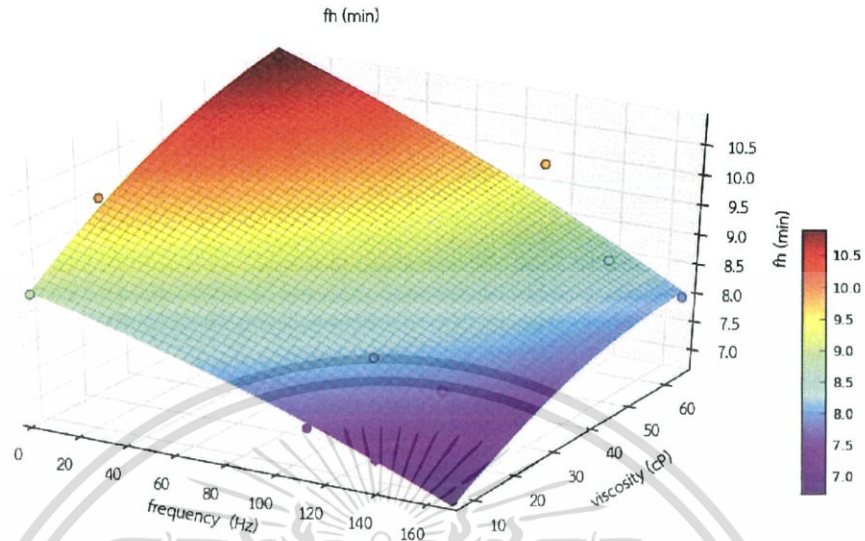
เมื่อ f_h = เวลา (นาทึ)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

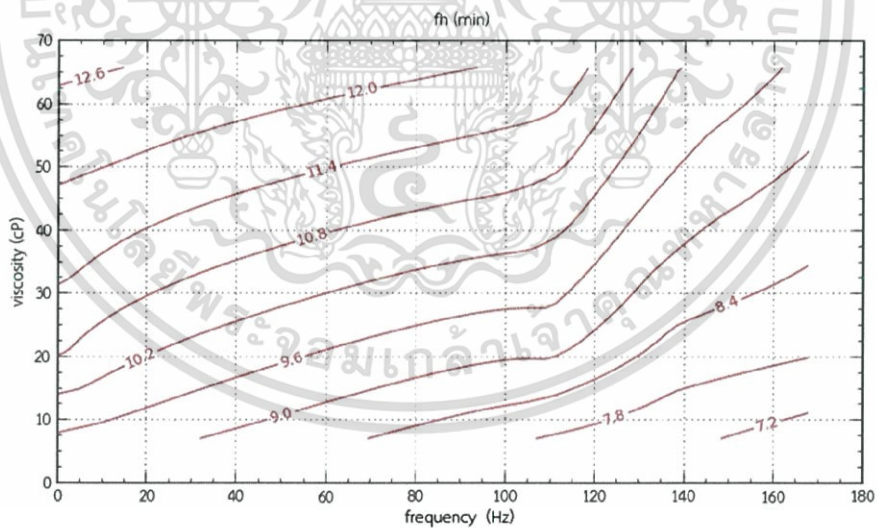
จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายค่า ความถี่ในการสั่นสะเทือน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า f_h ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ



รูปที่ 6.17 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์



รูปที่ 6.18 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ ค่า f_h

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกัน ค่า f_h จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกัน ค่า f_h จะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลง

สรุปคือ ค่า f_h จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ซึ่ง ค่า f_h จะเป็นค่าที่บอกถึงความเร็วในการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำ ซึ่งถ้ามีค่าน้อยก็แสดงว่ามีการเพิ่มอุณหภูมิที่เร็ว ซึ่งหมายถึงการแทรกผ่านความร้อนที่ดีได้ด้วย

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถทำสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

$$f_h = 8.804 - 0.006f + 0.104\mu - 6.5e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 3.9e^{-5}f\mu \quad ; R^2 = 0.97$$

เมื่อ f_h = เวลา (นาทีก)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายค่าความถี่ในการสั่นสะเทือน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า f_h ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ



รูปที่ 6.19 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า f_h กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลของตัวแปรที่ทำการศึกษาที่มีผลต่อค่า j

ตารางที่ 6.4 แสดงค่า j ของกระป๋องขนาด 20 ออนซ์

ความถี่ การสั้นสะเทือน (เฮิร์ตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	20	40	60
อยู่นิ่ง	1.31	1.37	1.38
111	1.27	1.31	1.32
138	1.24	1.25	1.28
168	1.21	1.24	1.29

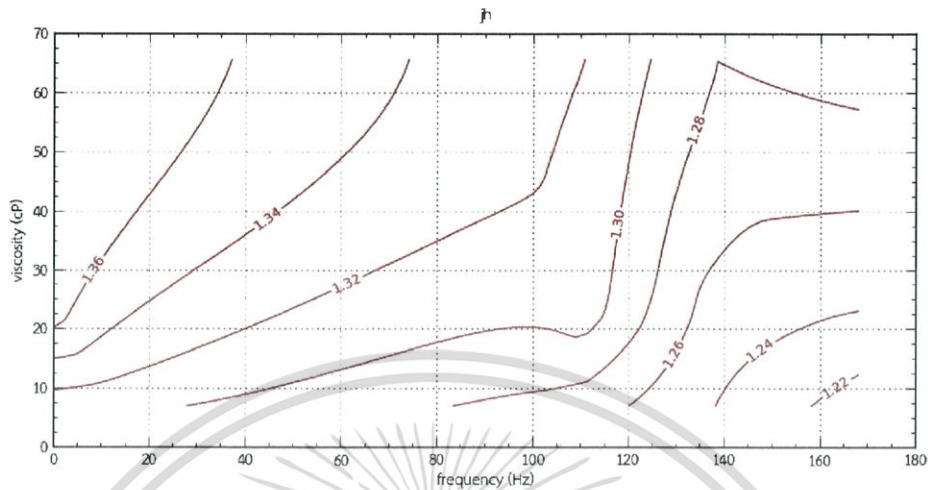
ตารางที่ 6.5 แสดงค่า j ของกระป๋องขนาด 30 ออนซ์

ความถี่ การสั้นสะเทือน (เฮิร์ตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	20	40	60
อยู่นิ่ง	1.35	1.38	1.39
111	1.31	1.33	1.34
138	1.28	1.31	1.3
168	1.21	1.28	1.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์



รูปที่ 6.20 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ ค่า j
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกัน ค่า j จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกัน ค่า j จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

สรุปคือ ค่า j จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง

โดยค่า j จะเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการถ่ายโอนความร้อน

$j = 1$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบพาความร้อน

$j = 2$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อน

$1 < j < 2$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบผสมระหว่างการพาความร้อนและนำความร้อน

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถทำสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

$$j = 1.304 - 0.001f + 0.003\mu - 1.9e^{-6}f^2 - 2.7e^{-5}\mu^2 + 5.38e^{-7}f\mu \quad ; R^2 = 0.93$$

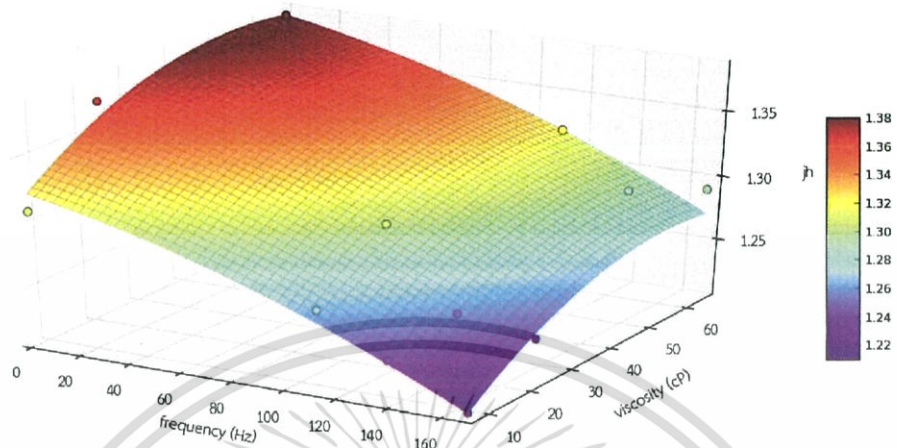
เมื่อ j = เวลา (นาทิจ)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายค่า ความถี่ในการสั่นสะเทือน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า j ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ

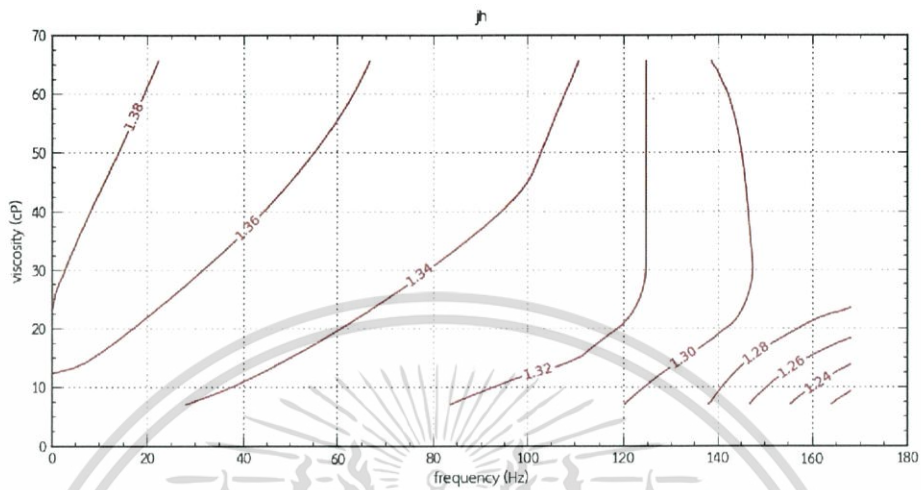


รูปที่ 6.21 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระบองขนาด 20 ออนซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ
กระป๋องขนาด 30 ออนซ์



รูปที่ 6.22 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j
กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ ค่า j
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกัน ค่า j จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกัน ค่า j จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

สรุปคือ ค่า j จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง

โดยค่า j จะเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการถ่ายโอนความร้อน

$j = 1$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบพาความร้อน

$j = 2$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อน

$1 < j < 2$ ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบผสมระหว่างการพาความร้อน
และนำความร้อน

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถทำสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

$$j = 1.328 - 1.51e^{-5}f + 0.003\mu - 4.4e^{-6}f^2 - 3.8e^{-5}\mu^2 + 1.31e^{-7}f\mu \quad ; R^2 = 0.95$$

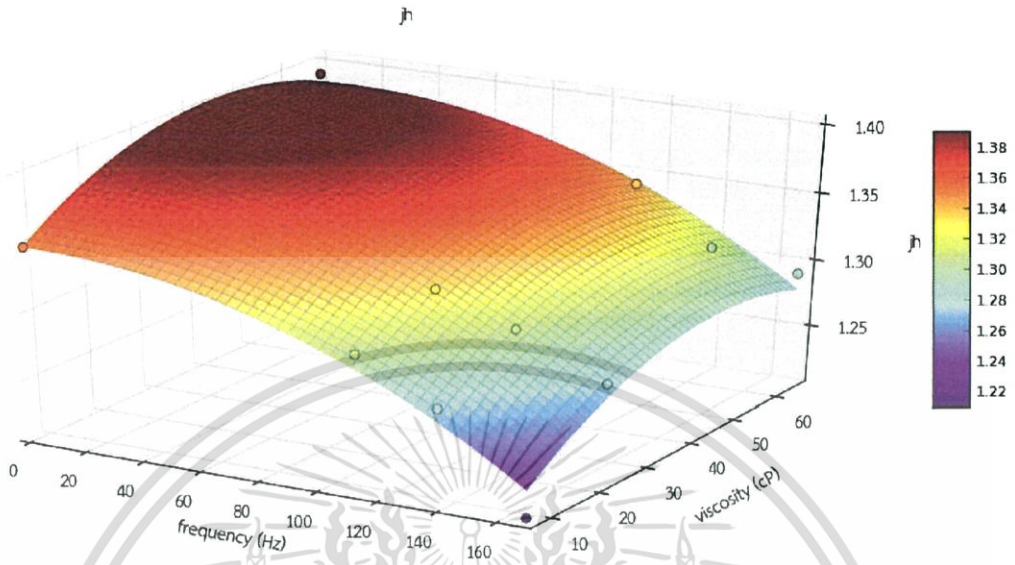
เมื่อ j = เวลา (นาทึ)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนาย ค่าความถี่ในการสั่นสะเทือน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า j ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ



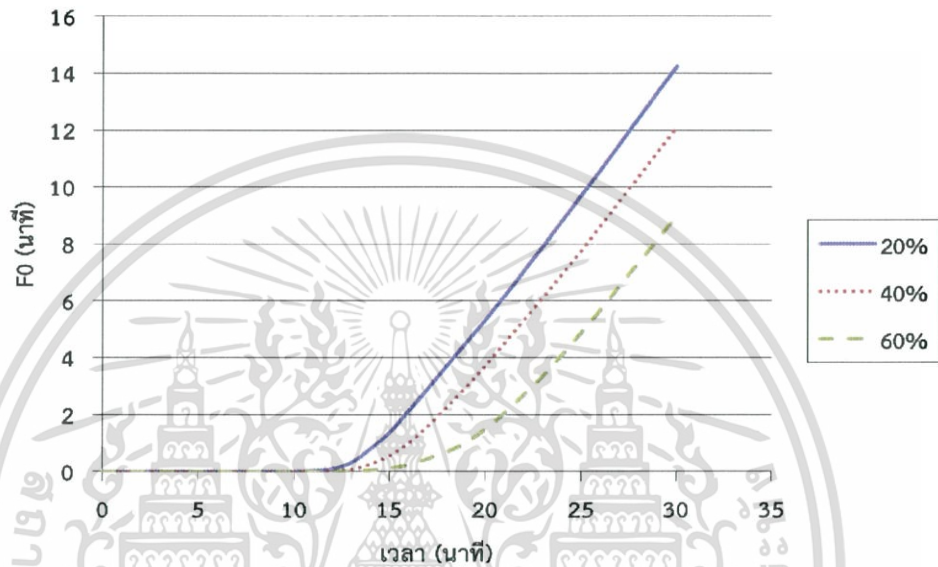
รูปที่ 6.23 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่า j กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อค่า F_0

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่สภาวะอยู่นิ่ง

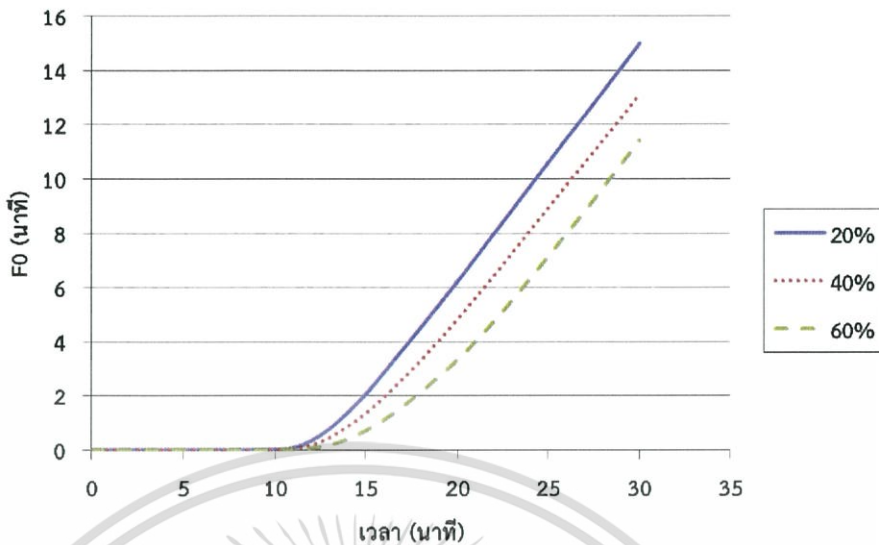
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21.0 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 23.5 นาที และ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 27.0 นาที



รูปที่ 6.24 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่สภาวะอยู่นิ่ง กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่ความถี่ 111 เฮิรตซ์

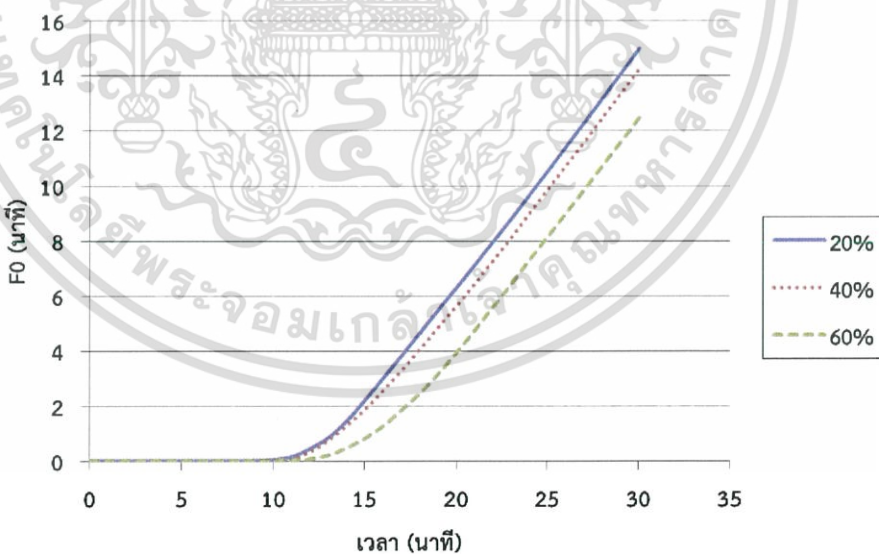
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 19.5 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21.5 นาที และ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 23.5 นาที



รูปที่ 6.25 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันสเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์
 ระยะเวลา 20 นาที

ระยะเวลา 20 นาที ที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์

จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาทื เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 19.5 นาทื น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 20.5 นาทื และ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 22.0 นาทื

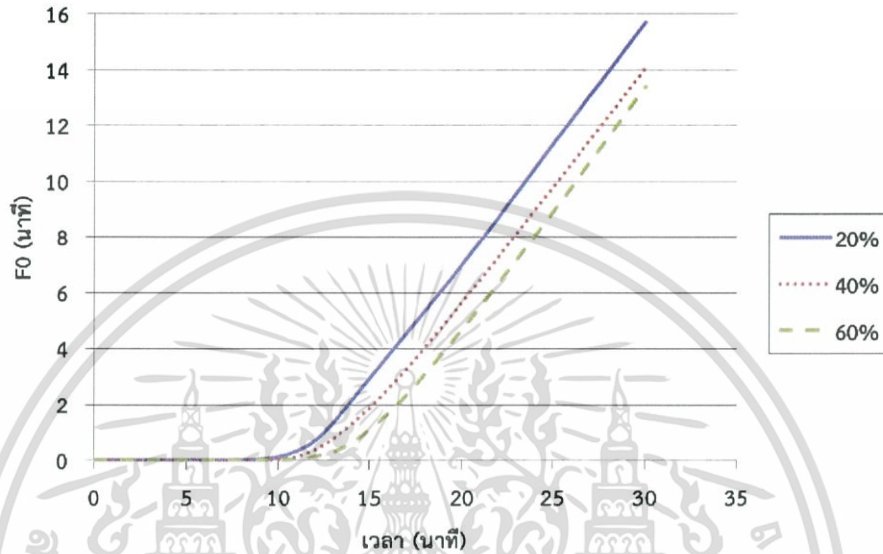


รูปที่ 6.26 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันสเทือน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์
 ระยะเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ ที่ความถี่ 168 เฮิรตซ์

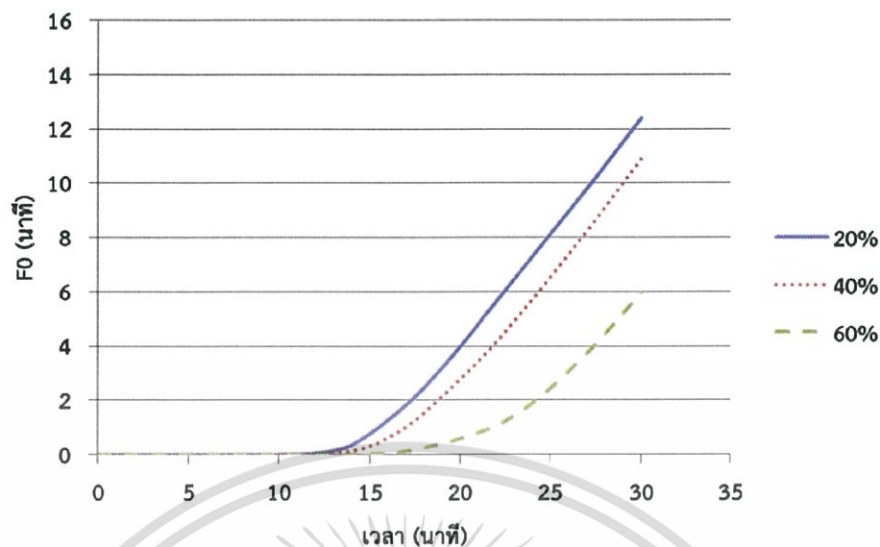
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที่ เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 18.5 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 20.0 นาทีและน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21.0 นาที



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันเสี้อ่อน ความถี่ 168 เฮิรตซ์ กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่สภาวะอยู่นิ่ง

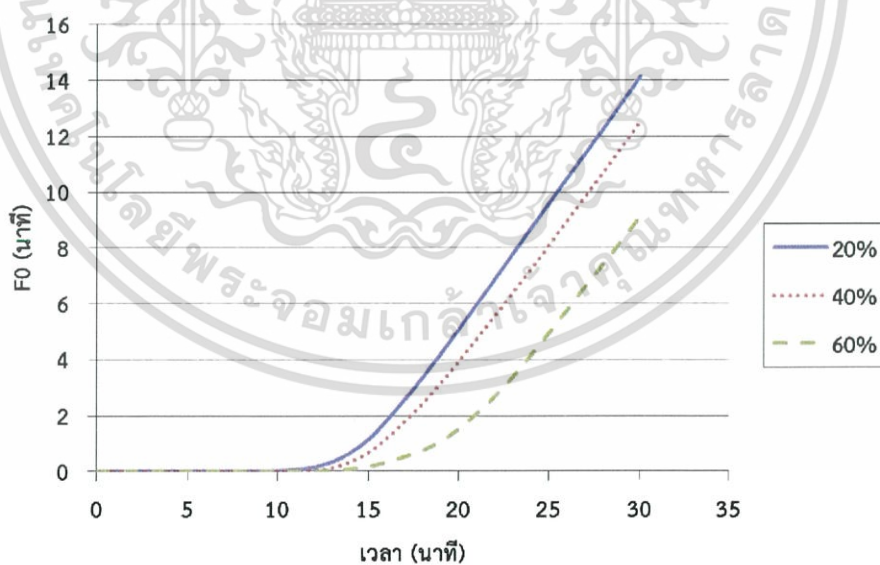
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที่ เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 22.5 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 25.0 นาทีและ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 29.5 นาที



รูปที่ 6.28 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่สภาวะอยู่หนึ่ง กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์

จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21.0 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 22.5 นาทีและ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 27.0 นาที

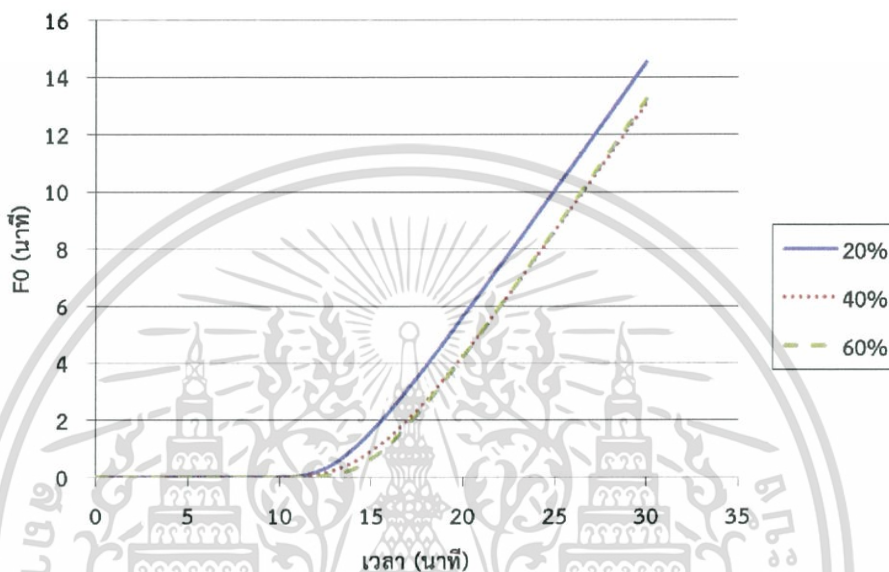


รูปที่ 6.29 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันเสเทือน ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์
กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์

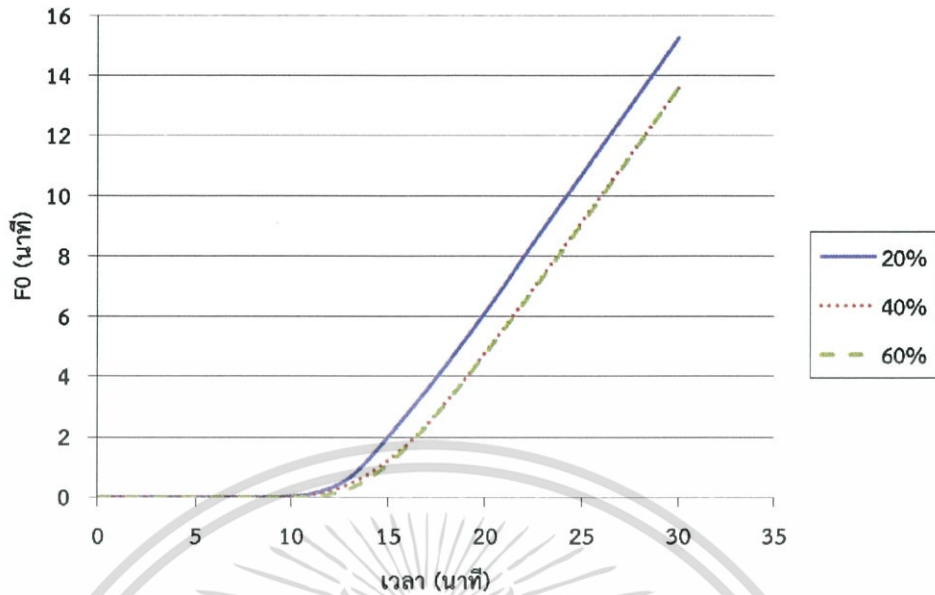
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 20.5 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 22.0 นาทีและ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 23.0 นาที



รูปที่ 6.30 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันเสทือน ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ ที่ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์

จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อความเข้มข้นน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ถึงค่าดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 20.0 นาที น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21นาทึและ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เวลาเท่ากับ 21.5 นาที

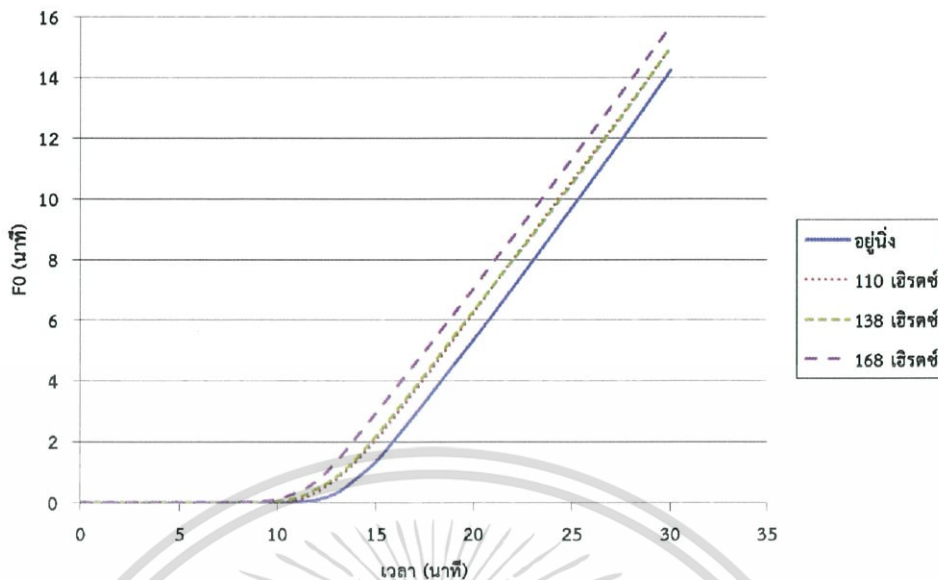


รูปที่ 6.31 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่การสันสะเทือน ความถี่ 168 เฮิรตซ์ ครอบงวนขนาด 30 ออนซ์

6.4 ผลของระดับการสันสะเทือน ที่มีผลต่อค่า F_0

ครอบงวนขนาด 20 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก

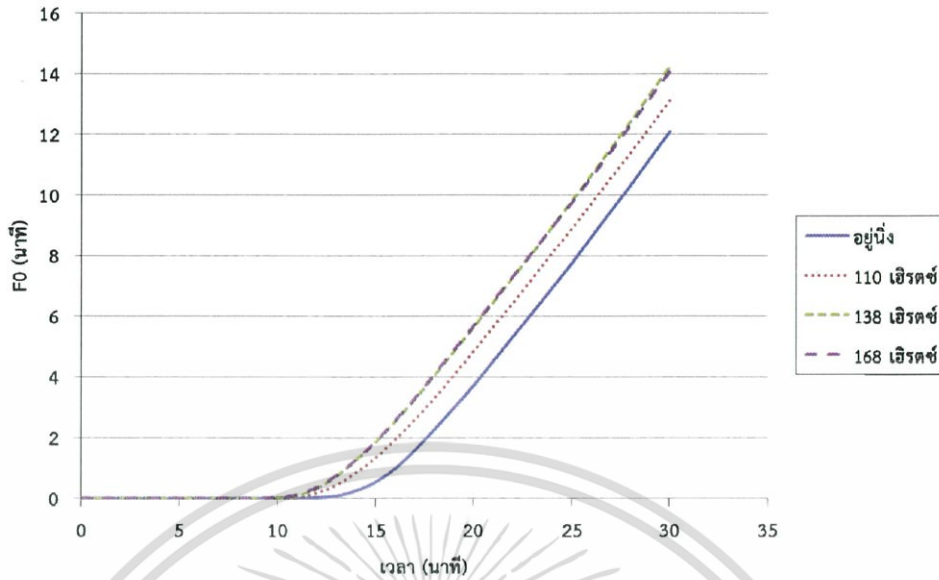
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสันสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่หนึ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสันสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่หนึ่งจะได้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 7.14 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 8.51 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 12.96 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.32 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนัก

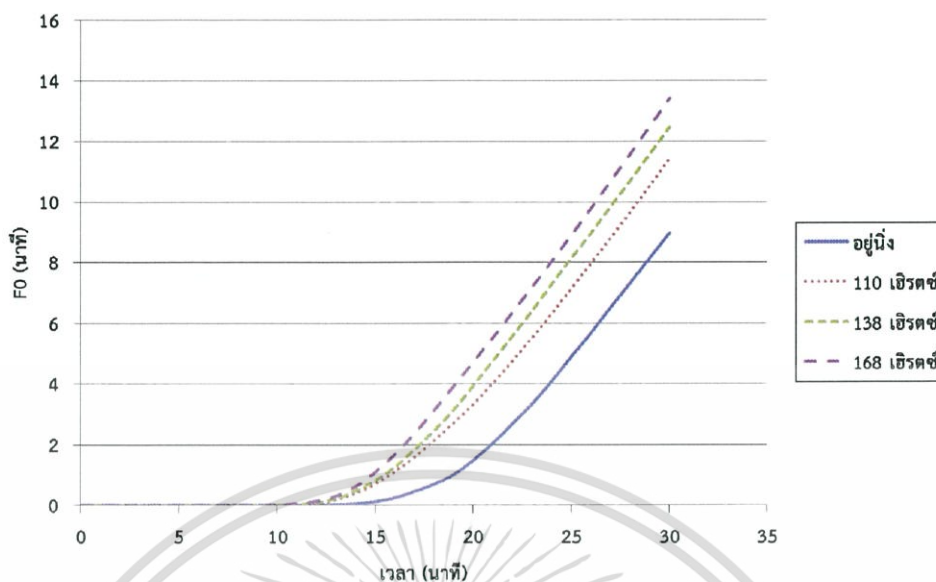
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสั่นสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งจะได้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 7.14 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 12.77 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 18.52 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.33 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก

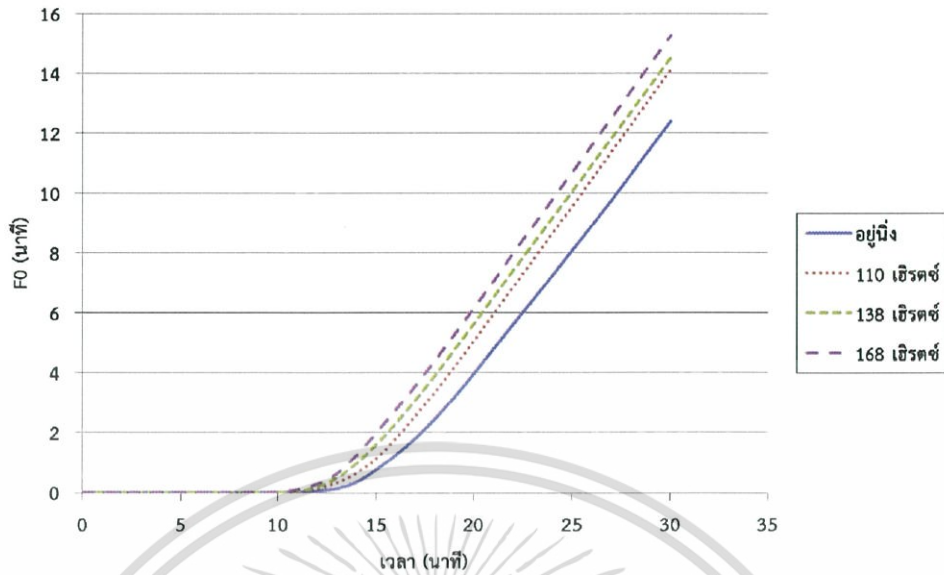
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสั่นสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งจะได้รับความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 11.90 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 14.89 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 22.22 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.34 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสันสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจกป้องกันขนาด 20 ออนซ์

กระจกป้องกันขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก

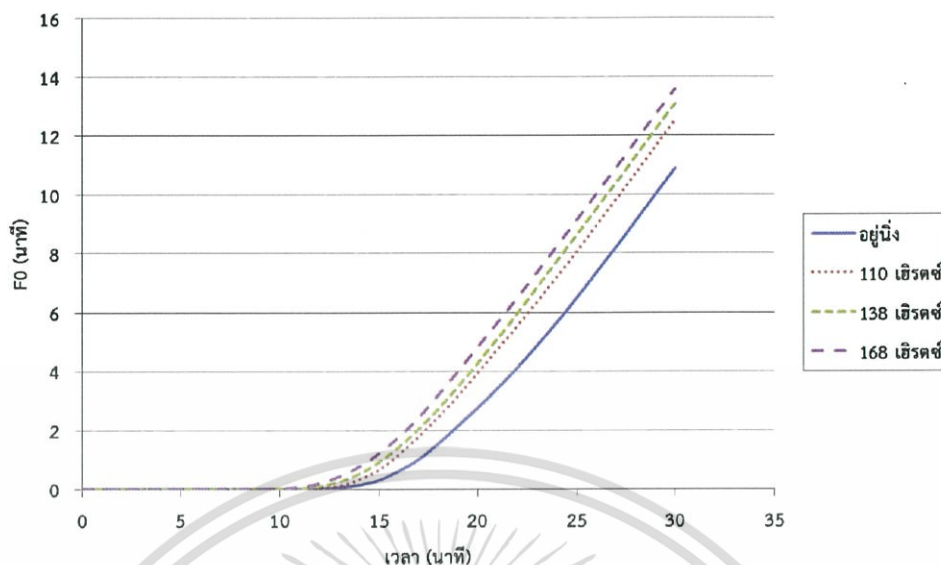
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสันสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสันสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระจกเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งจะได้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 6.67 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 10.00 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 10.17 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.35 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสันสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนัก

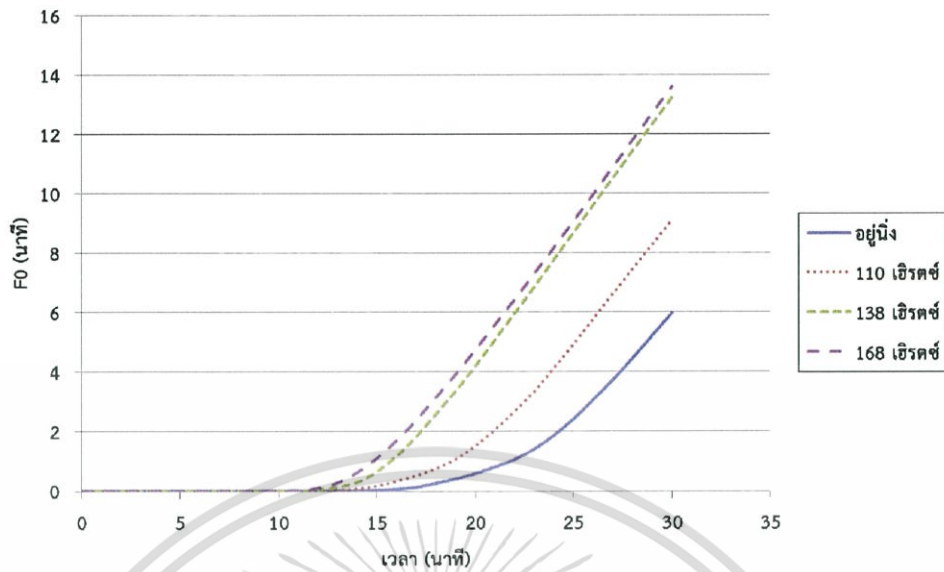
จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสันสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสันสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระป๋องเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งจะได้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 8.89 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 12.00 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิรตซ์ เร็วขึ้น 22.03 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.36 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระบอขนาด 30 ออนซ์

กระบอขนาด 30 ออนซ์ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 % โดยน้ำหนัก

จากกราฟจะเห็นว่าที่ F_0 เท่ากับ 6 นาที เมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นสะเทือนมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นาที เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง เนื่องจากเมื่อความถี่ในการสั่นสะเทือนสูงขึ้นทำให้ของเหลวภายในกระบอเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้นทำให้มีการแทรกผ่านความร้อนมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการเทียบกับสภาวะอยู่นิ่งจะได้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่จากน้อยไปมากดังนี้ ความถี่ 111 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 11.11 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 138 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 16.00 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 168 เฮิร์ตซ์ เร็วขึ้น 27.12 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.37 กราฟแสดงค่า F_0 กับเวลา ที่ความถี่ในการสันสะเทือนต่าง ๆ ของน้ำเชื่อม ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดงเวลาเป็นนาทีของน้ำเชื่อมที่ค่า F_0 เท่ากับ 6

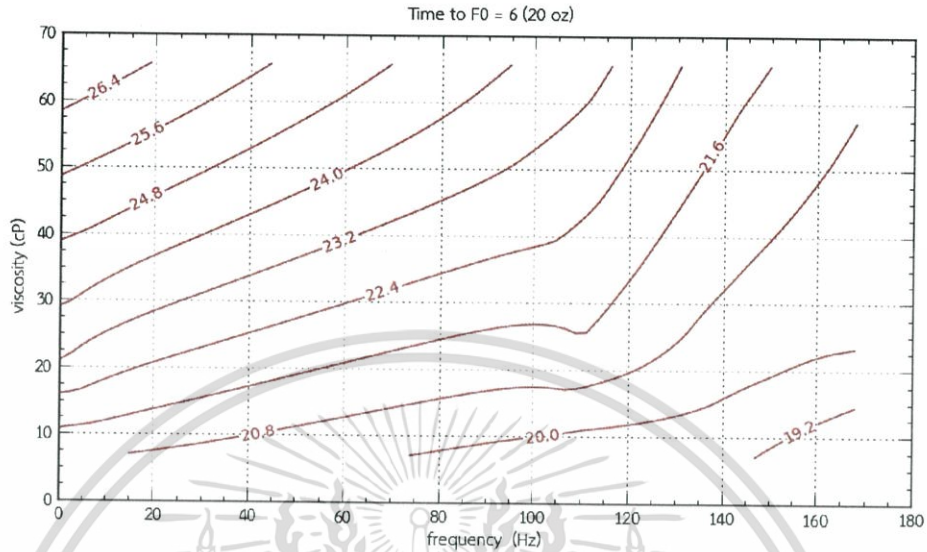
ความถี่การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)					
	กระป๋องขนาด 20 ออนซ์			กระป๋องขนาด 30 ออนซ์		
	20	40	60	20	40	60
อยู่นิ่ง	21.00	23.50	27.00	22.50	25.00	29.50
111	19.50	21.50	23.50	21.00	22.50	26.50
138	19.50	20.50	22.00	20.50	22.00	23.00
168	18.50	20.00	21.00	20.00	21.00	21.50

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของเวลาที่เร็วขึ้นที่ค่า F_0 เท่ากับ 6

ความถี่การสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)	ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)					
	กระป๋องขนาด 20 ออนซ์			กระป๋องขนาด 30 ออนซ์		
	20	40	60	20	40	60
111	7.14	8.51	12.96	6.67	10.00	10.17
138	7.14	12.77	18.52	8.89	12.00	22.03
168	11.90	14.89	22.22	11.11	16.00	27.12

หมายเหตุ F_0 เท่ากับ 6 ค่าเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับสภาวะอยู่นิ่ง

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ
กระป๋องขนาด 20 ออนซ์



รูปที่ 6.38 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกันค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกันค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

สรุปคือ ค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ซึ่งค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นี้สามารถทำให้เราทราบเวลาในการฆ่าเชื้อของสารละลาย โดยถ้ามีเวลาในการถึงค่า F_0 น้อย หมายถึงใช้เวลาในการฆ่าเชื่อน้อย หรือมีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีขึ้น

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถทำสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

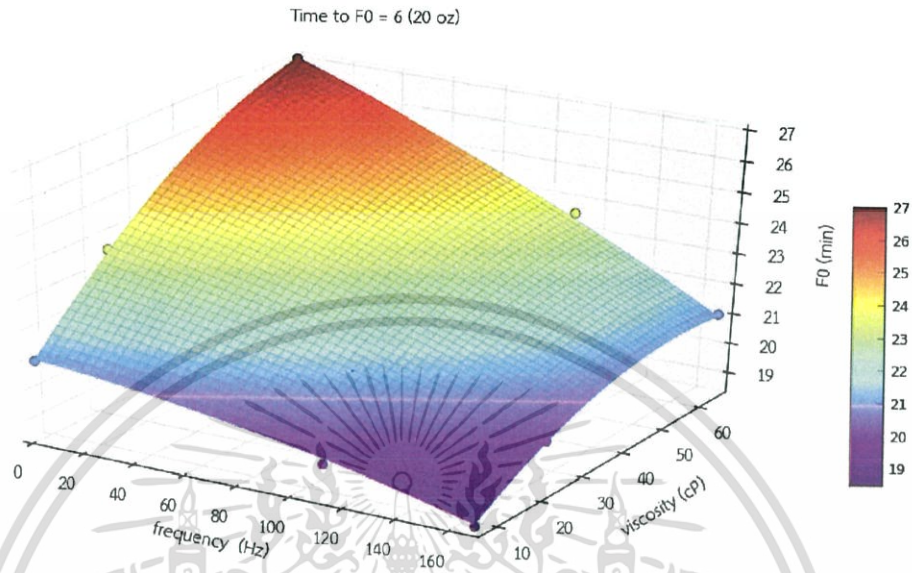
$$t = 19.821 - 0.005f + 0.179\mu - 4.5e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 3.7e^{-4}f\mu \quad ; R^2 = 0.99$$

เมื่อ t = เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 (นาที)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิร์ตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

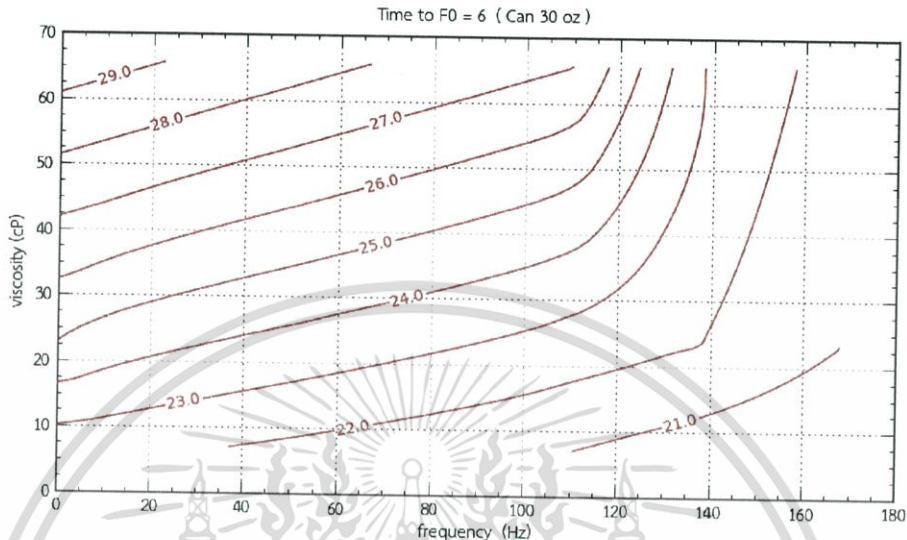
จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายค่าความถี่ในการสั่นสะเทือน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า เวลาเป็นนาที่ที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ



รูปที่ 6.39 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่าเวลาเป็นนาที่ที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 กระบอองขนาด 20 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลโดยกราฟ 3 มิติ
กระป๋องขนาด 30 ออนซ์



รูปที่ 6.40 กราฟ contour แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

จากกราฟ แกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ความหนืดของน้ำเชื่อม และ แกน z คือ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

ที่ความถี่เดียวกันค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น

ที่ความหนืดเดียวกันค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

สรุปคือ ค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ จะลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อความหนืดของน้ำเชื่อมลดลง ซึ่งค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 นี้สามารถทำให้เราทราบเวลาในการฆ่าเชื้อของสารละลาย โดยถ้ามีเวลาในการถึงค่า F_0 น้อย หมายถึงใช้เวลาในการฆ่าเชื่อน้อย หรือมีการแทรกผ่านความร้อนที่ดีขึ้น

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรได้ดังนี้

$$t = 21.091 - 0.011f + 0.178\mu - 1.4e^{-4}f^2 - 6.8e^{-4}\mu^2 - 5.4e^{-4}f\mu \quad ; R^2 = 0.95$$

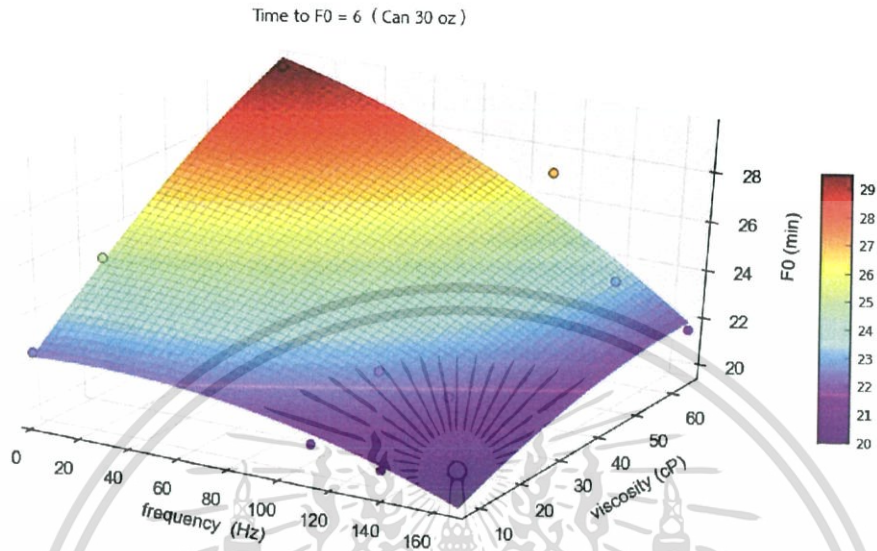
เมื่อ t = เวลาที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 (นาที)

f = ความถี่ในการสั่นสะเทือน (เฮิรตซ์)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายค่าความถี่ในการสั่นสะท้อน ค่าความหนืดของน้ำเชื่อม หรือค่า เวลาเป็นนาทีที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ได้เมื่อเราทราบตัวแปรอีก 2 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันในสมการ



รูปที่ 6.41 กราฟพื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำเชื่อม ความถี่ และค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

7.1 ผลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน

จากการทดลองพบว่าเมื่อน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การแทรกผ่านความร้อนจะลดลงตามลำดับ คือ 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งทุกการทดลองมีผลลัพธ์เหมือนกัน เมื่อพิจารณาจากค่า f_h พบว่าที่ความถี่การสั่นสะเทือนระดับเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่า f_h มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่า f_h จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุด ซึ่งถ้ามีค่า f_h ที่เพิ่มขึ้นจะแสดงถึงการแทรกผ่านความร้อนนั้นลดลง

7.2 ผลของความถี่การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการแทรกผ่านความร้อน

จากการทดลองพบว่าเมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น การแทรกผ่านความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับคือ อยู่เนิง 111 138 168 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ พิจารณาจากค่า f_h พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเดียวกัน เมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ค่า f_h มีแนวโน้มลดลง ซึ่งถ้ามีค่า f_h ที่ลดลงจะแสดงถึงการแทรกผ่านความร้อนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น

โดยจากผลการทดลอง การเพิ่มความถี่การสั่นสะเทือนให้แก่ น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้องมากกว่า 111 เฮิร์ตซ์เพื่อที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในของของเหลวได้นั่นคือ การเพิ่มความถี่จะส่งผลมากกว่าน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นน้อย แต่จะส่งผลน้อยต่อน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นมาก

7.3 ผลของความเข้มข้นที่มีต่อค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือการแทรกผ่านความร้อนจะมีค่าลดลงดังนี้คือ น้ำเชื่อมความเข้มข้น 20 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

7.4 ผลของความถี่การสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อมเดียวกัน เมื่อความถี่ในการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 มีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงว่ามีการแทรกผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นดังนี้ คือ อยู่เนิง 111 138 และ 168 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเทียบกับสถานะอยู่เนิงก็จะได้ผลสอดคล้องกัน คือ เมื่อความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่ากับน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเร็วที่เพิ่มขึ้น 27.12 เปอร์เซ็นต์

เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 เป็นค่าที่บ่งบอกถึง เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ซึ่งถ้าสามารถลดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อลงได้จะทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลงได้ รวมทั้งเป็นการช่วยให้อาหารยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการ และ เนื้อสัมผัสของอาหารได้อีกด้วย

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1. ค่าความถี่การสันสะเทือน ความหนืดของน้ำเชื่อม และค่า f_h ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้
กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

$$f_h = 8.470 - 0.008f + 0.063\mu - 2.6e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 7.7e^{-5}f\mu \quad ; R^2 = 0.96$$

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

$$f_h = 8.804 - 0.006f + 0.104\mu - 6.5e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 3.9e^{-5}f\mu \quad ; R^2 = 0.97$$

2. ค่าความถี่การสันสะเทือน ความหนืดของน้ำเชื่อม และเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

$$t = 19.821 - 0.005f + 0.179\mu - 4.5e^{-5}f^2 - 0.001\mu^2 - 3.7e^{-4}f\mu \quad ; R^2 = 0.99$$

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

$$t = 21.091 - 0.011f + 0.178\mu - 1.4e^{-4}f^2 - 6.8e^{-4}\mu^2 - 5.4e^{-4}f\mu \quad ; R^2 = 0.95$$

3. ค่าความถี่การสันสะเทือน ความหนืดของน้ำเชื่อม และค่า j ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

กระป๋องขนาด 20 ออนซ์

$$j = 1.304 - 0.001f + 0.003\mu - 1.9e^{-6}f^2 - 2.7e^{-5}\mu^2 + 5.38e^{-7}f\mu \quad ; R^2 = 0.93$$

กระป๋องขนาด 30 ออนซ์

$$j = 1.328 - 1.51e^{-5}f + 0.003\mu - 4.4e^{-6}f^2 - 3.8e^{-5}\mu^2 + 1.31e^{-7}f\mu \quad ; R^2 = 0.95$$

ค่า j เป็นดัชนีที่บ่งบอกลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของอาหารกระป๋อง จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ในการคำนวณค่าความถี่การสันสะเทือนที่เหมาะสมเพื่อให้อาหารกระป๋องมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว ค่า f_h และ ค่าเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการถึงค่า F_0 เท่ากับ 6 มีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการคำนวณกำลังการผลิต วางแผนการผลิตเพื่อให้ทราบระดับการสันสะเทือนที่เท่าไรเพื่อให้ได้ปริมาณการผลิตตามความต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] เมธิรา ถาวรสุขศิริ, วลัยพร รักพุดชา, อุดุลย์ แซ่แล้ว, 2550, อิทธิพลของการเขย่าที่มีต่อการแทรกผ่านความร้อนภายในกระป๋องขณะฆ่าเชื้อ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] วิไล รังสาดทอง. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพมหานคร. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัลพับลิเคชั่น; 2543.
- [3] วินัย เวชวิทยาขลัง. เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสิ้นสเทือนเพื่องานบำรุงรักษา. กรุงเทพมหานคร. บริษัทเอ็นแอนด์อี; 2552.
- [4] "การแปรรูปอาหารด้วยความร้อน Thermal processing." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0528/thermal-processing> สืบค้น 1 มกราคม 2558.
- [5] Ali, A. A. , Sudhir, H. and Srinvasa Gopal, T.K. (2006). Effect of rotation on the heat penetration characteristics of thermally processed tuna in oil in retort pouches. *International Journal Food Science and Technology*, Vol. 41, pages 215-219.
- [6] Anubhav, PS. Anika, S and Ramaswamy, HS. (2014). Modification of a static steam retort for evaluating heat transfer under reciprocation agitation thermal processing. *International Journal Food Science and Technology*, Vol. 153, pages 63-72.
- [7] Dwivedi, M and Ramaswamy, HS. (2010). Comparison of heat transfer rate during thermal processing under end-over-end and axial modes of rotation, *LWT-Food Science and Technology*, vol. 43(2), March 2010, pp 350-360.
- [8] Meng, Y. and Ramaswamy, HS. 2006. Heat transfer in a canned particle in Newtonian fluid system during end-over-end rotation. *Journal of food Engineering*, Vol. 30, pages 643-658
- [9] Meng, Y. and Ramaswamy, HS. 2007. Effect of system variables on heat transfer to canned particulate non-Newtonian fluids during end-over-end rotation. *Trans Cheme*, Vol. 85, pages 34-41
- [10] "การผลิตผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง canning." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0220/canning> สืบค้น 1 เมษายน 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 307×409 ที่ระดับการสันสะท้อนสถานะอยู่หนึ่ง

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.4	30.5	30.4	30.4
1	31.1	32.6	31.9	31.1
2	31.5	34.1	33.4	31.5
3	34.4	39.9	37.8	34.4
4	38.3	49.2	45.7	38.3
5	44.6	56.7	52.8	44.6
6	53.4	66.8	60.2	53.4
7	62.5	74.6	68.1	62.5
8	69.7	82.1	75.6	69.7
9	76.7	89.9	82	76.7
10	82.1	95.7	88.5	82.1
11	88.7	102.5	96.5	88.7
12	95.8	108.2	103.7	95.8
13	102.6	114.3	108.2	102.6
14	105.6	116.2	112.6	105.6
15	109.7	118.5	115.7	109.7
16	111.9	119.9	117.5	111.9
17	114.4	120.1	118.9	114.4
18	116.4	120.2	119.4	116.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
19	117.1	120.2	119.6	117.1
20	117.9	120.2	119.8	117.9
21	118.6	120.3	120.1	118.6
22	119.0	120.5	120.2	119.0
23	119.2	120.6	120.2	119.2
24	119.3	120.6	120.2	119.3
25	119.8	120.6	120.3	119.8
26	120.1	120.6	120.5	120.1
27	120.1	120.6	120.4	120.1
28	120.3	120.7	120.4	120.3
29	120.2	120.7	120.5	120.2
30	120.2	120.7	120.5	120.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 307×409 ที่ระดับการสันสะท้อน 111 เฮิร์ตซ์

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.4	30.3	30.2
1	42.0	33.3	33.9	31.5
2	52.2	38.0	37.5	34.3
3	61.6	45.6	42.9	38.3
4	70.9	54.1	52.6	44.6
5	78.9	64.7	62.4	53.4
6	84.3	73.6	71.2	62.5
7	93.0	80.1	79.3	71.7
8	99.8	87.3	86.7	79.8
9	105.5	94.4	93.5	87.2
10	112.1	100.5	100.2	95.7
11	118.3	109.3	106.7	101.7
12	120.9	113.5	112.3	107.8
13	121.0	117.5	115.4	111.9
14	121.0	118.8	117.1	114.4
15	121.0	119.5	118.0	116.0
16	120.9	120.1	118.8	117.1
17	120.8	120.3	119.3	117.9
18	120.9	120.3	119.5	118.4
19	120.9	120.4	119.9	118.8
20	120.9	120.5	120.1	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.5	120.1	119.5
22	120.8	120.5	120.1	119.7
23	120.9	120.5	120.3	120.0
24	120.9	120.5	120.3	120.1
25	120.9	120.5	120.3	120.2
26	120.9	120.5	120.3	120.3
27	120.9	120.5	120.3	120.3
28	120.9	120.5	120.3	120.5
29	120.9	120.6	120.3	120.5
30	120.9	120.6	120.5	120.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 307×409 ที่ระดับการสันสะท้อน 138 เอิร์ตซ์

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.2	30.5	30.5	30.4
1	40.2	34.8	33.7	32.5
2	52.5	42.5	38.3	36.1
3	64.6	51.9	46.4	40.2
4	72.9	59.9	55.2	47.7
5	78.9	67.4	64.3	59.7
6	86.3	76.1	72.5	65.8
7	93.0	83.1	79.9	75.4
8	99.8	89.1	86.5	84.7
9	105.5	96.4	92.4	92.4
10	112.1	101.7	102.8	100.1
11	118.3	109.0	107.7	103.6
12	120.9	114.0	115.4	108.3
13	121.0	117.3	117.2	112.2
14	121.0	118.8	118.3	114.7
15	121.0	119.9	118.8	116.5
16	120.9	120.1	119.4	117.5
17	120.8	120.2	119.7	118.7
18	120.9	120.3	120.0	119.0
19	120.9	120.3	120.1	119.5
20	120.9	120.3	120.1	120.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.3	120.2	120.2
22	120.8	120.3	120.3	120.3
23	120.9	120.3	120.3	120.3
24	120.9	120.4	120.5	120.5
25	120.9	120.5	120.5	120.4
26	120.9	120.5	120.4	120.3
27	120.9	120.6	120.5	120.5
28	120.9	120.6	120.6	120.5
29	120.9	120.7	120.6	120.5
30	120.8	120.7	120.6	120.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 307×409 ที่ระดับการสันสะท้อน 168 เอิร์ตซ์

เวลา (นาทีก)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.4	30.4	30.1
1	42.0	35.6	33.3	32.9
2	52.2	44.2	40.0	38.9
3	61.6	53.7	47.5	45.7
4	70.9	63.5	55.4	54.6
5	78.9	71.8	65.4	63.0
6	85.4	79.7	74.5	71.0
7	93.0	86.6	81.2	78.9
8	99.6	92.9	90.2	86.0
9	105.5	98.3	98.2	93.5
10	112.1	105.2	104.8	102.1
11	118.3	111.6	110.9	106.5
12	120.9	116.3	115.0	110.3
13	121.0	118.6	117.1	113.3
14	121.0	119.8	118.2	116.1
15	121.0	120.0	118.8	117.9
16	120.9	120.2	119.5	118.7
17	120.8	120.2	119.7	119.5
18	120.9	120.2	120.1	119.9
19	120.9	120.2	120.1	120.1
20	120.9	120.3	120.1	120.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.4	120.2	120.2
22	120.8	120.3	120.2	120.3
23	120.9	120.5	120.3	120.3
24	120.9	120.5	120.3	120.4
25	120.9	120.5	120.2	120.4
26	120.9	120.5	120.3	120.6
27	120.9	120.5	120.4	120.6
28	120.9	120.5	120.5	120.7
29	120.9	120.5	120.5	120.7
30	120.9	120.6	120.5	120.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 401×411 ที่ระดับการสันสะท้อนที่สภาวะอยู่นิ่ง

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.3	30.2	30.3
1	42.0	31.4	30.7	31.2
2	52.2	33.6	32.5	31.3
3	61.6	39.3	36.8	32.2
4	70.9	47.6	43.5	35.7
5	78.9	56.5	51.6	40.2
6	85.4	65.0	58.7	43.3
7	93.0	73.0	66.8	50.7
8	99.6	80.6	74.3	57.4
9	105.5	87.8	80.2	65.2
10	112.1	95.0	87.1	73.4
11	118.3	102.2	95.2	81.6
12	120.9	106.0	102.0	89.7
13	121.0	110.3	107	96.2
14	121.0	114.5	110.2	103.2
15	121.0	117.3	113.2	105.8
16	120.9	118.1	116.0	109.4
17	120.8	118.5	117.0	112.8
18	120.9	119.2	118.3	115.1
19	120.9	119.7	118.9	116.7
20	120.9	120.0	119.1	117.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.2	119.2	118.5
22	120.8	120.3	119.6	119.1
23	120.9	120.2	119.9	119.4
24	120.9	120.3	120.1	119.7
25	120.9	120.4	120.3	119.9
26	120.9	120.3	120.4	120.1
27	120.9	120.4	120.5	120.2
28	120.9	120.5	120.6	120.2
29	120.9	120.5	120.6	120.1
30	120.9	120.5	120.6	120.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 401×411 ที่ระดับการสันสะท้อน 111 เฮิร์ตซ์

เวลา (นาทีก)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.2	30.5	30.3
1	42.0	31.9	32.4	32.4
2	52.2	37.3	33.8	33.3
3	61.6	44.8	38.3	35.5
4	70.9	53.8	45.6	40.1
5	78.9	61.9	53.9	44.8
6	85.4	70.3	60.2	51.5
7	93.0	78.0	69.0	58.3
8	99.6	85.2	76.0	66.1
9	105.5	92.5	83.0	73.6
10	112.1	99.8	89.8	81.1
11	118.3	107.0	98.6	88.8
12	120.9	110.2	104.1	96.7
13	121.0	114.0	110.2	104
14	121.0	116.2	113.1	109
15	121.0	118.0	116.2	112.5
16	120.9	119.4	118.2	114.9
17	120.8	119.8	118.9	116.5
18	120.9	120.1	119.2	117.7
19	120.9	120.3	119.7	118.4
20	120.9	120.5	120.0	119.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.6	120.1	119.4
22	120.8	120.6	120.2	120.0
23	120.9	120.7	120.3	120.1
24	120.9	120.7	120.3	120.3
25	120.9	120.7	120.5	120.4
26	120.9	120.7	120.6	120.3
27	120.9	120.7	120.6	120.3
28	120.9	120.7	120.6	120.4
29	120.9	120.7	120.6	120.5
30	120.9	120.7	120.6	120.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 401×411 ที่ระดับการสันสะเทือน 138 เฮิร์ตซ์

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.2	30.3	30.1
1	42.0	32.5	33.5	31.8
2	52.2	41.0	36.6	34.4
3	61.6	48.7	40.9	39.5
4	70.9	56.3	47.5	46.9
5	78.9	64.3	55.5	53.4
6	85.4	71.1	63.9	61.2
7	93.0	78.3	73.1	68.5
8	99.6	85.8	80.9	76.1
9	105.5	92.5	88.4	83.6
10	112.1	99.3	97.0	90.8
11	118.3	105.9	104.1	98.8
12	120.9	112.6	109.7	105.9
13	121.0	116.2	112.9	110.2
14	121.0	118.1	115.4	115
15	121.0	119.1	117.1	116.6
16	120.9	119.6	118.1	118.3
17	120.8	120.0	118.9	119.4
18	120.9	120.2	119.4	119.8
19	120.9	120.4	119.9	120.1
20	120.9	120.5	120.1	120.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.5	120.3	120.5
22	120.8	120.6	120.5	120.6
23	120.9	120.6	120.6	120.6
24	120.9	120.6	120.6	120.7
25	120.9	120.6	120.6	120.7
26	120.9	120.6	120.6	120.7
27	120.9	120.6	120.6	120.7
28	120.9	120.6	120.6	120.7
29	120.9	120.6	120.6	120.7
30	120.9	120.6	120.6	120.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของกระป๋อง 401×411 ที่ระดับการสันสะท้อน 168 เฮิร์ตซ์

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
0	30.5	30.5	30.2	30.1
1	42.0	33.2	33.8	32.5
2	52.2	39.9	37.7	34.4
3	61.6	49.2	44.8	41.5
4	70.9	58.3	52.6	49.6
5	78.9	66.8	61.4	57.0
6	85.4	75.1	70.1	64.2
7	93.0	81.9	78.5	72.9
8	99.6	89.7	86.6	80.3
9	105.5	96.9	94.2	88.4
10	112.1	103.1	102.3	96.0
11	118.3	110.8	108.1	102.8
12	120.9	115.5	112.0	109.5
13	121.0	117.7	114.6	113.7
14	121.0	119.1	116.4	116.4
15	121.0	119.8	117.6	117.9
16	120.9	120.2	118.5	118.9
17	120.8	120.4	119.2	119.5
18	120.9	120.5	119.9	119.9
19	120.9	120.7	120.1	120.1
20	120.9	120.7	120.3	120.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาที)	อากาศ	20%	40%	60%
21	120.8	120.8	120.3	120.3
22	120.8	120.8	120.4	120.4
23	120.9	120.7	120.5	120.5
24	120.9	120.7	120.6	120.5
25	120.9	120.7	120.6	120.6
26	120.9	120.7	120.6	120.6
27	120.9	120.7	120.6	120.7
28	120.9	120.7	120.6	120.7
29	120.9	120.7	120.6	120.7
30	120.9	120.7	120.6	120.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้