

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิคที่มีต่อคุณภาพกุ้งขาว

STUDY ON EFFECT OF HEATING WITH ULTRASONIC WAVES

IN WHITE SHRIMPS PROPERTIES



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72062  
วัน,เดือน,ปี..... - ๘ ส.ย. 2550

b. 117 b31bA  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อคุณภาพกุ้งขาว

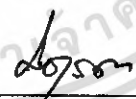
STUDY ON EFFECT OF HEATING WITH ULTRASONIC WAVES

IN WHITE SHRIMPS PROPERTIES

ผู้จัดทำ

- |                  |                |                       |
|------------------|----------------|-----------------------|
| 1. นางสาวแคทลียา | อัสน์รัตนะ     | รหัสนักศึกษา 46010087 |
| 2. นางสาวพิฤดี   | สว่างสมุทรัชย์ | รหัสนักศึกษา 46010530 |
| 3. นายอภิชาติ    | อรุณนวล        | รหัสนักศึกษา 46010918 |

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์)

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์มธุรดา จิโนรส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่มีผลต่อคุณภาพกุ้งขาว		
นักศึกษา	นางสาวแคทลียา	อัสน์รัตนะ	รหัสนักศึกษา 46010087
	นางสาวพิฤดี	สว่างสมุทรชัย	รหัสนักศึกษา 46010530
	นาย อภิชาติ	อรุณนวล	รหัสนักศึกษา 46010918
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร		
ปีการศึกษา	2549		
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์มธุรดา จิโนรส		

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำเอาคลื่นอุลตราโซนิกมาประยุกต์กับงานแปรรูปอาหารมากขึ้นตามลำดับ โครงการนี้จึงได้แนวคิดเพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อคุณภาพของกุ้งขาว เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนแบบธรรมดาที่ไม่ใช้คลื่นความถี่ สภาวะตัวแปรระหว่างการให้ความร้อน ประกอบด้วย เวลาในการให้ความร้อน (0-4 นาที) อุณหภูมิในการให้ความร้อน (60-100°C) และความถี่คลื่นอุลตราโซนิก (0.28 และ 40 KHz) กุ้งขาวหลังผ่านการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณความชื้นในตัวกุ้ง การเปลี่ยนแปลงปริมาณเนื้อสัมผัส ค่าสี และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ จากการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนกุ้งขาวร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีผลที่แตกต่างจากการให้ความร้อนแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก กล่าวคือ การให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร, ค่าความสว่าง(L) และการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าการให้ความร้อนที่ไม่ใช้คลื่นความถี่ร่วมด้วย แต่ปริมาณความชื้นในตัวกุ้ง, ค่าความเป็นสีแดง (a) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสขึ้นอยู่กับผลกระทบรวมกันของอุณหภูมิในการให้ความร้อน เวลาในการให้ความร้อนและความถี่คลื่นอุลตราโซนิก ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าพบว่าการให้ความร้อนโดยไม่ใช้คลื่นความถี่อุลตราโซนิกร่วมจะสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด ขณะที่การให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่ 40 KHz สิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุด

Thesis	Study on Effect of Heating with Ultrasonic Waves in White Shrimps Properties		
Student	Miss Cattleya Asaratana	Student ID	46010087
	Miss Piruedee Sawangsamutchai	Student ID	46010530
	Mr. Apichart Aroonual	Student ID	46010918
Degree	Bachelor of Engineering		
Programme	Food Engineering		
Year	2006		
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong Miss Maturada Jinorose		

## ABSTRACT

Nowadays, Ultrasonic wave has been increasingly applied in food process. In this project, a comparative study of the heating process of white shrimps with ultrasonic wave and without ultrasonic wave were investigated. Shrimps were immersed into water at different temperatures (60-100 °C) with duration ranging from 0 to 4 minutes and treated with 28 and 40 kHz and without ultrasonic wave. Changes in shrimp such as moisture content, weight loss, volume, color, texture and energy consumption were determined for each treatment. The results showed that changes in L-value, volume, weight loss and energy consumption in shrimp that immersed with ultrasonic wave were less than those that heating without ultrasonic wave. While changes in a-value, moisture content and firmness were resulted from the interaction between heating temperature, duration and frequency.

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาผลของให้ความร้อนร่วมกับการให้คลื่นอุลตราโซนิกจะไม่สามารถสำเร็จได้เลยหากไม่ได้รับความช่วยเหลือ อนุเคราะห์ ให้ความรู้ และช่วยแก้ปัญหาในงานวิจัย ทางคณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อผู้ให้การสนับสนุนทุกท่าน

ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ และอาจารย์มรรดา จิโนรส อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งแนวความคิดและหลักการที่ล้วนแล้วแต่สิ่งที่ดีและเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและการดำเนินชีวิต ตลอดระยะเวลาที่คณะผู้จัดทำดำเนินงานวิจัยนี้

อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความรู้และให้การดูแลมาโดยตลอด รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่ภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่คอยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยตลอดมา

ผศ.ดร.ปานมนัส สิริสมบูรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการศึกษาและวิเคราะห์ผลทางเนื้อสัมผัสของกึ่งขาวภายหลังการลวก อีกทั้งคอยแนะนำ ชี้แนะแนวทางเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการทดลองที่มีความแม่นยำถูกต้อง

เจ้าหน้าที่ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อในการซ่อมบำรุงเครื่องหุงต้มพร้อมระบบอุลตราโซนิก

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในหลายๆเรื่อง

สุดท้ายนี้ผู้ที่คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง ได้แก่ บิดามารดา ผู้ซึ่งเป็นผู้ให้กำเนิดและคอยสนับสนุนการศึกษาของคณะผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จได้ หากขาดบุคคลผู้ซึ่งสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกุ้ง.....	4
2.2 คลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Wave).....	5
2.2.1 ความหมายของคลื่นอุลตราโซนิก.....	5
2.2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก.....	6
2.2.3 การออกแบบระบบอุลตราโซนิก.....	8
2.2.4 ประเภทของเครื่องอุลตราโซนิก (Ultrasonic Reactor).....	9
2.2.5 ปรากฏการณ์แควิเทชัน (Cavitation).....	13
2.3 คลื่นอุลตราโซนิกในงานวิจัย.....	16
2.3.1 ผลของคลื่นอุลตราโซนิกต่อจุลินทรีย์.....	16
2.3.2 ผลของคลื่นอุลตราโซนิกต่อเอนไซม์และโปรตีน.....	17
2.3.3 ผลของความร้อนและคลื่นอุลตราโซนิก (Thermosonication) ต่อจุลินทรีย์.....	17
2.3.4 ผลของกระบวนการมาโนเทออร์โมอุลตราโซนิกเคชันต่อเอนไซม์.....	21
2.4 การประยุกต์ใช้คลื่นอุลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	27
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.1.1 วัสดุ.....	27
3.1.2 อุปกรณ์.....	27
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของกุ้ง.....	29
3.3.1 ความชื้นในตัวกุ้ง (Moisture content, Wet basis).....	29
3.3.2 การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss).....	29
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร.....	29
3.3.4 ค่าสี.....	30
3.3.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส.....	30
3.3.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	31
4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกุ้งขาว หลังจากผ่านการลวกสภาวะต่าง ๆ.....	31
4.1.1 ผลต่อความชื้นในตัวกุ้ง.....	32
4.1.2 ผลต่อการสูญเสียน้ำหนัก.....	33
4.1.3 ผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร.....	34
4.1.4 ผลต่อค่าสี.....	35
4.1.4.1 ค่าความสว่าง (L).....	35
4.1.4.2 ค่าความเป็นสีแดง (a).....	36
4.1.5 ผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส.....	37
4.1.6 ผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2 ปัญหาที่พบ.....	39
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....40

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. แสดงรูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....42

ภาคผนวก ข. แสดงข้อมูลผลการทดลอง.....46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของกึ่งหลังผ่านให้ความร้อน.....	31
4.2 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงปริมาณการส่งออกของกุ้งในประเทศไทย.....	4
2.2 แสดงคลื่นความถี่ของอุลตราซาวด์ในช่วงต่าง ๆ.....	5
2.3 แสดงรูปลึควิดไตร์ฟเวทธานส์ดีวีเซอร์.....	6
2.4 แสดงรูปแมกนีโตสตรีกที่ฟเวทธานส์ดีวีเซอร์.....	7
2.5 แสดงรูปพีโซอิเล็กตริกฟเวทธานส์ดีวีเซอร์.....	8
2.6 แสดงรูปร่างอุลตราโซนิก.....	10
2.7 แสดงรูปร่างอุลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น.....	11
2.8 แสดงลักษณะของฮอร์นชนิดต่าง.....	11
2.9 แสดงระบบอุลตราโซนิกแบบโพรบ.....	12
2.10 แสดงการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอุลตราซาวด์.....	14
2.11 แสดงการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอุลตราซาวด์.....	15
2.12 แสดงการทนความร้อนของสปอร์ <i>Bacillus subtilis</i> ที่ pH 7.0 เปรียบเทียบ ระหว่างเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันและการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว.....	18
2.13 แสดงการรอดชีวิตของสปอร์ <i>Bacillus subtilis</i> ที่อุณหภูมิ 100°C(a) และ 112°C(b).....	19
2.14 แสดงผลของมาโนเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันต่อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ.....	20
2.15 แสดงผลของมาโนเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันต่อ <i>Bacillus subtilis</i> ในน้ำนม เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (อุณหภูมิ 104°C).....	21
2.16 แสดงผลของคลื่นอุลตราซาวด์ต่อกิจกรรมเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส.....	23
2.17 แสดงการแตกของฟองแก๊สในสารละลายที่ได้รับคลื่นอุลตราซาวด์ ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิว.....	24
2.18 แสดงการกำจัดโพรไบโอติกโดยคลื่นอุลตราซาวด์ ในกระบวนการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง.....	26
3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	28
4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในตัวกุ้งเทียบเวลา.....	32
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลา.....	33
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเทียบเวลา.....	34
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L) เทียบเวลา.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดง (a) เทียบเวลา.....	36
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความชันของกราฟ ที่ช่วง 200 - 300 กรัมกับเวลา.....	37
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงจากการวัดกับระยะทาง.....	38



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

กุ้งเป็นสัตว์เศรษฐกิจอันดับต้นของประเทศไทยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการส่งออก ในแต่ละปีจะมีปริมาณการส่งออกของกุ้งทะเลเป็นมูลค่าหลายหมื่นล้านบาท (ในปี 2547 มีมูลค่ากว่า 67,000 ล้านบาท) การส่งออกกุ้งของประเทศไทยนั้นได้มาจาก 2 สายพันธุ์หลัก คือ กุ้งกุลาดำ และกุ้งขาว ในปี 2546 มีผลผลิตกุ้งกุลาดำ 1.5 แสนตันหรือประมาณ 46% ของกุ้งที่ผลิตได้ทั้งหมด ในขณะที่กุ้งขาวผลิตได้ 1.8 แสนตันหรือประมาณ 54% ทำให้กุ้งขาวมีส่วนแบ่งในการส่งออกถึงร้อยละ 70 ของกุ้งทะเลที่ส่งออกทั้งหมด กุ้งขาวเป็นกุ้งที่เลี้ยงง่าย ใช้ระยะเวลาเลี้ยงที่สั้นกว่า ไทไว มีความต้านทานต่อโรคสูง สามารถเลี้ยงได้หนาแน่นกว่าเมื่อเลี้ยงในพื้นที่ที่เท่ากัน และมีอัตราการรอดตายสูงกว่ากุ้งพันธุ์อื่น ๆ จึงทำให้เกษตรกรหันมาสนใจกุ้งขาวกันเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

แต่อย่างไรก็ตาม กุ้งเป็นสัตว์ที่เน่าเสียง่าย ภายหลังจากการตายของกุ้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและการอ่อนตัวของกุ้ง ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาคุณภาพกุ้ง กุ้งสดจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเป็นจำนวนถึง 85% ของจำนวนกุ้งที่ผลิตได้ทั้งหมดภายในประเทศ โดยทั่วไปกุ้งจะผ่านขั้นตอนการรักษาคุณภาพกุ้ง ด้วยการเริ่มจากการให้ความร้อนเบื้องต้นในลักษณะการลวกหรือการต้มก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อชะลอหรือยับยั้งปฏิกิริยาและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้กุ้งไม่เกิดการเน่าเสียและช่วยยืดอายุการเก็บรักษา การให้ความร้อนเป็นวิธีการรักษาคุณภาพของกุ้งวิธีหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งทั้งในการผลิตกุ้งสดแช่เย็น-แช่แข็ง กุ้งต้มสุกแช่เย็น และกุ้งแปรรูป

จากการศึกษาโดยการนำคลื่นอุลตราโซนิค ( ช่วงความถี่ 20 - 40 kHz) มาใช้กับงานทางด้านอาหาร พบว่า ความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิคสามารถส่งผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว ทำให้โมเลกุลสั่นสะเทือนเกิดเป็นช่องว่างภายใน เป็นผลให้โครงสร้างทางเคมีและกายภาพเปลี่ยนแปลง จึงได้มีผู้สนใจนำคลื่นอุลตราโซนิคไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านอาหาร

ปัจจุบันมีแนวโน้มของการนำคลื่นอุลตราโซนิคมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น เช่น

1. กระบวนการการสเตอริไลซ์ ใช้ทำความสะอาดในระบบสเตอริไลซ์ที่การทำความสะอาดธรรมดาไม่สามารถเข้าถึงได้
2. การสกัด ช่วยในการสกัดสารด้วยตัวทำละลาย ซึ่งจะช่วยเพิ่มแรงในการซึมผ่านให้กับตัวทำละลาย เพิ่มการถ่ายเทมวลที่ผิวหน้าของตัวที่ทำมาสกัด ทำให้ผนังเซลล์ที่ผิวของพืชแยกออก จึงสามารถแยกสารที่ต้องการออกมาได้ เช่น การสกัดน้ำตาลจากหัวบีต ( Sugar Beet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การตกผลึก ช่วยในการสร้างและเจริญเติบโตของคริสตอล (Crystal) รวมถึงเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation rate) เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งและไอศกรีม ทำให้ผลึกน้ำแข็ง (Ice Crystal) เล็กลง ช่วยลดการถูกทำลายของเซลล์ ทำให้ไอศกรีมแข็งขึ้น ยึดติดกับไม้ไอศกรีมได้ดีกว่าปกติ

4. กระบวนการออกซิเดชันในอาหารหมัก เช่น ไวน์ ทำให้แอลกอฮอล์และเอสเทอร์เข้าสู่สมดุล ช่วยลดเวลาการหมักลงได้มาก

5. การทำความสะอาดช่วยในการชะล้างสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออกได้ง่ายและเร็วขึ้น

6. การกำจัดแก๊สออกจากของเหลว (Degassing of Liquids) ทำให้ลดการเกิดฟองอากาศภายในผลิตภัณฑ์ได้

7. การทำแห้ง (Acoustic Drying) ทำให้สามารถลดอุณหภูมิการทำแห้งลงได้

8. ผลต่อเมล็ดข้าว (effects on rice grains) มีผลทำให้สตาร์ชออกมาจากเมล็ดข้าวได้รวดเร็วขึ้นในระหว่างการหุง เป็นผลให้ลดระยะเวลาในการหุงต้มและเวลาในการเกิดเจลลิ่งลง (Mason, 1998)

การใช้คลื่นอุลตราโซนิคกับอุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปอาหาร สามารถช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงให้เกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ช่วยให้คุณค่าทางอาหารไม่เสื่อมสภาพไปมากนัก จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และควรทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้ในงานอาหารที่มีอุณหภูมิสูง เช่น การลวกหรือการทอด อีกทั้งการใช้คลื่นอุลตราโซนิคร่วมด้วยนั้นสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดา (ภัทรี, 2548)

## 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์สำคัญ 2 ประการ

1. ศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิคต่อคุณภาพของกุ้งขาว ได้แก่ ปริมาณความชื้นในตัวกุ้ง, การสูญเสียน้ำหนัก, การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัส เปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว

2. เปรียบเทียบการใช้พลังงานขณะให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิคกับการให้ความร้อนแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิค

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลของการให้ความร้อนร่วมกับความถี่คลื่นอุลตราโซนิคต่อคุณภาพกุ้งขาว
2. ทราบค่าการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิค
3. ได้แนวทางในการนำคลื่นอุลตราโซนิคมาประยุกต์ใช้กับงานแปรรูปอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

ใช้กุ้งขาว (*Litopenaeus Vannamei*) สด น้ำหนักเฉลี่ย 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จากบ่อกุ้งจังหวัดสมุทรปราการ นำมาทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลที่มีต่อลักษณะของกุ้งขาวที่ผ่านการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิก(ที่ความถี่ 28 kHz และ 40 kHz)เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนที่ไม่ใช้คลื่นความถี่ (0 kHz), ความชื้นในตัวกุ้ง, การสูญเสียน้ำหนัก, การเปลี่ยนแปลงปริมาตร, ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัสของกุ้งขาว รวมทั้งศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อน โดยใช้เครื่องหุงต้มอาหารพร้อมระบบอุลตราโซนิก โดยการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 60°C, 80°C และ 100°C และคลื่นอุลตรา-โซนิกผ่านตัวกลางน้ำที่ความถี่ 28 kHz และ 40 kHz ที่ช่วงเวลา 0-4 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

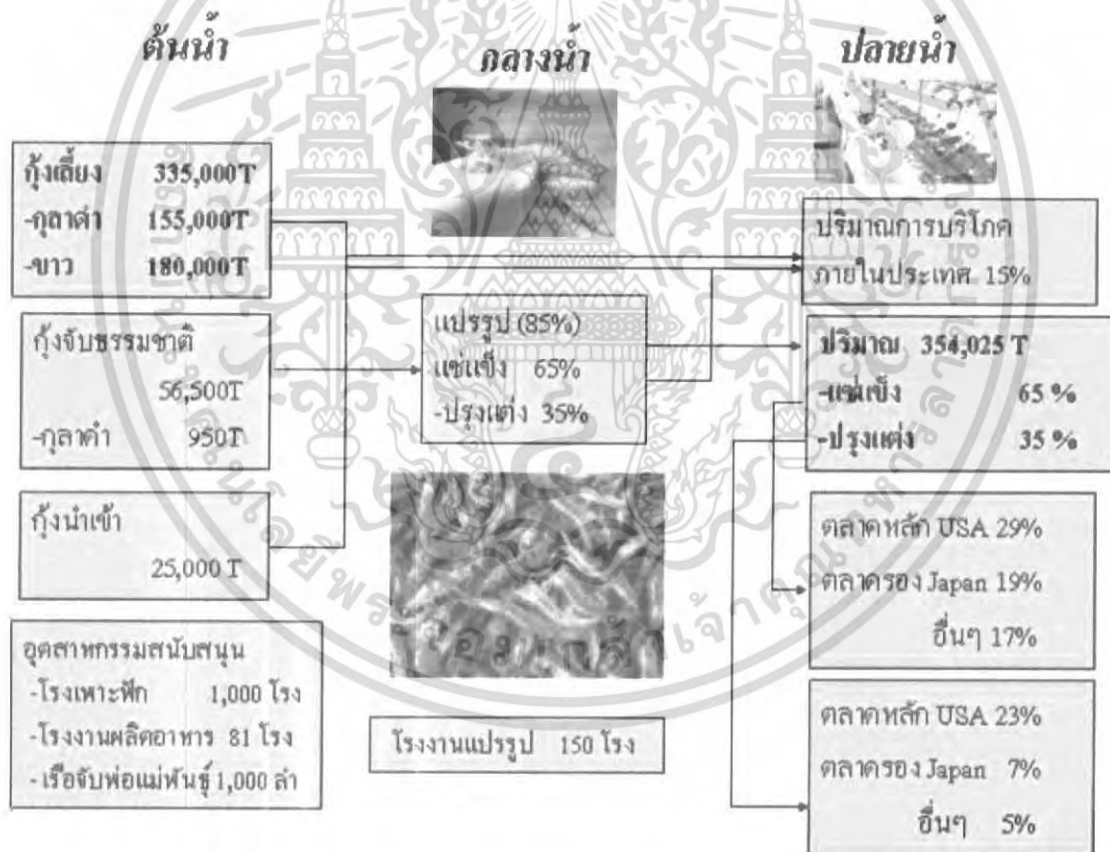
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกุ้ง

กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลังประเภทหนึ่ง ลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มตัว และแบ่งเป็นปล้อง ๆ อยู่ในไฟลัมอาโทรโพดา (Phylum Arthropoda) และจัดอยู่ในคลาสครัสเตเชีย (Class Crustacea)

ลักษณะโครงสร้างของกุ้ง ประกอบด้วย โครงสร้างภายนอกหรือเปลือก และเนื้อกุ้งหรือกล้ามเนื้อ กล้ามเนื้อของกุ้งมีเพียงชนิดเดียว คือ กล้ามเนื้อลาย ซึ่งพบได้ตามลำตัวรอบอวัยวะต่าง ๆ กล้ามเนื้อลายประกอบด้วย ไมโอไฟบริล (Myofibril) จำนวนมากรวมกันเป็นเส้นใยกล้ามเนื้อที่มีซาร์โคเลมมา (Sarcolemma) เป็นเส้นใยบางๆหุ้มอยู่



รูปที่ 2.1 แสดงปริมาณการส่งออกของกุ้งในประเทศไทย

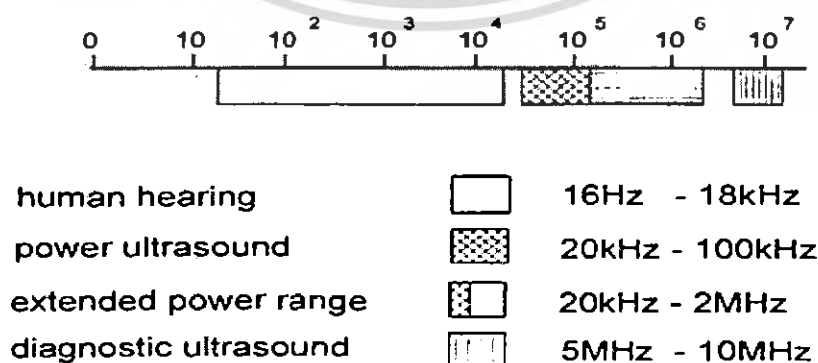
สายพันธุ์หลักของกุ้งที่มีการเพาะเลี้ยงกันมากในประเทศไทย คือ กุ้งกุลาดำและกุ้งขาว ในปี 2546 มีผลผลิตกุ้งกุลาดำ 1.5 แสนตันหรือประมาณ 46% ของกุ้งที่ผลิตได้ทั้งหมด ในขณะที่กุ้งขาวผลิตได้ 1.8 แสนตัน หรือประมาณ 54% ทำให้กุ้งขาวมีส่วนแบ่งในการส่งออกถึงร้อยละ 70 ของกุ้งไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ส่งออกทั้งหมด เนื่องจากกุ้งขาวเป็นกุ้งที่เลี้ยงง่าย ใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงที่สั้นกว่า ไตไว สามารถเลี้ยงได้หนาแน่นกว่าเมื่อเลี้ยงในพื้นที่ที่เท่ากันและมีอัตราการรอดตายสูงกว่ากุ้งพันธุ์อื่น ๆ จึงทำให้เกษตรกรหันมาสนใจกุ้งขาวกันเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

## 2.2 คลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Wave)

### 2.2.1 ความหมายของคลื่นอุลตราโซนิก

คลื่นอุลตราซาวด์หรือคลื่นอุลตราโซนิก (Ultrasonic Waves) หมายถึง พลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่า หรือจะหมายถึงคลื่นความดัน (Pressure Waves) ที่มีความถี่ (Frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิร์ตซ์, kHz) ส่วนคำว่า อุลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) หรือโซนิเคชันส์ (sonications) หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียงหรืออุลตราโซนิกในช่วงความถี่ดังกล่าวซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียง (Sound) ที่มนุษย์ได้ยินนั้น เกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่ยืดหยุ่น (Elastic Medium) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20 - 20,000 kHz คลื่นเสียงผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่ยืดหยุ่น ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Waves) แต่คลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปภายในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง (Transverse Waves) ในการศึกษาการใช้ประโยชน์จากอุลตราโซนิกตั้งแต่ต้นจนถึงปัจจุบัน พบว่ามีการนำอุลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การใช้อุลตราโซนิกกำลังต่ำและความถี่สูง (Low Power and High Frequencies) ซึ่งใช้ในด้านกาวิเคราะห์ (Diagnostic Ultrasound) เป็นส่วนใหญ่ และการใช้อุลตราโซนิกกำลังสูงและความถี่ต่ำ (High Power and Low Frequencies) หรือที่เรียกว่าพาวเวอร์อุลตราโซนิก (Power Ultrasound) ที่มักนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Mason,1998) คลื่นความถี่ของอุลตราโซนิกในช่วงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นความถี่ของอุลตราโซนิกในช่วงต่าง ๆ

ที่มา: Mason (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

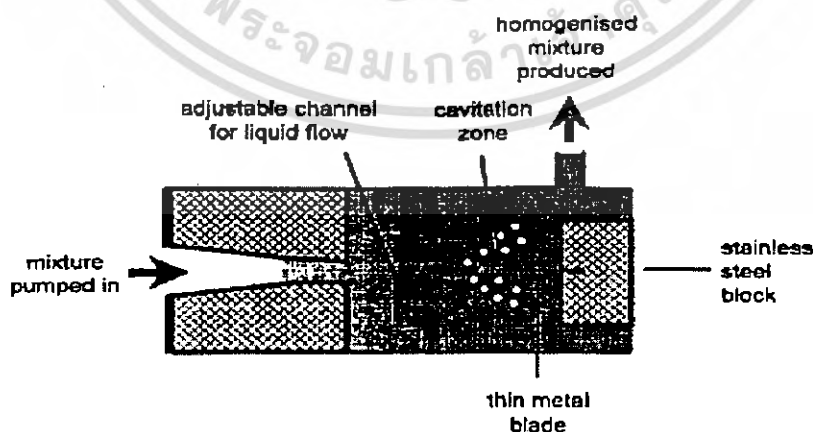
การใช้พาวเวอร์อัลตราโซนิก (Power Ultrasound) ในกระบวนการการแปรรูปอาหาร ทำให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของอาหาร เนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation) และส่วนมากใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20 – 40 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อัลตราโซนิกทั่วไปที่ใช้ในการทำความสะดวก การทำให้เซลล์แตกและในการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น

## 2.2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแปรรูปอาหาร จำเป็นต้องรู้และเข้าใจถึง การเกิดคลื่นรวมทั้งวิธีการนำพลังงานของคลื่นที่สร้างขึ้นไปใช้ แหล่งของคลื่นอัลตราโซนิกและชนิดของอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจากทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียงเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการตัดสินใจนำอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยทั่วไปสามารถแบ่งทรานสดิวเซอร์เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

### 1.) ลิกวิดไดรฟ์เวนทรานสดิวเซอร์ (Liquid Driven Transducer)

ลักษณะการทำงานของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้ ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและผ่านไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (Thin Blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะนั้นเกิดการสั่นไปมา ในการสั่นแต่ละครั้ง จะทำให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดคลื่นความดันขึ้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชันขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปวิเตชันเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นลักษณะของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้ แสดงดังรูปที่ 2.3



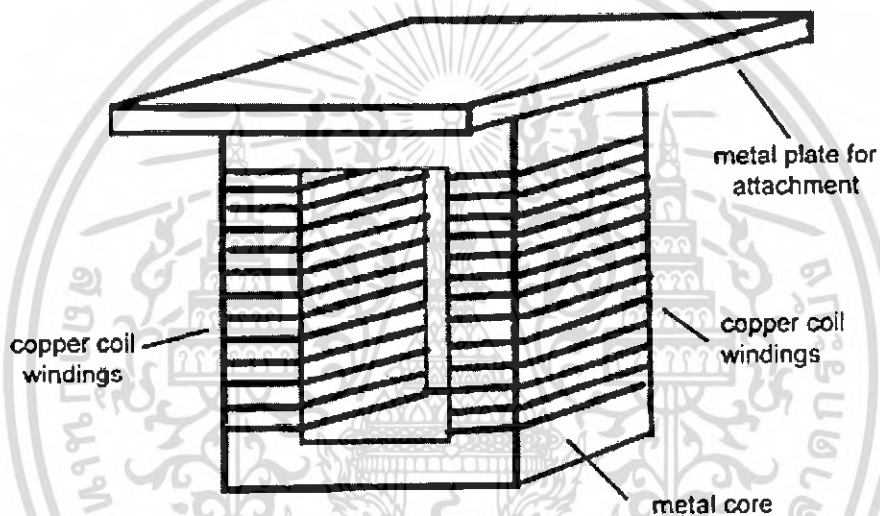
รูปที่ 2.3 แสดงรูปลิกวิดไดรฟ์เวนทรานสดิวเซอร์

ที่มา: Mason (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.) แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) เช่น นิกเกิล (Nickel) หรือเหล็ก (Iron) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลินอยด์ (Solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอย (Nickel Alloy) ขนาดบางจำนวนหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้ามดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา: Mason (1998)

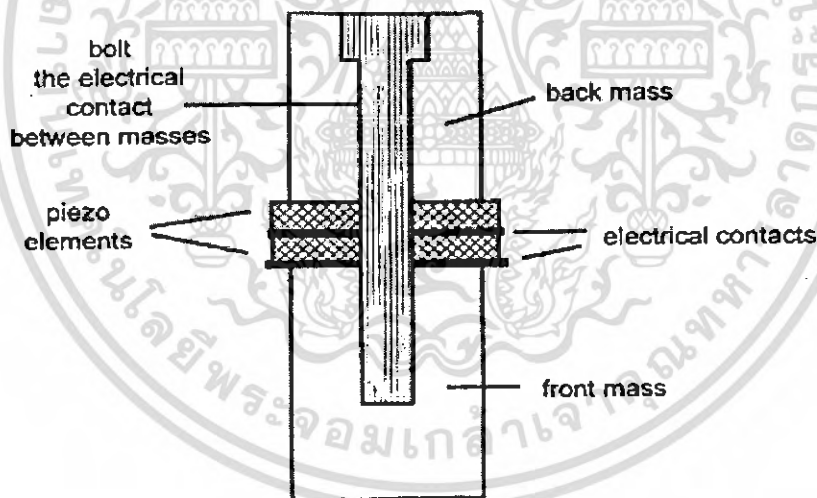
จากรูปเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดจะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนซึ่งผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก เรียกว่า เกิดแมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) และทำให้ขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ลดลงไปด้วย และเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานส์ดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดให้กระแสไฟฟ้าแก่ตัวแกนจะทำให้แกนมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดแรงสั่นที่ต้องการขึ้นได้ ทั้งนี้จะต้องออกแบบทรานส์ดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสั่นตามความถี่ของคลื่นที่กำหนดไว้

ข้อเสียของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ได้แก่ การสร้างคลื่นอัลตราโซนิคได้ต่ำกว่า 100 kHz และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 60% โดยจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนระบบนี้จึงมักต้องให้การทำความเย็นภายนอกควบคู่กันไปด้วย ส่วนข้อดีได้แก่การที่ระบบนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.) เพียโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้เซรามิกส์ (Ceramics) ที่มีส่วนผสมของสารเพียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric Materials) เช่น แบเรียมไทเทเนต (Barium Titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (Lead Metaniobate) สารเพียโซเซรามิกดังกล่าวนิยมใช้ในเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ชะล้างสกปรกที่ติดอยู่ให้หลุดออกหรือเพื่อทำความสะอาด หรือใช้กับระบบโพรบ (Probe Systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูตรงกลาง ทรานส์ดิวเซอร์แบบเซรามิกส์นี้ จะมีความเปราะและแตกหักง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการแตกหักแล้ว ยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นเพียโซเซรามิกสองชนิด (เรียกว่า Sandwich Construction) ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว เพียโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยทรานส์ดิวเซอร์นี้มีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 95% และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นอัลตราโซนิก



รูปที่ 2.5 แสดงรูปเพียโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา: Mason (1998)

### 2.2.3 การออกแบบระบบอัลตราโซนิก

ระบบอัลตราโซนิกที่ใช้ลิควิดทรานส์ดิวเซอร์นั้น เป็นระบบที่ง่ายที่สุดและมีความทนทาน แต่ในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการบีบของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านรูขนาดเล็กไปยังแผ่นโลหะขนาดบาง ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบอัลตราโซนิกที่ใช้ลิควิดทรานส์ดิวเซอร์จึงได้แก่ การผสม (Mixing) และการโฮโมจีไนส์ (Homogenization) ซึ่งช่วยทำให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นตัวให้กำเนิดพาวเวอร์อัลตราโซนิก ในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบที่ใช้ไฟฟ้าไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

เพื่อทำให้เกิดคลื่นเสียง (Electroacoustic Systems) เช่น เพียโซอิเล็กทริกหรือแมกนีโตสทริกทิฟทรานส์ดีวเซอร์ หลังจากที่ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวให้กำเนิดคลื่นแล้วจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งถ่ายคลื่นอัลตราโซนิคไปยังของเหลว โดยสรุปแล้วระบบอัลตราโซนิคจะต้องมีอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นอยู่ 3 ส่วน ได้แก่

1.) เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Generator) โดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับที่ความถี่ที่ต้องการและผ่านเข้าสู่ทรานส์ดีวเซอร์

2.) ทรานส์ดีวเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงไปเป็นการสั่น เนื่องจากพลังงานกล ทรานส์ดีวเซอร์ที่นิยมในปัจจุบัน คือ ชนิดที่ใช้เทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริก โดยที่รูปร่างและขนาดของทรานส์ดีวเซอร์ที่นำมาประกอบกันจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ต้องการใช้งาน และพลังงานจากทรานส์ดีวเซอร์แต่ละชนิดจะแปรผกผันกับกำลังสองของความถี่ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้พาวเวอร์อัลตราโซนิคจึงมักใช้ในช่วงความถี่ต่ำ โดยตัวทรานส์ดีวเซอร์จะอยู่ติดกับบูสเตอร์ (Booster) หรือฮอร์น (Horn) ด้านบนและเชื่อมต่อกับระบบส่งถ่ายพลังงาน

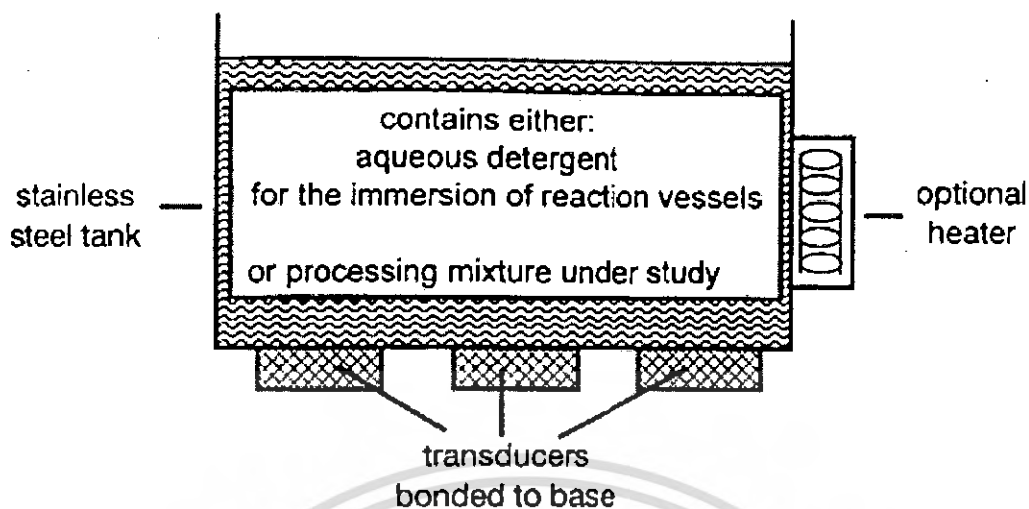
3.) ระบบส่งถ่ายพลังงาน (Delivery Systems) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งถ่ายพลังงานจากการสั่นสะท้อนไปยังของเหลว ในกรณีที่เป็นอ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Bath) ตัวทรานส์ดีวเซอร์จะอยู่บริเวณฐานตรงด้านล่างของตัวอ่างหรือถังและส่งถ่ายพลังงานโดยตรงไปยังของเหลวที่อยู่ภายในอ่าง ส่วนระบบที่ต้องการพลังงานที่สูงกว่านี้ จะใช้วิธีขยายสัญญาณหรือพลังงานและส่งถ่ายพลังงานไปยังของเหลว โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ฮอร์น ซึ่งเป็นแท่งโลหะที่มีรูปร่างแตกต่างกันและจะติดกับทรานส์ดีวเซอร์ โดยตัวฮอร์นมักทำจากวัสดุที่ทำให้เกิดขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตัวของความยาวคลื่นเสียง หลังจากใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้บริเวณส่วนปลายของฮอร์นเกิดการกัดกร่อนและมีผลต่อความยาวของฮอร์นโดยทำให้สั้นลง จึงนิยมใช้ส่วนปลายฮอร์นชนิดที่ถอดเข้าออกได้และเป็นเกลียวซึ่งสามารถเปลี่ยนได้ง่าย

#### 2.2.4 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic Reactor)

เครื่องอัลตราโซนิคที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1.) อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Baths) อ่างอัลตราโซนิคเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบโดยทั่วไปทรานส์ดีวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างของอ่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 kHz อ่างอัลตราโซนิคมีลักษณะดังรูปที่ 2.6

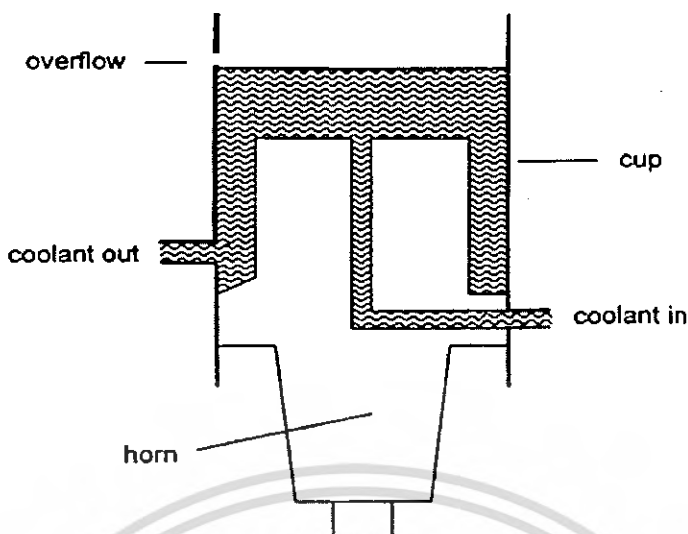
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงรูปร่างอุลตราโซนิก

ที่มา: Mason (1998)

สำหรับอ่างอุลตราโซนิกนั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่ตรงบริเวณระดับความสูงค่าหนึ่งตลอดความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อน (Reflection) ของคลื่นอุลตราโซนิกที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง (สำหรับน้ำ มีค่า  $\lambda = 37$  มิลลิเมตรที่ความถี่ 40 kHz) ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า  $\lambda$  จะส่งผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้ อ่างอุลตราโซนิกนั้นมีอุปกรณ์เสริมประเภทต่าง ๆ ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Thermostatically Controlled Heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (Frequency Sweeps) ที่ทำให้แคปซิเตอร์เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงาน สวิตช์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอุลตราโซนิกทั่วไปมักจะให้พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแคปซิเตอร์ที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างมักมีปริมาณมากทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง รูปแบบของอ่างอุลตราโซนิกอีกประเภทหนึ่งเรียกว่าคัพฮอร์น (Cup Horn) แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยจัดว่าเป็นอ่างอุลตราโซนิกที่สร้างพลังงานได้สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นอุลตราโซนิกซึ่งติดอยู่กับทรานส์ดีวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับของเหลวและลักษณะการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวซึ่งมีความสำคัญมาก

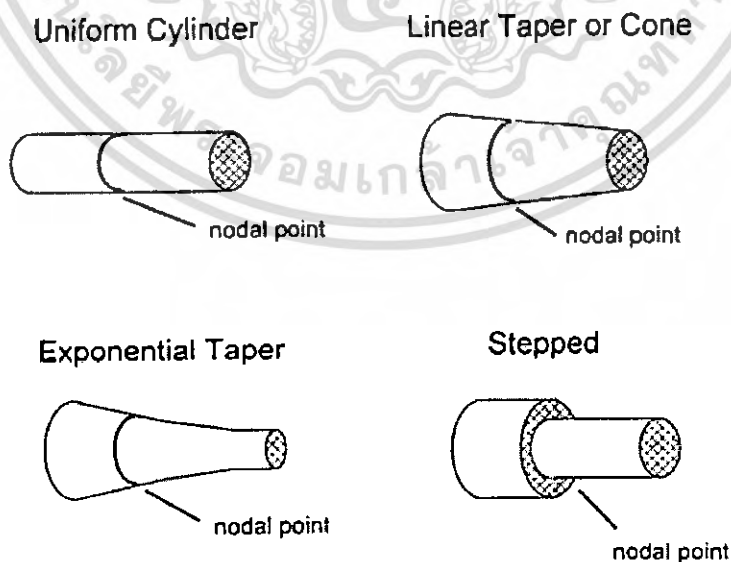


**รูปที่ 2.7** แสดงรูปร่างอุลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น

ที่มา: Mason (1998)

2.) ระบบอุลตราโซนิกแบบโพรบ (Ultrasonic Probe Systems)

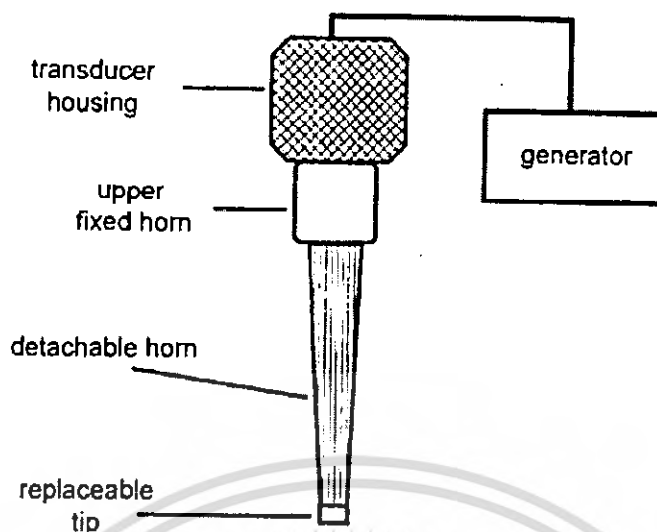
ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากทรานส์ดิวเซอร์นั้น โดยทั่วไปจะนำทรานส์ดิวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่า ฮอร์น(Horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดัง รูปที่ 2.8 โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิตระบบอุลตราโซนิกแบบโพรบแสดงดังรูปที่ 2.9



**รูปที่ 2.8** แสดงลักษณะของฮอร์นชนิดต่างๆ

ที่มา : Mason (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9. แสดงระบบอูลตราโซนิกแบบไพโรบ

ที่มา : Mason (1998)

แอมพลิฟายด์ที่สร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (Uniform Cylinder) นั้นแอมพลิฟายด์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียงขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (Amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าตัดในฮอร์นระหว่างสองพื้นที่ คือ Driven Face (D) และ Emitting Face (d) ตัวอย่างเช่นในฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น Exponential หรือ Linear Tapered (Cone) (รูปที่ 2.8 บนขวาหรือล่างซ้าย) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ  $D/d$  ในขณะที่ฮอร์นที่มีลักษณะเป็น Stepped (รูปที่ 2.8 ล่างขวา) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ  $(D/d)^2$  ซึ่งจะเห็นว่าฮอร์นแบบ stepped จะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่าเสมอ แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัสดุ (Internal Stress) อัตราส่วนระหว่าง  $D/d$  จะต้องไม่สูงจนเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตทรานสดิวเซอร์ และพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น (Emitting Surface) ในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตทรานสดิวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยึดและคืนตัวกลับได้ดี เช่น ไทเทเนียม (Titanium) หรืออะลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium Alloy) ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล แต่อะลูมิเนียมอัลลอยนั้นไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาแคปริเตชันเนื่องจากถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงควรใช้วัสดุพวกไทเทเนียมอัลลอยแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่นนั้น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ที่แอมพลิฟายด์สูงจะมีข้อจำกัดเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาแคปริเตชัน จะรบกวนการส่งถ่ายของพลังงานไปยังของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.) อุปกรณ์ที่ใช้ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (Equipment Involving Parallel Vibrating Plates)

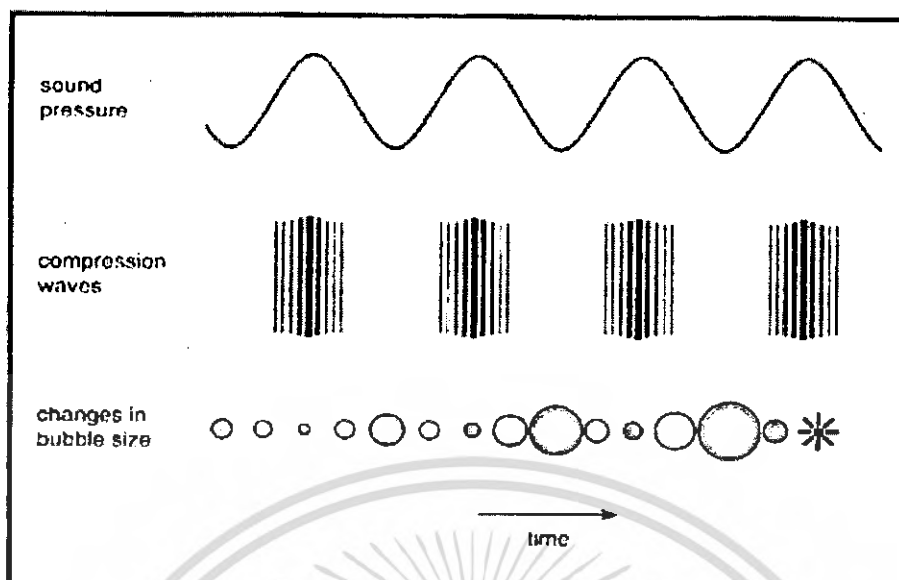
ระบบนี้พบว่าเป็นทางเลือกที่ดีในการนำคลื่นอุลตราโซนิกมาใช้กับงานที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับคลื่นอุลตราโซนิกอย่างสม่ำเสมอในระหว่างทางที่ไปยังเครื่องอุลตราโซนิก ซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่บริเวณผนังด้านในตัวเครื่อง เมื่อแผ่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้นจะมีผลทำให้การลดทอนพลังงาน (Attenuation) ของคลื่นเสียงภายในของเหลวมีค่าต่ำสุดและไม่เกิดคลื่น ข้อดีของระบบแผ่นสั่นคู่ที่ติดตั้งในแต่ละด้านของของเหลวเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบแผ่นสั่นแผ่นเดียว คือ คลื่นพลังงานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งถ่ายไปยังของเหลวจะสะท้อนไปยังแผ่นที่สั่นอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้ผลที่เกิดจากแรงกลที่มีค่าสูงสุด

### 4.) ระบบการสั่นตามแนวรัศมี (Radial Vibrating Systems)

ในการให้พลังงานคลื่นอุลตราโซนิกกับของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อ นั้น วิธีที่ดีที่สุด คือ การใช้การสั่นของท่อเพื่อทำให้เกิดคลื่นพลังงานขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นรวมทั้งใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดสูงได้ ลักษณะการตัดขวางของท่อดังกล่าวมีความสำคัญโดยท่อทรงกระบอกที่สั้นจะทำให้เกิดคลื่นอุลตราโซนิกสูงสุดตรงบริเวณกึ่งกลางของท่อ เช่นเดียวกับท่อที่มีลักษณะหกลเหลี่ยม และการเกิดพลังงานน้อยกว่าตรงบริเวณที่ใกล้พื้นผิวด้านในของท่อมีผลดี คือ ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการกัดกร่อนตรงบริเวณดังกล่าว การนำทรานส์ดีวเซอร์มาเชื่อมติดกับท่อโลหะโดยตรง ทำให้สามารถเกิดคลื่นในแนวรัศมีและเกิดบัพ (Nodes) และปฏิบัพ (Antinodes) เป็นช่วงระยะเท่ากับ  $\lambda/2$  ตามความยาวของท่อ

### 2.2.5 ปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation)

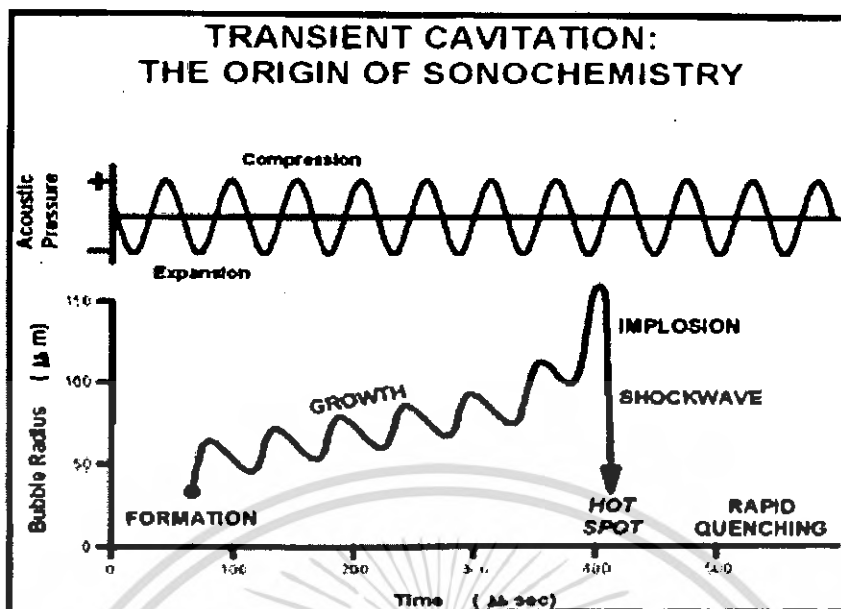
ปรากฏการณ์แคปวิเตชันหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นเสียงอุลตราโซนิก โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางกายภาพ (จากแรงกล) เนื่องจากฟองอากาศ (Bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้น เนื่องจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอุลตราโซนิกจะถูกบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Stretch) ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.10 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอุลตราโซนิกเป็นระยะ และเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกันเป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุดแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอุลตราโซนิก

ที่มา : Suslick (1994)

แคปวิเตชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แคปวิเตชันแบบถาวร (Stable Cavitation) และแคปวิเตชันแบบชั่วคราว (Transient Cavitation) ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลทำให้เกิดพฤติกรรมหรือลักษณะของฟองแก๊สที่ได้รับคลื่นอุลตราโซนิกแตกต่างกันออกไป โดยแคปวิเตชันแบบถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศหรือฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่ง (Oscillate) เมื่อได้รับคลื่นอุลตราโซนิกเป็นจำนวนหลายรอบของการสั่นแต่ไม่เกิดการแตกของฟองอากาศหรือฟองแก๊สดังกล่าว ซึ่งฟองอากาศหรือฟองแก๊สนี้ อาจจะมีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดเรโซแนนซ์ (Resonance size) (เป็นขนาดของฟองแก๊สที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับความถี่ในการสั่นแบบบังคับ) ส่วนแคปวิเตชันแบบชั่วคราวนั้นเกิดขึ้นในระหว่างการบีบอัดของฟองแก๊ส (Compression Phase) ในของเหลวที่ได้รับความเครียด (Tension stress) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเกิดการขยายตัวของฟองแก๊ส ซึ่งมีผลทำให้การแตกของฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่งและขยายขนาดเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่ในระยะเวลาหนึ่งก่อน ที่จะแตกออกอย่างรวดเร็วเมื่อฟองแก๊สนั้นขยายขนาดขึ้นเมื่อถึงขนาดที่จำเพาะ



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิค

ที่มา : Suslick (1994)

Sala (1995) รายงานว่า ในสภาวะที่ฟองอากาศแตกนั้นพบว่าทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000 เคลวิน (K) และความดันสูงถึง 2,000 atm ในบริเวณจุดที่เกิดคลื่นกระแทก (Shock Waves) ทั้งนี้เนื่องมาจากในระหว่างการเกิดการขยายและหดตัวของฟองแก๊สนั้น จะเกิดสมดุลขึ้นระหว่างความดันไอภายในและภายนอกฟองแก๊ส และพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะขยายตัวจะมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะหดตัว จึงเป็นผลให้การซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ขยายตัวเกิดขึ้นได้มากกว่าและฟองแก๊สนี้จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบความถี่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ขยายตัวต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ถูกอัดจะเพิ่มมากขึ้นในแต่ละรอบจนกระทั่งฟองแก๊สมีขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในฟองแก๊สมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งรอบของการสั่น และเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากคลื่นอัลตราโซนิคไม่เพียงพอในการคงสภาวะของแก๊สหรือไอจึงทำให้เกิดการควบแน่น (Condensation) ขึ้นทันทีทันใด โดยโมเลกุลที่ควบแน่นนั้นจะชนซึ่งกันและกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นและเกิดจุดหรือบริเวณเล็ก ๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก และเป็นที่ยืนยันว่าปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่เกิดในระหว่างที่ของเหลวได้รับคลื่นอัลตราโซนิคซึ่งทันทีที่ฟองแก๊สหรือฟองอากาศแตกจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีหรือสร้างวิถีของปฏิกิริยา (Reaction Pathway) หรือทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แตกต่างไปจากปฏิกิริยาเดิมจากสภาวะปกติ ในส่วนของคลื่นอัลตราโซนิคกำลังสูง (High Power Ultrasound) พบว่าค่าระดับกำลังของเสียงอยู่ในช่วง  $10^3 - 10^6 \text{ Wm}^{-2}$  (ที่  $10^6 \text{ Wm}^{-2}$  พบว่า อัลตราโซนิคจะสามารถเจาะทะลุแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ได้ภายใน 30 วินาที) และความดันที่เกิดขึ้นจะสูงถึง 104 atm และมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 ถึง 1,500 K งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 คลื่นอุลตราไวโชนิกในงานวิจัย

### 2.3.1 ผลของคลื่นอุลตราไวโชนิกต่อจุลินทรีย์

การศึกษาเกี่ยวกับผลของคลื่นอุลตราไวโชนิกต่อเซลล์นั้น อาจกล่าวได้ว่ามีจุดเริ่มต้นจากการศึกษาผลของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงต่อเซลล์และพาราไซต์โดย Harvey and Loomis (1929) และประกอบกับการพัฒนาอุปกรณ์ในการสร้างคลื่นอุลตราไวโชนิก ทำให้มีการศึกษาผลของอุลตราไวโชนิกต่อจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น Williams et al. (1970) ใช้คลื่นอุลตราไวโชนิกในการทำให้กลุ่มของเซลล์จุลินทรีย์ (clump) ที่อยู่ในของเหลวเกิดการแยกออกจากกัน และ Dewhurst et al. (1986) ใช้คลื่นอุลตราไวโชนิกเพื่อทำให้สปอร์ของ *Bacillus cereus* ที่ติดอยู่บนพื้นผิวของโพลีเมอร์หลุดออก ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ปริมาณของจุลินทรีย์มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น และ Mett et al. (1988) ได้ใช้คลื่นอุลตราไวโชนิกเพื่อทำลายผนังเซลล์ (Cell Walls) ในการศึกษาของคัพประกอบภายในของเซลล์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้คลื่นอุลตราไวโชนิกในการพาสเจอร์ไรส์และสเตอริไลส์อาหาร และอุปกรณ์สำหรับการผ่าตัดอีกด้วย (Sala et al., 1995) การทำลายจุลินทรีย์เนื่องจากคลื่นอุลตราไวโชนิกนั้น มีรายงานว่าเกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์แคปิตเดชัน ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาพบว่าในระหว่างการเกิดแคปิตเดชัน จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Highly Reactive Chemical Radicals) และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางของเหลวด้วย เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) แต่พบว่าเป็นความจริงแล้ว จุลินทรีย์ถูกทำลายเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงจากการแตกตัว (Implosions) ของฟองอากาศ ซึ่งการแตกตัวของฟองอากาศนั้นจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเป็นจุดร้อนขนาดเล็ก (Hot Spots) แต่เนื่องจากตัวกลางที่ได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ มีปริมาตรหรือขนาดเล็กมาก ดังนั้นอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นจะสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้เพียงส่วนน้อยเท่านั้น แม้จะมีรายงานว่าจุลินทรีย์บางชนิดสามารถทนต่อความดันสูงได้ แต่พบว่าจะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันที่สลับเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดในช่วงปรากฏการณ์แคปิตเดชันและมีผลทำให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย แต่ก็ยังมีรายงานการศึกษาอีกหลายฉบับที่พบว่าผลในการทำลายจุลินทรีย์ของอุลตราไวโชนิกนั้นไม่ได้เกิดจากแรงกดดันที่ได้กล่าวมาแล้ว ในส่วนของการทนต่อคลื่นอุลตราไวโชนิกของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ นั้น พบว่ามีการศึกษามากมายและแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ โดยพบว่า เซลล์ที่มีขนาดใหญ่จะทนต่อคลื่นอุลตราไวโชนิกได้น้อยกว่าเซลล์ขนาดเล็ก (หรือ sensitive มากกว่า) ยกเว้นเชื้อในตระกูล Mycobacteriaceae ส่วนเซลล์ที่มีรูปร่างกลม (Coccal forms) จะทนต่ออุลตราไวโชนิกมากกว่าเซลล์รูปร่างแท่ง (Rodshape) จุลินทรีย์แกรมบวกทนต่อคลื่นอุลตราไวโชนิกมากกว่าแกรมลบและจุลินทรีย์พวกที่ต้องการอากาศ (Aerobic Species) ทนต่ออุลตราไวโชนิกมากกว่าพวกที่ไม่ต้องการอากาศ (Anaerobic Species) นอกจากนี้พวกเซลล์ที่มีอายุน้อยกว่า (Young Cells) จะทนต่อคลื่นอุลตราไวโชนิกได้ต่ำกว่าเซลล์ที่มีอายุแก่กว่าและพวกที่สร้างสปอร์ (Sporulated Microorganisms) ทนต่อคลื่นอุลตราไวโชนิกมากกว่าเซลล์ปกติ (Vegetative Cells) มาก การทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นอุลตราโซนิคของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง แต่พบว่ามียางานการศึกษาเพียงเล็กน้อย

### 2.3.2 ผลของคลื่นอุลตราโซนิคต่อเอนไซม์และโปรตีน

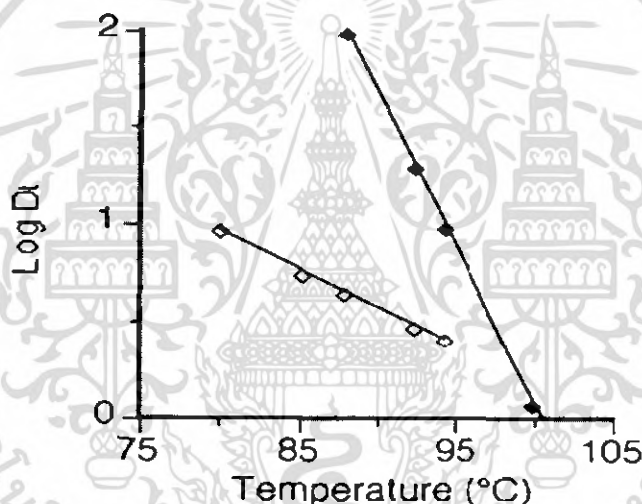
Sala (1995) รายงานว่า มีการรวบรวมผลการศึกษาในเรื่องผลของคลื่นอุลตราโซนิคต่อเอนไซม์และองค์ประกอบของอาหารอื่น ๆ นั้น มีมานานแล้วโดยประมาณ 70 ปีที่ผ่านมา ซึ่งต่อมาในภายหลังพบว่า คลื่นอุลตราโซนิคสามารถทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน (Depolymerization) ขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น พบว่าทำให้ความหนืดของสารละลายสตาร์ช (Starch) กัมอะราบิก (Gum Arabic) เจลาติน (Gelatin) และโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ชนิดอื่น ๆ มีค่าลดลง หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโพลีเมอร์ของสตาร์ชและเด็กซ์เตรน (Dextrans) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่โมเลกุลใหญ่ขึ้น รวมทั้งทำให้ DNA แตกสลายแต่ยังคงโครงสร้างขององค์ประกอบย่อยไว้ได้ เป็นต้น และในภายหลังยังพบว่าคลื่นอุลตราโซนิคนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแก๊สที่ละลายหรือมีอยู่ในสารละลายที่นำมาสัมผัสกับคลื่น เช่น ถ้าแทนที่แก๊สออกซิเจนด้วยไฮโดรเจน จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หลายชนิดเพิ่มขึ้นได้ในส่วนของผลของคลื่นอุลตราโซนิคต่อโปรตีน พบว่ามีความซับซ้อนในการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับคลื่นอุลตราโซนิค เช่น โพลีเมอร์ของโปรตีนทรงกลม (Polymeric Globular Proteins) จะเกิดการแตกตัวทำให้มีขนาดเล็กลงเป็นหน่วยย่อย และถ้าในสารละลายตัวกลางนั้นมีแก๊สออกซิเจน อาจมีผลทำให้โครงสร้างจตุรภูมิ (Quarternary Structure) โดยอาจทำให้สูญเสียสภาพธรรมชาติได้ ในส่วนของไลโปโปรตีน (Lipoprotein) คลื่นอุลตราโซนิคอาจทำให้ไขมันบางส่วนแยกออกจากโครงสร้าง (Delipidation) และในฮีโมโปรตีน (Haemoproteins) อาจทำให้เกิดการแยกตัวของฮีม (Haeme) ออกจากโกลบิน (Globin) และในกรณีที่สารละลายโปรตีนได้รับคลื่นอุลตราโซนิคเป็นเวลานานมากขึ้น อาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยสายโซ่โพลีเปปไทด์อาจแตกออกทำให้เกิดชิ้นส่วนของโมเลกุลย่อยที่มีขนาดเล็กลง เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์และจุลินทรีย์นั้นพบว่าการนำเทคนิคหรือกระบวนการอื่น ๆ มาใช้ร่วมกับการให้คลื่นอุลตราโซนิคซึ่งมียางานการศึกษาที่แตกต่างกันออกไป

### 2.3.3 ผลของความร้อนและคลื่นอุลตราโซนิค (Thermosonication) ต่อจุลินทรีย์

Sala (1995) รายงานว่า มีการศึกษาผลของการใช้คลื่นอุลตราโซนิคร่วมกับกระบวนการให้ความร้อนในการทำลายจุลินทรีย์ไม่มากนัก โดยในระยะแรกเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง ค.ศ. 1930 -1940 ได้มีการทดลองใช้คลื่นอุลตราโซนิคภายใต้สภาวะแช่เย็น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลการทำลายเชื้อเนื่องจากความร้อน ซึ่งพบว่าผลการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน ในระยะต่อมา Burgos et al. (1972)

ศึกษาผลของคลื่นอุลตราโซนิคต่อการทนความร้อนของสปอร์ของเชื้อ *Bacillus cereus* และ *Bacillus* ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

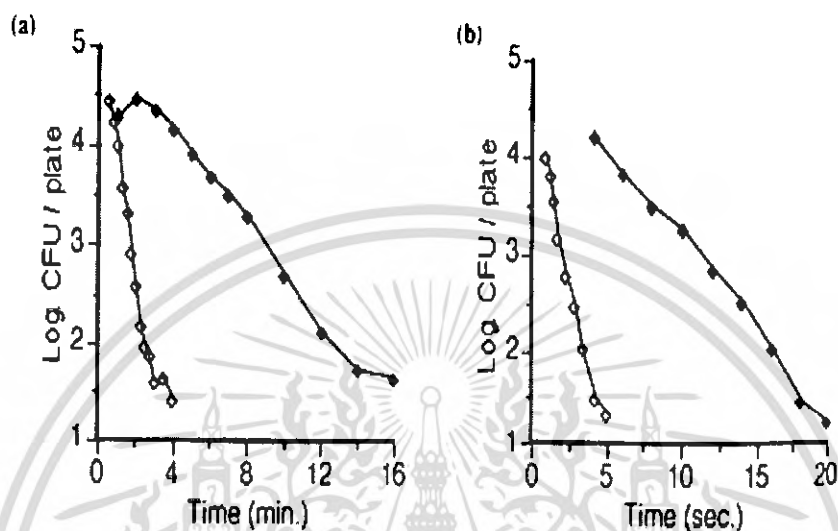
*licheniformis* ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยพบว่าทำให้คลื่นอุลตราโซนิกแก๊สสปอร์ของเชื้อดังกล่าวที่ 20 kHz ก่อนนำไปให้ความร้อน มีผลทำให้การทนต่อความร้อนของสปอร์ของเชื้อทั้งสองชนิดนี้ลดลง และต่อมา Ordonez (1984) พบว่าการให้คลื่นอุลตราโซนิกพร้อมกับการให้ความร้อนมีผลในการทำลายจุลินทรีย์มากกว่าการให้คลื่นอุลตราโซนิกก่อนและตาม ด้วยการใช้ความร้อนภายหลังซึ่งเรียกระบวนการนี้ว่า เทอร์โมอุลตราโซนิกเคชัน (Thermoultrasonication) รายงานผลการศึกษาของเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันต่อจุลินทรีย์บางชนิด เช่น Garcia (1989) ศึกษาผลของเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันเปรียบเทียบกับให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวต่อสปอร์ของ *Bacillus subtilis* แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยพบว่าสปอร์ของเชื้อที่ผ่านกระบวนการเทอร์โมอุลตราโซนิกเคชันจะทนต่อความร้อนได้น้อยลง



**รูปที่ 2.12** แสดงการทนความร้อนของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่ pH 7.0 เปรียบเทียบระหว่าง เทอร์โมอุลตราโซนิกเคชัน (สี่เหลี่ยมทึบ) และการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (สี่เหลี่ยมขาว) ที่มา : Garcia et al. (1989)

ในการศึกษาการใช้อุลตราโซนิกร่วมกับความร้อน ในระยะต่อมามีการให้ความดันร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ความดันไอ (Vapour Pressure) เพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ความหนืด (Viscosity) ลดลง การเกิดแคปติเวชันจึงลดลงไปด้วย ดังนั้น เพื่อคงประสิทธิภาพของการใช้คลื่นอุลตราซาวด์ที่อุณหภูมิสูง จึงต้องกระทำภายใต้สภาวะให้ความดัน (Sala et al., 1995) โดยพบว่า การทดลองในระยะแรก ๆ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และเรียกระบวนการที่ใช้อุลตราโซนิกร่วมกับความร้อนและความดันนี้ว่า มาโนเทอร์โมโซนิกเคชัน (Manothermo-sonication process) การศึกษาผลของการทนต่อมาโนเทอร์โมโซนิกเคชันของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่ pH 7.0 โดยให้อุณหภูมิสูงระหว่าง 100 – ๑๑๒ องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยพบว่ามาโนเทอร์โมโซนิกเคชันทำให้สปอร์ดังกล่าวทนความร้อนได้น้อยลงกว่าทุกวิธี ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

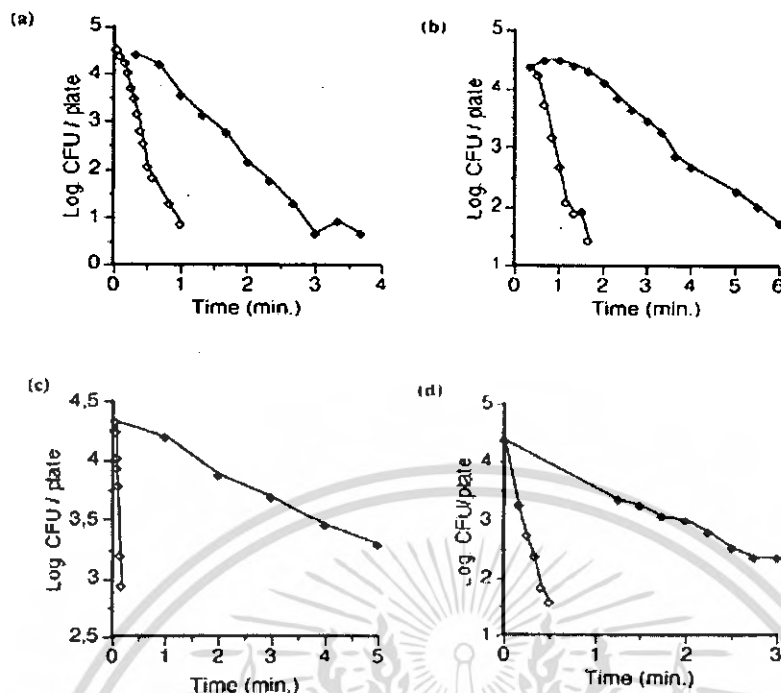
ร้อนได้ลดลงเหลือประมาณหนึ่งในสิบเท่าของการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว และยังพบว่าการใช้คลื่นอุลตราโซนิกร่วมกับอุณหภูมิสูงภายใต้ความดันยังคงมีประสิทธิภาพดี แม้ว่าอุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่าจุดเดือดของตัวกลางที่ใช้ก็ตาม



**รูปที่ 2.13** แสดงการรอดชีวิตของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่อุณหภูมิ 100°C(a) และ 112°C(b) (จุดสี่เหลี่ยมทึบเป็นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและจุดสี่เหลี่ยมขาวใช้กระบวนการมาโนเทอริโมอุลตราโซนิกเคชัน)

ที่มา : Sala et al. (1995)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของกระบวนการมาโนเทอริโมอุลตราโซนิกเคชันต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ทั้งที่สร้างและไม่สร้างสปอร์ รวมทั้งเซลล์ปกติโดยพบว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อต่าง ๆ ได้ดีกว่าการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวเมื่อทดลองที่อุณหภูมิระดับเดียวกันดังรูปที่ 2.14

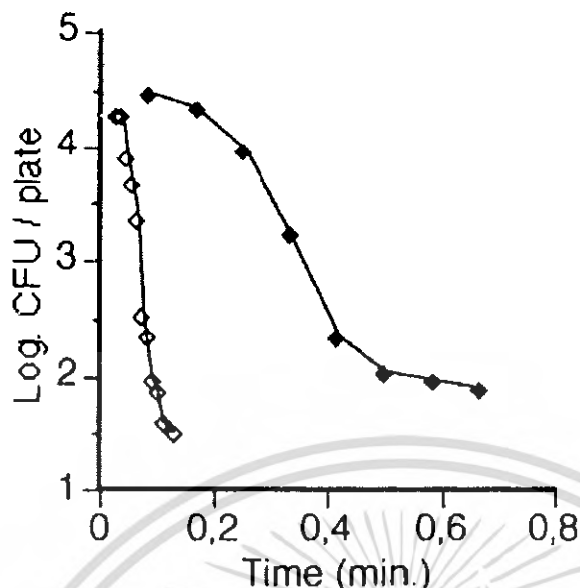


**รูปที่ 2.14** แสดงผลของไมโครเวฟโมดูลตราไซนิคเคชั่นต่อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

a) *B. stearothermophilus* b) *B. coagulans* c) *S. cerevisiae* และ d) *Aeromonas hydrophila* (จุดสี่เหลี่ยมที่บเป็นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและจุดสี่เหลี่ยมขาวใช้กระบวนการไมโครเวฟโมดูลตราไซนิคเคชั่น)

ที่มา : Sala et al. (1995)

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการไมโครเวฟโมดูลตราไซนิคเคชั่นในการทำลายจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นระหว่าง 6 – 30 เทา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อยีสต์ของกระบวนการนี้จะดีกว่าการทำลายสปอร์ ในส่วนของการทดลองศึกษากระบวนการไมโครเวฟโมดูลตราไซนิคเคชั่นต่อจุลินทรีย์ในอาหาร เช่น น้ํานม แสดงดังรูปที่ 2.15



**รูปที่ 2.15** แสดงผลของมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่นต่อ *Bacillus subtilis* ในน้ำนม เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (อุณหภูมิ 104°C) (จุดสี่เหลี่ยมทึบเป็นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและจุดสี่เหลี่ยมขาวใช้กระบวนการมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่น)

ที่มา : Sala et al. (1995)

จากรูปที่ 2.15 Sala (1995) ได้รายงานไว้ว่า ผลของกระบวนการมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่นนั้นไม่ใช่เป็นผลบวก (Additive Effect) แต่เป็นผลเสริมฤทธิ์ (Synergistic Effect) ซึ่งกันและกันและเนื่องจากจลนศาสตร์ (Kinetics) ของการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้ความร้อน จึงสามารถคำนวณหาเวลาในการทำลายจุลินทรีย์โดยใช้วิธีการเดียวกันได้

#### 2.3.4. ผลของกระบวนการมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่นต่อเอนไซม์

Sala (1995) ศึกษาการผลของกระบวนการมาโนเทอริโมลตร้าโซนิคเคชั่นต่อเอนไซม์บางชนิด ได้แก่ ไลพอกซีจีเนส (Lipoxygenase) เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase) และเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) และไลเปส (Lipase) จาก *Pseudomonas Fluorescens* โดยพบว่า กลไกการยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First Order kinetics) ในการทดลองผลของความร้อนต่อเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส พบว่า เส้นกราฟในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ต่อเวลาที่ได้จะมีลักษณะเป็นสองขั้น (Biphasic Course) กล่าวคือขั้นที่สองจะเกิดขึ้นเมื่อเอนไซม์ถูกทำลายกิจกรรมไปแล้วประมาณร้อยละ 70 โดยทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการปรากฏของไอโซไซม์ (Isozymes) ซึ่งแต่ละชนิดมี

เอกความสามารถในการทนต่อความร้อนที่แตกต่างกัน โดยมีผู้รายงานว่าอาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันเป็นค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มก้อน (Aggregates) ของเอนไซม์ แต่จากการศึกษาผลของกระบวนการมาโนเทอริโมอุลตราโซนิก-เคชันต่อเอนไซม์ชนิดนี้ พบว่า กราฟที่ได้จะไม่ปรากฏเป็นขั้น ซึ่งถ้าการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเอนไซม์แล้ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการที่คลื่นอุลตราโซนิกมีผลทำให้เอนไซม์ที่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวกระจายตัวออกจากกัน (Lopez et al.,1994) และ Sata (1995) ได้รายงานไว้ว่า ผลของกระบวนการมาโนเทอริโมอุลตราโซนิกเคชันต่อเอนไซม์นั้น ไม่ใช่เป็นผลบวก (Additive Effect) แต่เป็นผลเสริมฤทธิ์ (Synergistic Effect) ซึ่งกันและกันเช่นเดียวกันกับการยับยั้งจุลินทรีย์

## 2.4 .การประยุกต์ใช้คลื่นอุลตราโซนิกในกระบวนการแปรรูปอาหาร

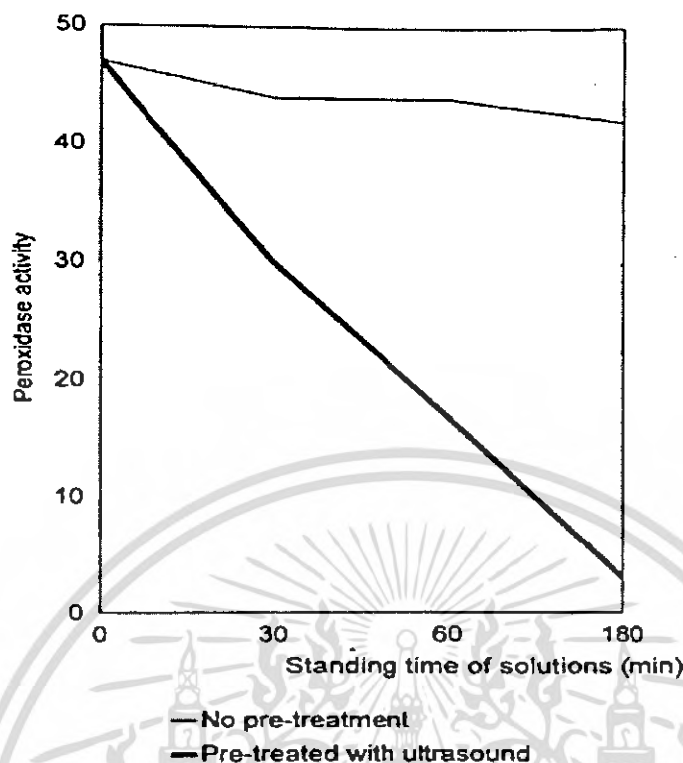
การนำคลื่นอุลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้น มีความหลากหลายและแตกต่างกันไปตามชนิดหรือประเภทของอาหารและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ Mason (1998) รายงานการประยุกต์ใช้คลื่นอุลตราโซนิกในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 1.) กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

มีการนำคลื่นอุลตราโซนิกมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ปฏิกิริยาการบ่ม (Aging) ของผลิตภัณฑ์หมัก เช่น ไวน์และสุรากลั่น โดยทำให้เกิดกลิ่นรสและรสชาติที่เฉพาะตัวในช่วงระยะเวลาการบ่มที่สั้นลง เช่น มีการศึกษาการใช้คลื่นอุลตราโซนิกขนาด 1 MHz แก่ผลิตภัณฑ์หมักดังกล่าว ซึ่งทำให้อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อเอสเทอร์เกินความสมดุลและช่วยทำให้เกิดลักษณะปรากฏที่ดี และในส่วนของวิสกี (Whisky) พบว่า ช่วยลดเวลาในการบ่มให้ต่ำกว่า 1 ปีได้

### 2.) ปฏิกิริยาเอนไซม์ (Enzyme Reactions)

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่ากิจกรรมเอนไซม์ต่าง ๆ จะถูกยับยั้งได้เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์แคปทิเวชัน ตัวอย่าง เช่น มีการศึกษาการใช้คลื่นอุลตราโซนิกขนาด 20 kHz ที่กำลัง 371 W.cm<sup>2</sup> แก่เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในผักและผลไม้สดและเป็นเอนไซม์ที่กระตุ้นให้เกิดรสชาติผิดปกติและทำให้เกิดสีน้ำตาล เมื่อให้คลื่นอุลตราโซนิกขนาดดังกล่าวแก่เอนไซม์ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์นี้ลดลง 90% แสดงดังรูปที่ 2.16



**รูปที่ 2.16** แสดงผลของคลื่นอุลตราโซนิกต่อกิจกรรมเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส

(เส้นหนาคือเอนไซม์ที่ให้คลื่นอุลตราโซนิกขนาด 20 kHz ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 20°C)

ที่มา : Mason (1998)

นอกจากนี้ยังมีรายการศึกษาการทนต่อคลื่นอุลตราโซนิกของเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ พบว่าสามารถเรียงลำดับความทนได้ดังนี้ ออกซิเดส (Oxidase) < คะตะเลส (Catalase) (ที่ความเข้มข้นต่ำ) < รีดักเตส (Reductase) และอะมัยเลส (Amylase)

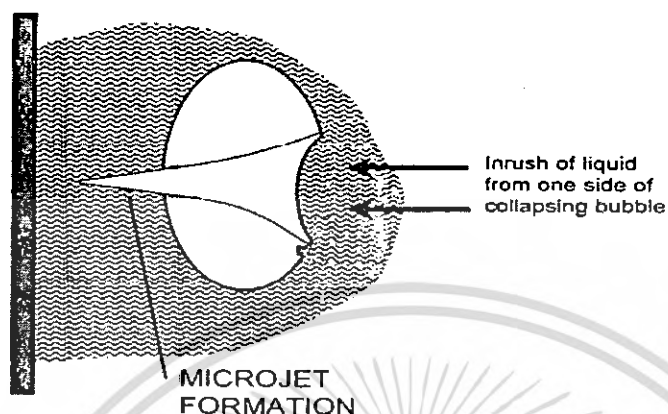
### 3.) การกระตุ้นเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Stimulation of Living Cells)

มีรายงานการศึกษาการใช้คลื่นอุลตราโซนิกช่วยในการผลิตโยเกิร์ต โดยพบว่าสามารถลดเวลาในการผลิตลงถึง 40% และยังช่วยปรับปรุงลักษณะของโยเกิร์ต เช่น เนื้อสัมผัสให้ดีขึ้น นอกจากนี้คลื่นอุลตราโซนิกยังสามารถกระตุ้นการงอกของเมล็ดพืชได้ ทำให้ปริมาณผลผลิตในการผลิตขนาดใหญ่เพิ่มสูงขึ้น โดยคลื่นอุลตราโซนิกจะเหนี่ยวนำให้การงอกของเมล็ดเกิดได้รวดเร็วขึ้นรวมทั้งกระตุ้นให้รากงอกได้เร็วขึ้น เช่น ในเมล็ดทานตะวัน เมื่อทดลองใช้คลื่นอุลตราโซนิกพบว่าจะสามารถงอกในดินได้ดีกว่าเมล็ดที่ไม่ได้รับคลื่นถึง 3 เท่า หรือในมะเขือเทศซึ่งพบว่าเมล็ดของมะเขือเทศที่ได้รับคลื่นอุลตราโซนิกจะลดระยะเวลาการสุกได้เป็นระยะเวลาถึง 10 วัน

### 4.) กระบวนการสเตอริไลเซชัน (Sterilization)

มีการนำคลื่นอุลตราโซนิกมาใช้ในการทำความสะอาด โดยช่วยลดการปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิว (Surface Decontamination) เนื่องจากการเกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็ก (Microjet) จากการที่เอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่ส่งแรงสั่นไหวหรือการสั่นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองอากาศเกิดการแตกและมีทิศทางพุ่งเข้าสู่พื้นผิวด้วยความเร็วสูง เป็นผลให้สิ่งสกปรกและแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่ที่บริเวณพื้นผิวหลุดออกแสดงดังรูปที่ 2.17



**รูปที่ 2.17** แสดงการแตกของฟองแก๊สในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิว  
ที่มา : Mason (1998)

นอกจากนั้นยังสามารถใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการทำลายแบคทีเรียที่ปนเปื้อนบนผิวของไซโดยใช้ร่วมกับสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Bactericide) และคลื่นอัลตราโซนิกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อด้วยสารเคมีเนื่องจากทำให้เซลล์แบคทีเรียที่เกาะกลุ่มกันอยู่เกิดการแตกกระจาย เป็นผลให้สารเคมีสามารถสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น

#### 5.) การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการทำให้เกิดอิมัลชัน (Ultrasonic emulsification)

คลื่นอัลตราโซนิกทำให้อิมัลชันเสถียรขึ้น เนื่องจากการที่ฟองอากาศเกิดการแตกตรงบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟส (Phase Boundary) ของของเหลวสองชนิดที่เข้ากันไม่ได้ ซึ่งคลื่นกระแทกที่มีแรงดันสูงที่เกิดขึ้นจะทำให้การผสมและเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในแบบที่เรียกว่า ลิควิดวิสเซิล (Liquid Whistle) สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ไหลอย่างต่อเนื่อง (Flow Processing) และสามารถเชื่อมต่อกับระบบประมวลผลได้ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณในการผลิตได้สูงถึง 12,000 ลิตรต่อชั่วโมง เช่น ในการผลิตน้ำผลไม้ ซอสมะเขือเทศและมายองเนส เป็นต้น

#### 6.) การสกัด (Extraction)

คลื่นอัลตราโซนิกจะช่วยทำให้ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในวัสดุที่นำมาสกัดได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer) เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้คลื่นอัลตราโซนิกยังไปทำลายพื้นผิวที่บริเวณผนังเซลล์และภายในเซลล์ทำให้สารที่ต้องการสกัดสามารถออกมาได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่น การสกัดน้ำตาลออกจากหัวบีต (Sugar Beets) การสกัดโปรตีนจากสาหร่ายและจากถั่วเหลืองที่สกัดไขมัน การสกัดสารในชาออกจากใบชาในการผลิตชาสำเร็จรูปละลายได้ทันที เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.) การใช้คลื่นอุลตราโซนิคกับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (Meat Products)

การใช้คลื่นอุลตราโซนิคจะช่วยสกัดสารพวกโปรตีนที่ละลายในน้ำเกลือที่อยู่ในเนื้อสัตว์ออกมาได้เพิ่มมากขึ้นโดยใช้ร่วมกับสารละลายเกลือ ซึ่งคลื่นอุลตราโซนิคจะไปทำลายโครงสร้างไมโอไฟบริล (Myofibrils) ภายในเนื้อสัตว์ และทำให้สารละลายภายในเซลล์ไหลออกมาเป็นผลให้เนื้อสัตว์เกาะติดกันได้ดีขึ้น นอกจากนี้คลื่นอุลตราโซนิคยังทำให้เนื้อสัตว์มีความนุ่มเพิ่มขึ้น โดยมีผลทำลายเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective Tissues) ทำให้มีปริมาณลดลง

### 8.) การตกผลึก (Crystallization)

คลื่นอุลตราโซนิคช่วยในการก่อตัวของผลึกขณะเริ่มต้น (Initiation of Seeding) และช่วยในการขยายขนาดผลึก (Crystal Growth) โดยมีรายงานว่า คลื่นอุลตราโซนิคช่วยเร่งอัตราการเกิดนิวเคลียส (The Nucleation Rate) และเร่งอัตราการขยายขนาดผลึกในสารละลายอิ่มตัว (Saturated) หรือในอาหารหรือตัวกลางที่เย็นยิ่งยวด (Supercooled medium) ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากปรากฏการณ์แคป-วิตชัน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตยาและในผลไม้แช่เยือกแข็ง เช่น สตรอเบอรี่แช่เยือกแข็ง โดยช่วยทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกของน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์ รวมทั้งทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์มีขนาดเล็กลงเป็นผลให้โอกาสในการทำลายเซลล์เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลงไปด้วย

### 9.) การกำจัดแก๊สออกจากของเหลว (Degassing of Liquids)

การกำจัดแก๊สออกจากของเหลว เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์แคปวิตชัน ซึ่งแก๊สที่ละลายอยู่ (Dissolved Gases) หรือฟองอากาศ (Gas Bubbles) ขนาดเล็กภายในสารละลายจะเปรียบเสมือนนิวเคลียสสำหรับการเกิดฟองแก๊สที่จะขยายขนาดเพิ่มขึ้น และเกิดการแตกออกเมื่อได้รับคลื่นอุลตราโซนิค เป็นผลให้ฟองอากาศที่อยู่ภายในของเหลวรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่บริเวณพื้นผิวและหลุดออกไป เช่น การใช้คลื่นอุลตราโซนิคกับของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น ซอศโกแลต ทำให้ลดการเกิดฟองอากาศภายในผลิตภัณฑ์ได้

### 10.) การใช้คลื่นอุลตราโซนิคช่วยในการกรอง (Acoustically Aided Filtration)

คลื่นอุลตราโซนิคช่วยทำให้อัตราการกรองของของเหลวเพิ่มขึ้น โดยทำให้เกิดผลที่สำคัญต่อการกรองสองประการ ได้แก่ ทำให้เกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Fine Particles) ทำให้การกรองเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และอีกประการหนึ่ง คือ คลื่นอุลตราโซนิคจะให้พลังงานบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการสั่นของวัตถุ (Vibration Energy) แก่ของเหลว มีผลทำให้อนุภาคบางส่วนยังคงแขวนลอยอยู่ได้ และทำให้สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้คลื่นอุลตราโซนิคในการช่วยการกรองน้ำแอปเปิ้ล ทำให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น

### 11.) การทำแห้ง (Acoustic Drying)

การใช้คลื่นอุลตราโซนิคร่วมกับกระบวนการทำแห้ง จะทำให้สามารถลดอุณหภูมิการทำแห้งลงได้ และทำให้ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันหรือการสลายตัว (Degradation) ของสารลดลง มีการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

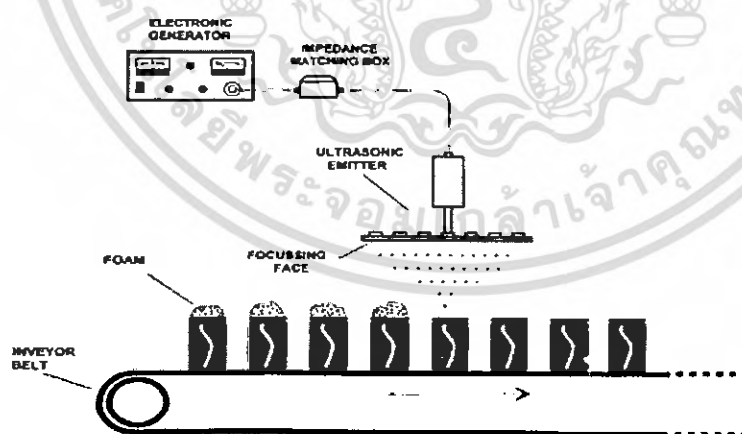
หลากหลายเกี่ยวกับการนำคลื่นอุลตราโซนิกมาใช้ร่วมกับกระบวนการทำแห้งในการผลิตอาหารประเภทต่าง ๆ และมีสภาวะที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดปรากฏการณ์แคปิวิตารีทำให้โครงสร้างของวัตถุดิบถูกทำลาย ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 30 – 60%

### 12.) ผลต่อเมล็ดข้าว (Effects on Rice Grains)

มีการศึกษาการให้คลื่นอุลตราโซนิกแก่เมล็ดข้าวในน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้สสารขอยกออกมาจากเมล็ดข้าวได้รวดเร็วขึ้นในระหว่างการหุง เนื่องจากเกิดการเกิดปรากฏการณ์แคปิวิตารีตรงบริเวณพื้นผิวของข้าวทำให้เกิดการทำลายผนังชั้นนอกของเมล็ดข้าว เป็นผลให้ลดระยะเวลาในการหุงต้มและเวลาในการเกิดเจลสั้นลง

### 13.) การกำจัดโฟม (Defoaming)

Gallego-Juarez (1998) รายงานว่า โฟม คือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของแก๊สภายในของเหลวซึ่งมีระยะห่างฟองแก๊สแต่ละฟองน้อยมาก ซึ่งในระบบของโฟมนั้นพบว่าอัตราส่วนของปริมาตรอากาศหรือแก๊สและของเหลวมีค่าสูงมากและค่า Bulk Density ของโฟมมีค่าใกล้เคียงกับแก๊สวิธีการดั้งเดิมในการกำจัดโฟมคือการใช้ความร้อน สารเคมี ใช้กระแสไฟฟ้าและใช้แรงกลซึ่งมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปการบรรจุของเหลวที่มีโฟมล้นออกมาจากภาชนะบรรจุหลังจากเติมลงไปและนำไปปิดผนึกทันที จะทำให้ปริมาตรของของเหลวในภาชนะบรรจุลดลง การกำจัดโฟมที่ล้นเกินออกมาจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการใช้คลื่นอุลตราโซนิกเพื่อกำจัดโฟมที่ล้นออกมาแสดงดังรูปที่ 2.18 โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการทำลายโฟมด้วยวิธีอื่นๆ และสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.18 แสดงการกำจัดโฟมโดยใช้คลื่นอุลตราโซนิกในกระบวนการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง

ที่มา : Gallego-Juarez (1998)

## บทที่ 3

# วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของกุ้งขาว ในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส ความชื้น ี ปริมาตร และการสูญเสียน้ำหนักหลังการให้ความร้อน ร่วมกับการคลีนอุลตราโซนิก

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

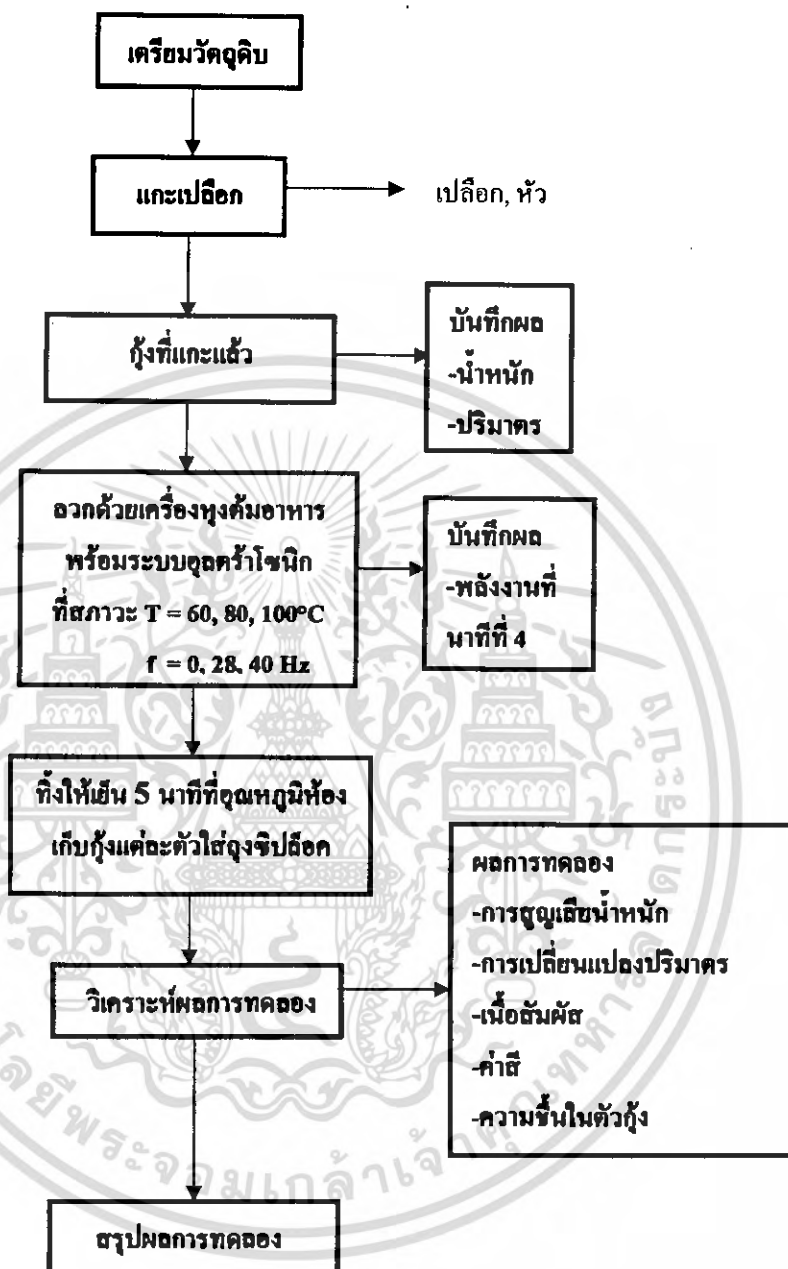
#### 3.1.1 วัสดุ

1. กุ้งขาวขนาด 60-70 ตัวตอกิโลกรัม ซื้จากบ่อกุ้ง จังหวัดสมุทรปราการ ขนส่งทางรถยนต์โดยบรรจุในกล่องโฟมพร้อมน้ำแข็งบด จากนั้นแบ่งบรรจุใส่ถุงเก็บรักษาในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะใช้ในการทดลอง

#### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องหุงต้มอาหารพร้อมระบบอุลตราโซนิก
2. ตู้อบลมร้อน (Memmert, UFB400)
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก แสดงผลเป็นตัวเลขจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Shimadzu, BX3000)
4. เครื่องวัดค่าสี Colorimeter (Juki, JC801)
5. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, TA-XT.Plus)

### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง

นำกุ้งที่เก็บรักษาในตู้แช่แข็งออกมาละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเด็ดหัวและแกะเปลือก กุ้งขาวออกโดยเหลือส่วนหางของกุ้งไว้ (Tail on) ทำการรักษาอุณหภูมิของตัวกุ้งตลอดขั้นตอนการแกะเปลือกกุ้งที่อุณหภูมิ 5 °C จากนั้นนำกุ้งมาทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและความถี่คลื่นตามที่กำหนด เก็บตัวอย่างระหว่างทำการให้ความร้อนครั้งละ 3 ตัวอย่างทุก ๆ นาที ขั้นตอนการทดลอง แสดงในรูปแบบที่

3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของกุ้ง

ทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของกุ้งขาวหลังผ่านการให้ความร้อน ดังนี้

#### 3.3.1 ความชื้นในตัวของกุ้ง (Moisture content, Wet basis)

เลือกกุ้งขาวสดที่แกะเปลือกแล้วขนาด 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จำนวน 3 ตัวสำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง หลังผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด นำกุ้งแต่ละตัวมาสับละเอียดและแยกบรรจุใส่ภาชนะที่สะอาด บันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำกุ้งออกจากตู้อบใส่ในโถดูความชื้นเป็นเวลา  $\frac{1}{2}$  ชั่วโมง บันทึกค่าน้ำหนักสุดท้าย

คำนวณหาความชื้นในตัวของกุ้ง จากสมการ

$$\% \text{ ความชื้น, wb} = \frac{(\text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักกุ้งสุดท้าย}) \times 100}{\text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น}} \quad (3.1)$$

#### 3.3.2 การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss)

เลือกกุ้งขาวสดที่แกะเปลือกแล้วขนาด 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จำนวน 3 ตัวสำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง นำกุ้งแต่ละตัวมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น หลังผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด นำกุ้งแต่ละตัวมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกค่าน้ำหนักสุดท้าย

คำนวณหาการสูญเสียน้ำหนักของกุ้ง จากสมการ

$$dw = \frac{\text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักกุ้งสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น}} \quad (3.2)$$

#### 3.3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ทำการหาปริมาตรด้วยวิธีแทนที่ด้วยของเหลว โดยเลือกกุ้งขาวสดที่ลอกเปลือกแล้วขนาด 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จำนวน 3 ตัวสำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง นำสารละลายเกลือพร้อมภาชนะบรรจุวางบนเครื่องชั่งแล้วกดปุ่ม Tare จากนั้นนำกุ้งแต่ละตัวมาชั่งน้ำหนักในสารละลายเกลือ บันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น หลังผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด นำกุ้งแต่ละตัวมาชั่งน้ำหนักในสารละลายเกลืออีกครั้ง บันทึกค่าน้ำหนักสุดท้าย

$$\text{ปริมาตรของกุ้ง} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น}}{\text{ความหนาแน่นของสารละลายเกลือ}} \quad (3.3)$$

คำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จากสมการ

$$\text{ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง (dV)} = \frac{\text{ปริมาตรกุ้งเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรกุ้งสุดท้าย}}{\text{ปริมาตรเริ่มต้น}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ค่าสี

เลือกกุ้งขาวสดที่ปอกเปลือกแล้วขนาด 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จำนวน 3 ตัว สำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง หลังผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด นำกุ้งแต่ละตัวมาสับละเอียด จากนั้นใส่ลงในตลับวัดสีทีละตัว ทำการวัดค่าสีในระบบ Hunter Lab (L ค่าความสว่าง, a ค่าความเป็นสีแดง, b ค่าความเป็นสีเหลือง) ด้วยเครื่องวัดสี โดยกุ้งแต่ละตัวจะทำกรวัดค่าสีทีละตัวละ 3 ครั้ง

### 3.3.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส

เลือกกุ้งขาวสดที่ปอกเปลือกแล้วขนาด 60-70 ตัวต่อกิโลกรัม จำนวน 3 ตัวสำหรับแต่ละหน่วยการทดลอง หลังผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะที่กำหนด นำกุ้งแต่ละตัวมาทดสอบด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยใช้หัววัดแบบ Warner Bratzler Blade

กำหนดค่าซึ่งใช้ในการตั้งเครื่อง ดังนี้

Test Mode	Compression
Pre-Test Speed	3.00 mm/sec
Test Speed	3.00 mm/sec
Post-Test Speed	10.00 mm/sec
Target Mode	Distance
Distance	30.000 mm
Trigger Type	Auto (Force)
Trigger Force	5.0 g

ผลการทดสอบแสดงด้วยกราฟแรง-ระยะทาง บันทึกค่าความชันของกราฟในช่วง 200 กรัม ถึง 300 กรัม

### 3.3.6 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

การสิ้นเปลืองพลังงานวัดจากมิเตอร์กิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยบันทึกค่าเริ่มต้นเมื่อเริ่มเปิดตัวทำความร้อน เพื่อทำอุณหภูมิตามสภาวะที่กำหนดและตัวกำเนิดคลื่นเมื่อใช้สภาวะการให้ความร้อน ร่วมกับการใช้คลื่นความถี่อัลตราโซนิกและบันทึกค่าสุดท้ายเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง ณ สภาวะนั้น ๆ เปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าเมื่อทำการทดลองโดยไม่ใช้คลื่นเทียบกับการทดลองที่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

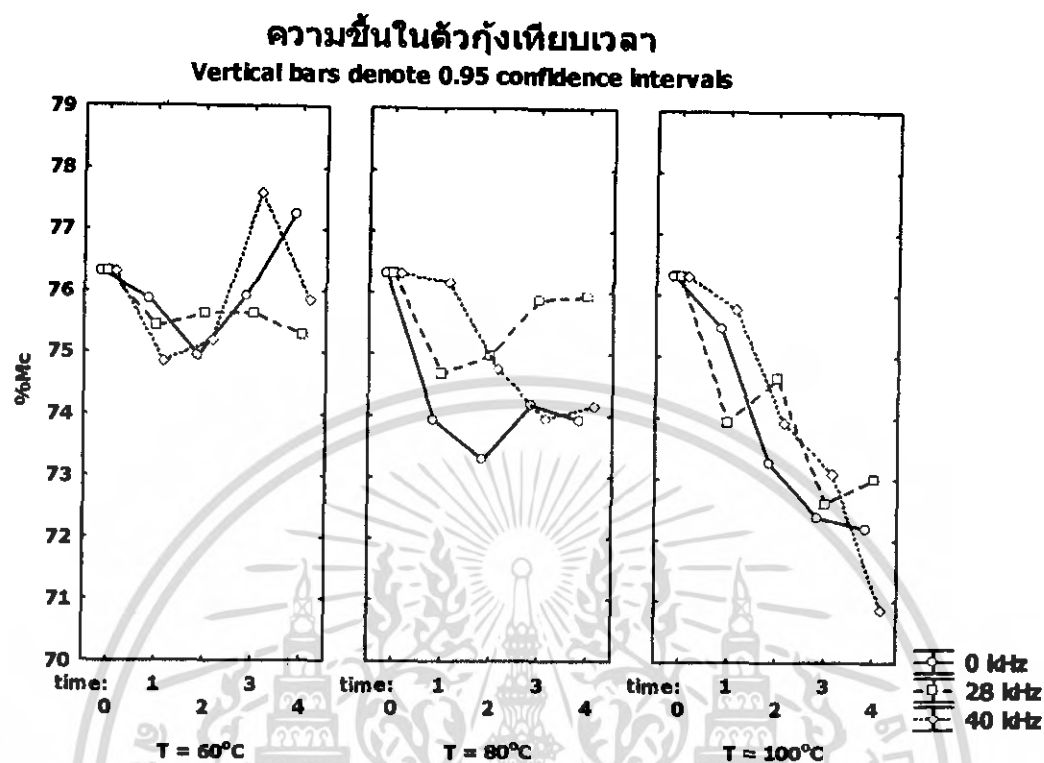
#### 4.1 ผลการทดลองที่ได้

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของกึ่งขาวหลังจากผ่านการให้ความร้อน ณ สภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

T (°C)	F (kHz)	t (min)	%mc	dw	dv	L	a	modulus (g/mm <sup>2</sup> )
60	0	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	72.74	0.0243	0.0176	45.07	0.70	2308.95
		2	72.42	0.0353	0.0161	48.08	3.65	2436.67
		3	73.20	0.0337	0.0214	52.47	5.79	2300.95
		4	74.19	0.0512	0.0337	54.08	6.24	2119.62
	28	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	70.19	0.0166	0.0222	43.20	0.74	2329.50
		2	68.90	0.0241	0.0448	48.94	2.10	2356.56
		3	70.86	0.0346	0.0359	52.46	3.46	2342.47
		4	73.06	0.0364	0.0362	56.18	6.14	2046.31
	40	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	67.96	0.0202	0.0192	43.60	1.04	2461.39
		2	68.08	0.0260	0.0333	53.66	7.83	2175.98
		3	70.09	0.0365	0.0474	53.80	7.22	1941.54
		4	68.09	0.0454	0.0451	55.54	6.98	1771.79
	80	0	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80
1			73.19	0.0567	0.0902	58.60	5.28	1147.92
2			72.30	0.0929	0.1425	64.27	8.87	1262.95
3			72.36	0.1251	0.2044	65.90	10.24	1059.99
4			73.10	0.1647	0.2203	66.19	10.09	1109.33
28		0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	75.18	0.0520	0.0878	56.64	7.46	1449.49
		2	73.78	0.0960	0.1387	62.33	10.20	1026.12
		3	73.96	0.1057	0.1840	63.66	11.80	913.13
		4	73.02	0.1575	0.2160	65.04	10.60	1059.93
40		0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	74.79	0.0493	0.0798	58.41	6.77	1125.35
		2	73.48	0.0892	0.1139	63.49	10.89	1068.51
		3	70.44	0.1268	0.1830	65.39	11.15	1278.84
		4	72.49	0.1503	0.2004	67.04	11.79	1233.93
100		0	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80
	1		73.34	0.1035	0.1508	66.83	12.35	1441.06
	2		71.43	0.1881	0.2288	65.97	13.02	1401.93
	3		70.87	0.2635	0.2681	65.41	12.51	1347.71
	4		70.38	0.2861	0.3479	67.40	12.70	1280.83
	28	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	70.81	0.1001	0.1029	62.04	9.30	1344.62
		2	70.32	0.1727	0.2208	65.49	9.78	1294.96
		3	68.99	0.2325	0.2954	64.94	11.39	1194.18
		4	70.12	0.2720	0.3177	66.76	11.13	1226.81
	40	0	0.00	0.0000	0.0000	33.53	0.80	2608.43
		1	71.59	0.1038	0.1414	61.58	13.28	1030.22
		2	71.36	0.2028	0.2338	62.42	13.67	1120.25
		3	70.96	0.2568	0.2936	65.28	14.05	1092.24
		4	69.79	0.2643	0.2759	66.57	13.15	1049.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารวิจัยที่ผ่านการพิจารณาและอนุมัติโดยคณะกรรมการคณาจารย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ผลต่อความชื้นในตัวกึ่ง



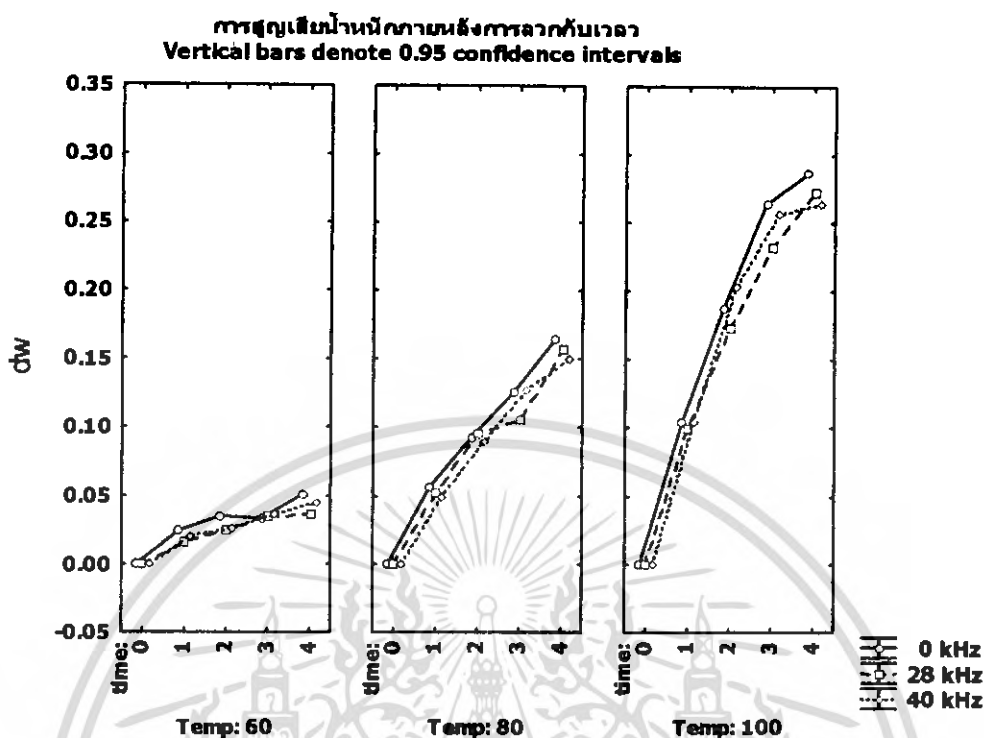
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในตัวกึ่งเทียบเวลา

จากรูปที่ 4.1 เมื่อเริ่มต้นกึ่งที่ผ่านการแกะเปลือกมีปริมาณความชื้นประมาณ 76.3% หลังผ่านการให้ความร้อนมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง  $80^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ในทำนองเดียวกันเมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนมากขึ้นมีผลให้ค่าความชื้นในกึ่งมีค่าลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ไม่มีความแตกต่างของความชื้นมากนัก

การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  ร่วมกับคลื่น 40 kHz จะมีผลต่อค่าความชื้นในตัวกึ่งน้อยที่สุดในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  แบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกมีความชื้นต่ำสุด

#### 4.1.2 ผลต่อการสูญเสียน้ำหนัก

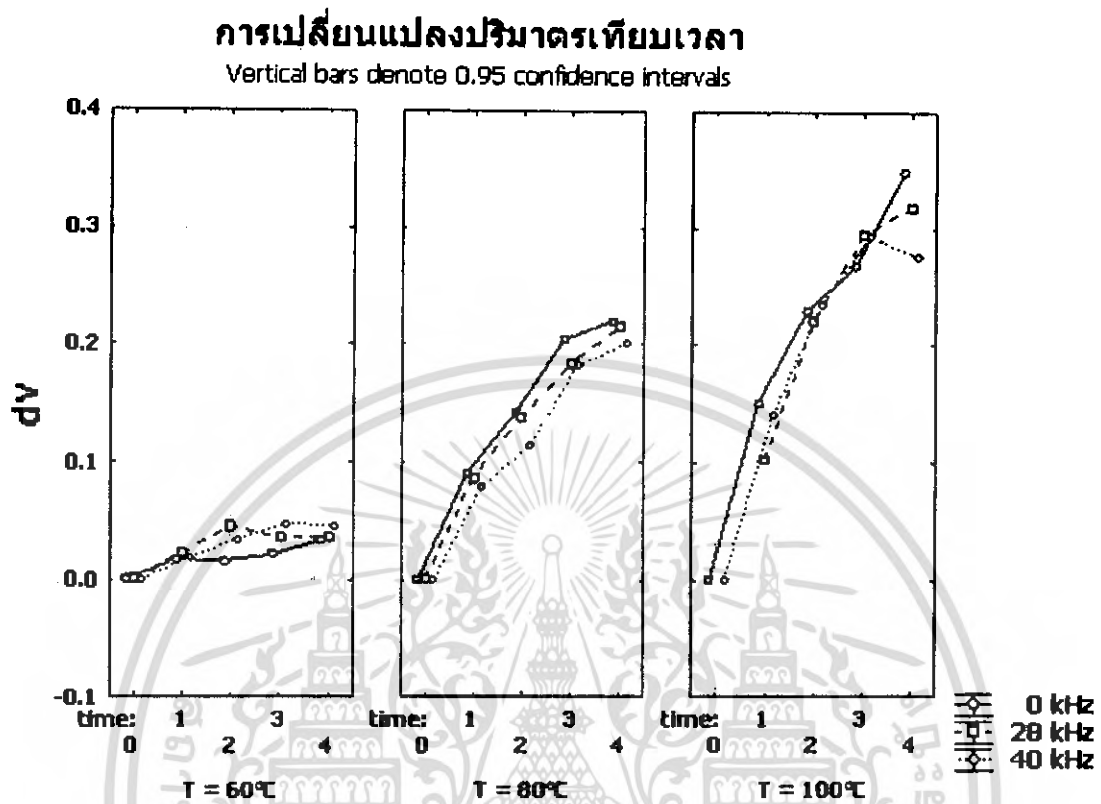


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักเทียบเวลา

จากรูปที่ 4.2 เมื่อเริ่มต้นกึ่งขาวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ จะพบแนวโน้มการสูญเสีย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น แนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักจะเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ อุณหภูมิ 80 และ 100 °C และเมื่อให้ความร้อนเป็นระยะเวลามากขึ้น จะมีผลทำให้แนวโน้มค่าการ สูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้ พบว่าการให้ความร้อนที่ไม่ใช้คลื่นความถี่อัลตราโซนิค จะมีผลทำให้การสูญเสียน้ำหนัก มากกว่าการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่ที่ 28 และ 40 kHz ไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน

### 4.1.3 ผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเทียบเวลา

จากรูปที่ 4.3 กุ้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้กุ้งมีการหดตัวมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จะเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 60 °C ไม่มีความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ชัดเจน

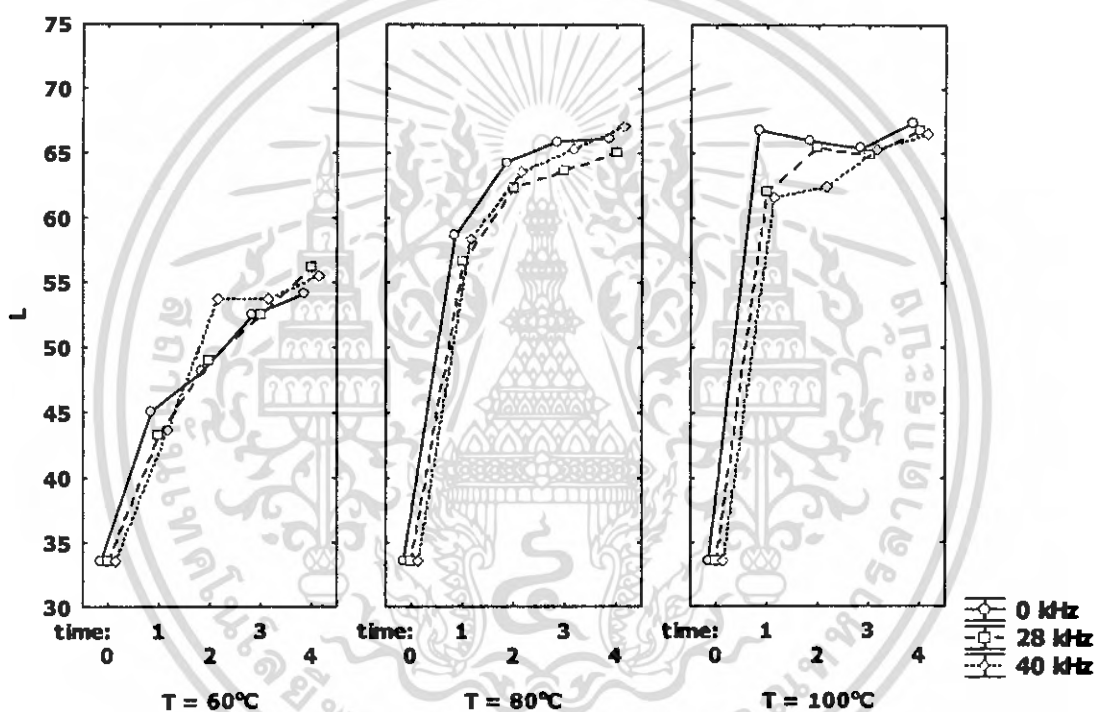
นอกจากนี้ พบว่าการให้ความร้อนที่ไม่ใช้คลื่นความถี่จะมีผลทำให้มีเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากที่สุด และที่อุณหภูมิ 80 °C จะพบว่าการให้ความร้อนที่คลื่นความถี่ 28 kHz มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากกว่าการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่ที่ 40 kHz

#### 4.1.4 ผลต่อค่าสี

ค่าสีที่ทำการวัดเป็นค่าสีในระบบ Hunter Lab แสดงเป็นค่า L (ค่าความสว่าง ค่า 100 แสดงความสว่าง ค่า 0 แสดงความมืด), a (ค่า + แสดงความเป็นสีแดง และค่า - แสดงความเป็นสีเขียว) และ b (ค่า + แสดงความเป็นสีเหลือง และค่า - แสดงความเป็นสีน้ำเงิน) ผลที่ได้พบว่า การเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นในตัวกุ้งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากค่า L และ a

##### 4.1.4.1 ค่าความสว่าง (L)

การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง(L)เทียบเวลา  
Vertical bars denote 0.95 confidence intervals



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L) เทียบเวลา

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเริ่มต้นกุ้งที่ผ่านการแกะเปลือกจะมีค่าความสว่างเริ่มต้นเฉลี่ย 33.48 และหลังจากผ่านการให้ความร้อน ค่าความสว่างที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนนานขึ้น ค่าความสว่างที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแบบสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ลดลงตามลำดับ

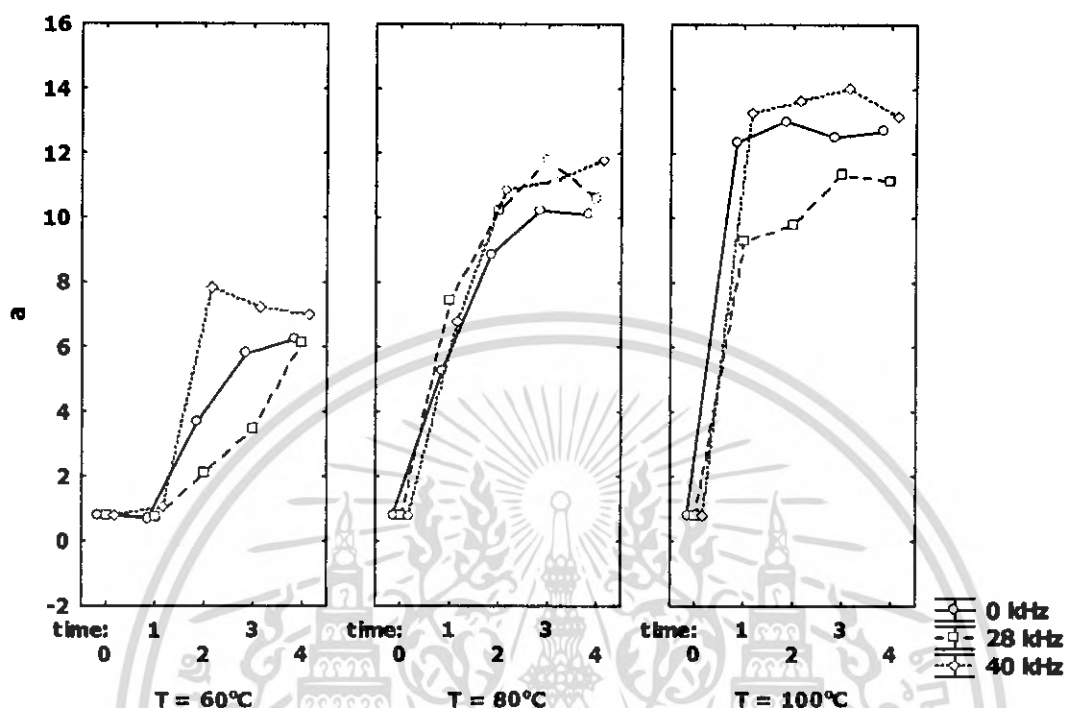
นอกจากนี้ จะพบว่า การให้ความร้อนที่ไม่ใช้คลื่นความถี่จะมีค่าความสว่างมากกว่าการให้ความร้อนร่วมกับการใช้ความถี่ แต่ที่คลื่นความถี่ 28 และ 40 kHz ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.4.2 ค่าความเป็นสีแดง (a)

## การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดง(a)เทียบเวลา

Vertical bars denote 0.95 confidence intervals



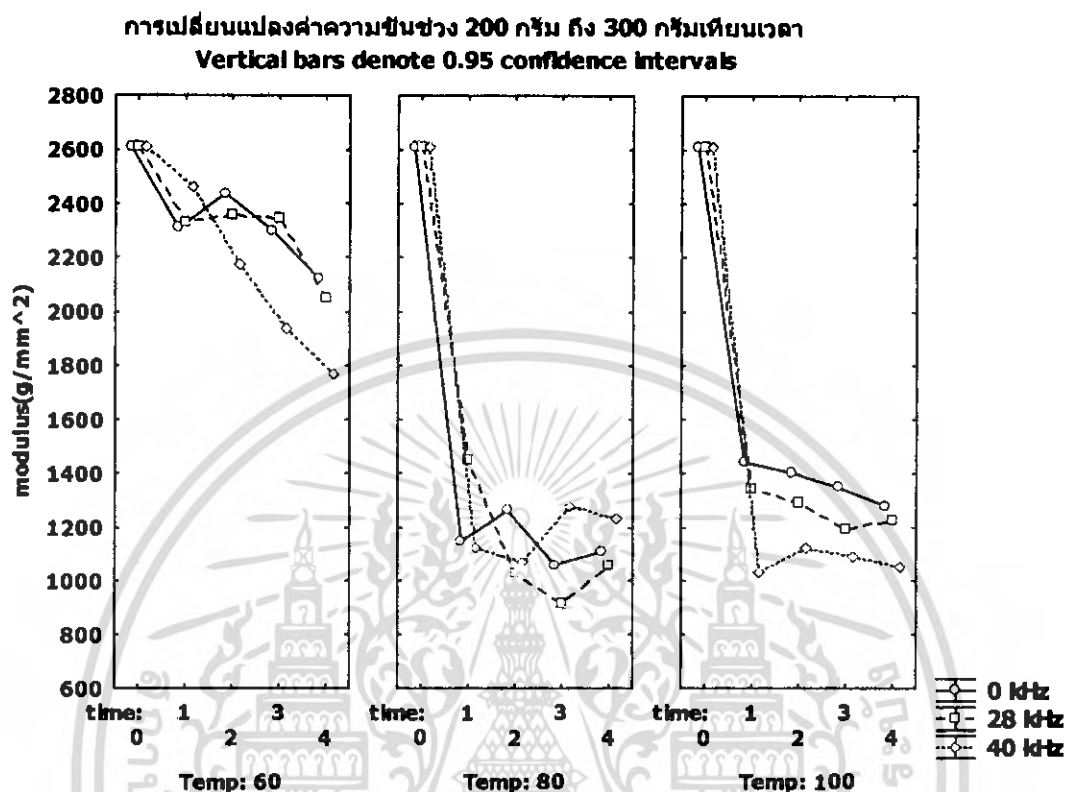
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีแดง (a) เทียบเวลา

จากรูปที่ 4.5 ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าค่าความเป็นสีแดงมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากผ่านการให้ความร้อนไปแล้ว ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้น ค่าความเป็นสีแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นแบบสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 คือมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ

นอกจากนี้ พบว่าการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่อัลตราโซนิก 40 kHz ในทุกอุณหภูมิ จะให้ค่าความเป็นสีแดงมากที่สุด ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความเป็นสีแดงของกุ้งที่ใช้คลื่นความถี่ต่ำกว่า การใช้คลื่นความถี่ที่ 40 kHz ขึ้นกับผลกระทบร่วมกันของอุณหภูมิและความถี่คลื่น

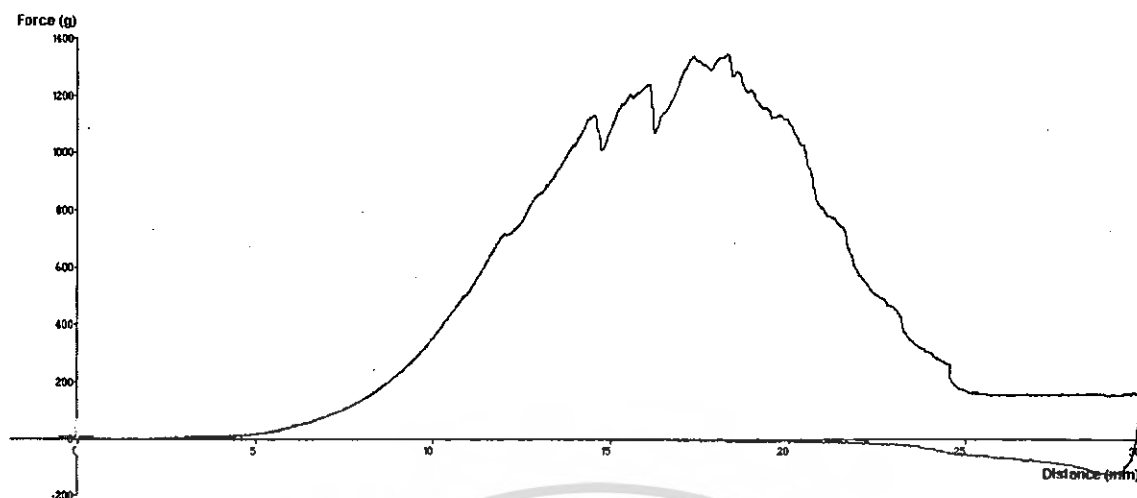
#### 4.1.5 ผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส

##### 4.1.5.1 ค่าความชื้นของกราฟช่วง 200 กรัม ถึง 300 กรัม



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของกราฟที่ช่วง 200 กรัม ถึง 300 กรัมเทียบเวลา

ลักษณะเนื้อสัมผัสวัดจากค่าความชื้นกราฟช่วง 200 กรัม ถึง 300 กรัม ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงถึงความแน่นเนื้อหรือความยืดหยุ่นของกึ่งที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่า ความแน่นเนื้อของกึ่งมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อนนานขึ้นและใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C กึ่งที่มีการผ่านการให้ความร้อนที่ไม่ใช่คลื่นกับการใช้คลื่นที่ความถี่ 28 kHz ความแน่นเนื้อน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 100°C และที่อุณหภูมิ 60°C มีความแน่นเนื้อหรือความยืดหยุ่นมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.6 นอกจากนี้ พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 100°C ที่คลื่นความถี่ 40 kHz ให้ค่าความแน่นเนื้อน้อยที่สุด และการไม่ใช่คลื่นความถี่ กึ่งจะมีค่าความแน่นเนื้อมากที่สุด แต่ที่อุณหภูมิ 80°C ที่คลื่นความถี่ 28 kHz ให้ค่าความแน่นเนื้อมากที่สุด ส่วนที่คลื่นความถี่ 0 และ 40 kHz ไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงจากการวัดกับระยะทาง

#### 4.1.6 ผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kW.hr)	%การประหยัดพลังงาน เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ความถี่
60	0	0.5400	-
60	28	0.5250	2.7778
60	40	0.4925	8.7963
80	0	1.0800	-
80	28	0.9050	16.2037
80	40	0.7900	26.8519
100	0	2.0500	-
100	28	1.8200	11.2195
100	40	1.7750	13.4146

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 การวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการให้ความร้อนกุ้งขาวรวมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 28 และ 40 kHz เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนกุ้งขาวแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิก พบว่าการให้ความร้อนกุ้งขาวแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกสิ้นเปลืองค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่าการใช้คลื่นอุลตราโซนิกในทุกอุณหภูมิ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนรวมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 28 และ 40 kHz พบว่าการให้ความร้อนรวมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 40 kHz สิ้นเปลืองค่าพลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด และสามารถประหยัดได้ถึง 8.80-26.85% ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิก โดยพิจารณาคุณสมบัติของกุ้งขาวภายหลังการให้ความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณความชื้นในตัวกุ้ง การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าสี สภาวะที่ใช้ในการทดลองอื่น ได้แก่ อุณหภูมิในการให้ความร้อนที่ 60, 80 และ 100°C ความถี่คลื่นอุลตราโซนิกที่ใช้ 0, 28 และ 40 kHz และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน 0-4 นาที สามารถสรุปผลได้

-การให้ความร้อนกุ้งขาวที่มีการไม่ใช้คลื่นความถี่อุลตราโซนิกร่วมกับอุณหภูมิที่ 80°C และ 100°C ให้ค่าความสว่าง (L) มีค่ามากที่สุด

-การให้ความร้อนในทุกอุณหภูมิร่วมกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกที่ความถี่ 40 kHz จะให้ค่าความเป็นสีแดง (a) มากที่สุดเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

-การให้ความร้อนกุ้งขาวโดยไม่ใช้คลื่นร่วมที่อุณหภูมิ 80°C และ 100°C มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้นมากที่สุด

-การให้ความร้อนกุ้งขาวโดยไม่ใช้คลื่นร่วมที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100°C มีค่าการสูญเสียน้ำหนักภายหลังการให้ความร้อนมากกว่าการให้ความร้อนร่วมกับการใช้คลื่นความถี่อุลตราโซนิก

-การให้ความร้อนกุ้งขาวโดยไม่ใช้ความถี่คลื่นอุลตราโซนิก ที่อุณหภูมิ 80°C จะให้ค่าความชื้นในตัวกุ้งน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่มีค่ามากที่สุด

-ความแน่นเนื้อหรือความยืดหยุ่นของกุ้งภายหลังการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา และที่อุณหภูมิ 100°C คลื่นความถี่ 40 kHz จะทำให้กุ้งมีความแน่นเนื้อต่ำสุด

-การให้ความร้อนร่วมกับการใช้ความถี่คลื่นอุลตราโซนิกที่ 40 kHz มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด และการให้ความร้อนแบบไม่ใช้คลื่นอุลตราโซนิกร่วมจะสิ้นเปลืองค่าพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในทุกอุณหภูมิ

### 5.2 ปัญหาที่พบ

เครื่องหุงต้มพร้อมระบบอุลตราโซนิกได้ออกแบบที่ระบายน้ำที่มีขนาดเล็ก ทำให้มีการระบายน้ำทิ้งได้ช้า และตัวเครื่องมีถังบรรจุที่มีความลึกมากเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองตัวกลางและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการให้ความร้อน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การศึกษาผลของเอมไซม์ที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของกุ้ง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2549. "ยุทธศาสตร์กุ้งและผลิตภัณฑ์."  
<http://www.fisheries.go.th/planning/kung.ppt>
- ไกรวุฒิ คัล้ายแจ้, พิเชษฐ ดันจรรย์านนท์ และสุรเชษฐ์ ประดับมุข. 2547. "ผลของอุณหภูมิ เวลาการ  
 ทอดและความถี่คลื่นต่อการทอดด้วยเครื่องอุลตราโซนิก." ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธีรกร กงบังเกิด. 2548. "การใช้คลื่นอุลตราโซนิกในกระบวนการแปรรูปอาหาร."  
[http://www.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/79\\_file.pdf](http://www.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/79_file.pdf)
- เมติมศักดิ์ จารยะพันธ์. 2548. "กุ้งไทยในการเจรจา FTA ไทย - สหรัฐอเมริกา." จดหมายข่าว  
 นานาสัตว์น้ำ. 8(4) : 2.
- ภัทธี ดาวรัตน์, สลยุทธ เฟิงสุวรรณ และสุวรรณวลัย สว่างเนตร. 2548. "การออกแบบและสร้าง  
 เครื่องหุงต้มอาหารพร้อมระบบอุลตราโซนิก." ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุทธวัฒน์ เบญจกุล. 2549. "การศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายหลังการตาย  
 และการรักษาคุณภาพของกุ้งกุลาดำและกุ้งขาวที่เพาะเลี้ยงในประเทศไทย."  
<http://rde.biotech.or.th/rdedocs/proposal/1212pp/abstractth.doc>
- Burgos, J., J. A. Ordonez and F. J. Sala. 1972. "Effect of ultrasonic waves on the heat resistance  
 of *Bacillus cereus* and *Bacillus licheniformis* spores." *Appl. Microbiol.* 24 : 497-498.
- FAO. 2006. "Handling and Processing Shrimp."  
<http://www.fao.org/wairdocs/tan/x5931E/x5931e01.html>
- Ferruh Erdogan. 2001. "A Predictive Model on Moisture and Yield Loss in Phosphate-  
 Treated, Cooked Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*)." *Journal of Aquatic Food Product  
 Technology.* 9(10) : 31-45.
- Ferruh Erdogan, Murat O. Balaban, W. Steven Otwell and Laura Garrido. 2004. "Cook  
 related yield loss for pacific white (*Penaeus vannamei*) shrimp previously treated with  
 phosphates: effects of shrimp size and internal temperature distribution." *Journal of  
 Food Engineering.* 22(64) : 297-300.
- Hoover, D. G. 2000. "Ultrasound. Kinetics of microbial inactivation for alternative food  
 processing technologies." *J. Food Sci. Supplement* : 93-95.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Lopez, P., F. J. Sala, J. L. Fuente, S. Condon, J. Raso and J. Burgos. 1994. "Inactivation of peroxidase, lipxygenase and polyphenoloxidase by manothermosonication." *J. Agri. Food Chem.* 42 : 552-556.
- Malcolm, J.W. and Timothy, J. 1998. "Ultrasound in Food Processing." London : Blackie Academic & Professional
- Mason, T. J. 1998. "Power ultrasound in food processing – the way forward." *In* "Ultrasound in Food Processing." Povey, M. J. W. and Mason, T. J. (eds.). Blackie Academic & Professional, London.
- Mason, T. J. , Paniwnyk, L. , and Lorimer, J. P. 1996. "The uses of ultrasound in food technology." *Ultrasonics Sonochemistry* 3 : 253-260.
- Mett, H., B. Schacher, and L. Wegman. 1988. "Ultrasonic disintegration of bacteria may lead to irreversible inactivation of lactamase." *J. Antimicrob. Chemotherapy* 22 : 292-298.
- Ordonez, J. A., B. Sanz, P. E. Hernandez and P. Lopez-Lorenzo. 1984. "A note on the effect of combined ultrasonic and heat treatments on the survival of thermophilic streptococci." *J. Appl. Bacteriol.* 56 : 175-177.
- Sala, F. J., J. Burgos, S. Condon, P. Lopez and J. Raso. 1995. "Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes." pp. 176-204. *In* "New methods of food preservation." G. W. Gould (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Suslick, K. S. 1988. "Homogeneous sonochemistry." pp. 121 – 164. *In* "Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects." K. S. Suslick (ed.). VCH Publishers, Inc. New York.
- Suslick, K. S. 1994. "The chemistry of ultrasound." pp. 138-155. *In* "The year book of science & the future." Encyclopedia Britannica, Chicago.
- Williams, A. R., D. A. Stafford, A.G. Cally and D.E. Hughes. 1970. "Ultrasonic dispersal of activated sludge floc." *J. Appl. Bacteriol.* 33 : 656-663.
- William, A. 1994. "New technologies in food preservation and processing : part II." *Nutr. & Food Sci.* 1 : 20-23.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

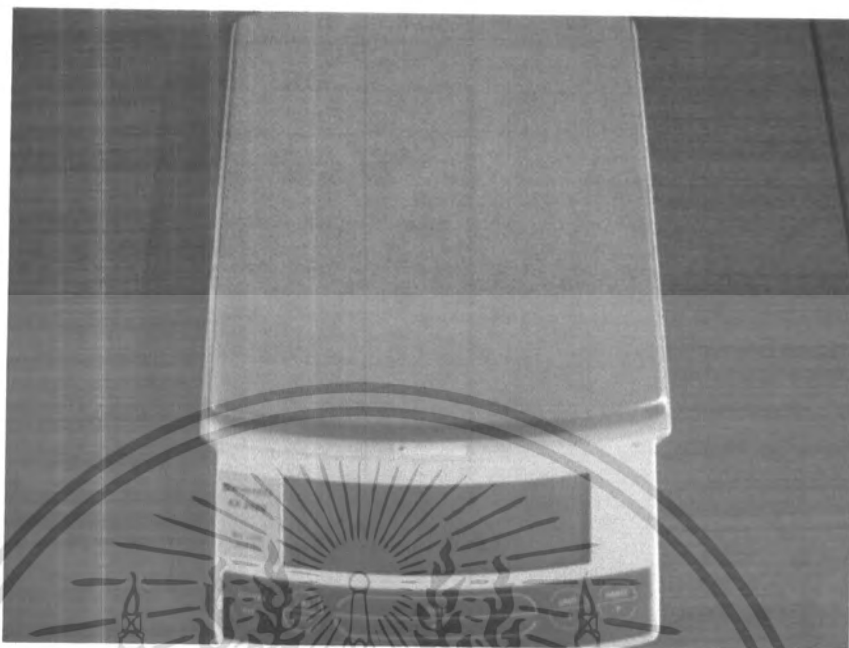


รูปที่ ก.1 เครื่องหุงต้มอาหารพร้อมระบบอัลตราโซนิก



รูปที่ ก.2 ตู้อบลมร้อน (Memmert, UFB400)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก. 3 เครื่องชั่งน้ำหนัก แสดงผลเป็นตัวเลขจุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง  
(Shimadzu, BX3000)



รูปที่ ก.4 เครื่องวัดค่าสี Colorimeter (Juki, JC801)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก. 5 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, TA-Xt.Plus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักพอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
60	0	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.33	6.20	1.90	5.87	1.57	73.25
			2	0.35	6.82	1.92	6.47	1.57	75.73
			3	0.32	7.03	2.03	6.71	1.71	74.52
		1	1	0.36	7.00	1.90	6.64	1.54	76.81
			2	0.35	6.30	1.84	5.95	1.49	74.96
			3	0.35	7.09	1.98	6.74	1.63	75.82
		1.5	1	0.38	6.73	2.05	6.35	1.67	73.70
			2	0.32	5.37	1.57	5.05	1.25	75.25
			3	0.43	7.07	2.04	6.64	1.61	75.75
		2	1	0.40	7.20	2.07	6.80	1.67	75.44
			2	0.36	7.08	2.09	6.72	1.73	74.26
			3	0.36	6.11	1.79	5.75	1.43	75.13
		2.5	1	0.33	7.05	2.04	6.72	1.71	74.55
			2	0.31	6.53	1.74	6.22	1.43	77.01
			3	0.35	6.15	1.73	5.80	1.38	76.21
		3	1	0.34	5.98	1.67	5.64	1.33	76.42
			2	0.33	7.32	2.03	6.99	1.70	75.68
			3	0.33	6.62	1.86	6.29	1.53	75.68
		3.5	1	0.34	6.06	1.69	5.72	1.35	76.40
			2	0.32	6.23	1.81	5.91	1.49	74.79
			3	0.33	7.41	1.99	7.08	1.66	76.55
4	1	0.31	6.57	1.86	6.26	1.55	75.24		
	2	0.31	6.90	1.66	6.59	1.35	79.51		
	3	0.30	7.28	1.91	6.98	1.61	76.93		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของปริมาณน้ำในตัวกึ่ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักฟอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
60	28	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.37	7.09	1.94	6.72	1.57	76.64
			2	0.39	5.69	1.77	5.30	1.38	73.96
			3	0.39	6.21	1.89	5.82	1.50	74.23
		1	1	0.52	7.55	2.32	7.03	1.80	74.40
			2	0.51	6.38	1.95	5.87	1.44	75.47
			3	0.40	6.85	1.92	6.45	1.52	76.43
		1.5	1	0.35	6.93	1.82	6.58	1.47	77.66
			2	0.40	6.65	1.96	6.25	1.56	75.04
			3	0.36	7.28	2.10	6.92	1.74	74.86
		2	1	0.36	6.43	1.85	6.07	1.49	75.45
			2	0.34	6.82	1.88	6.48	1.54	76.23
			3	0.35	6.20	1.80	5.85	1.45	75.21
		2.5	1	0.35	6.47	1.83	6.12	1.48	75.82
			2	0.35	6.92	1.94	6.57	1.59	75.80
			3	0.36	6.93	1.94	6.57	1.58	75.95
		3	1	0.35	6.29	1.78	5.94	1.43	75.93
			2	0.34	6.84	1.90	6.50	1.56	76.00
			3	0.32	6.94	1.98	6.62	1.66	74.92
		3.5	1	0.34	6.81	1.98	6.47	1.64	74.65
			2	0.35	6.09	1.75	5.74	1.40	75.61
			3	0.33	6.27	1.74	5.94	1.41	76.26
4	1	0.36	6.58	1.92	6.22	1.56	74.92		
	2	0.35	6.99	2.00	6.64	1.65	75.15		
	3	0.36	7.00	1.97	6.64	1.61	75.75		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักพอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
60	40	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.33	6.64	2.08	6.31	1.75	72.27
			2	0.32	7.20	2.10	6.88	1.78	74.13
			3	0.34	6.23	1.79	5.89	1.45	75.38
		1	1	0.36	5.76	1.78	5.40	1.42	73.70
			2	0.33	6.44	1.92	6.11	1.59	73.98
			3	0.34	5.82	1.61	5.48	1.27	76.82
		1.5	1	0.36	6.75	2.01	6.39	1.65	74.18
			2	0.33	6.34	1.87	6.01	1.54	74.38
			3	0.34	6.38	1.75	6.04	1.41	76.66
		2	1	0.32	5.72	1.66	5.40	1.34	75.19
			2	0.33	6.99	2.01	6.66	1.68	74.77
			3	0.34	6.29	1.79	5.95	1.45	75.63
		2.5	1	0.33	5.70	1.56	5.37	1.23	77.09
			2	0.34	7.20	1.91	6.86	1.57	77.11
			3	0.63	5.69	1.69	5.06	1.06	79.05
		3	1	0.36	6.30	1.69	5.94	1.33	77.61
			2	0.33	6.90	1.72	6.57	1.39	78.84
			3	0.33	6.49	1.79	6.16	1.46	76.30
		3.5	1	0.33	6.47	1.88	6.14	1.55	74.76
			2	0.32	6.63	1.79	6.31	1.47	76.70
			3	0.33	6.91	1.96	6.58	1.63	75.23
4	1	0.31	5.91	1.65	5.60	1.34	76.07		
	2	0.32	6.42	1.77	6.10	1.45	76.23		
	3	0.29	6.23	1.76	5.94	1.47	75.25		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักพอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
80	0	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.33	7.08	2.50	6.75	2.17	67.85
			2	0.33	6.81	2.04	6.48	1.71	73.61
			3	0.35	6.30	1.91	5.95	1.56	73.78
		1	1	0.33	5.71	1.77	5.38	1.44	73.23
			2	0.34	7.16	2.10	6.82	1.76	74.19
			3	0.34	7.28	2.12	6.94	1.78	74.35
		1.5	1	0.33	6.30	1.84	5.97	1.51	74.71
			2	0.32	6.13	1.79	5.81	1.47	74.70
			3	0.35	6.08	1.86	5.73	1.51	73.65
		2	1	0.35	6.05	1.86	5.70	1.51	73.51
			2	0.30	6.10	1.93	5.80	1.63	71.90
			3	0.35	6.53	1.93	6.18	1.58	74.43
		2.5	1	0.33	5.59	1.96	5.26	1.63	69.01
			2	0.33	5.16	1.64	4.83	1.31	72.88
			3	0.30	5.41	1.64	5.11	1.34	73.78
		3	1	0.35	6.30	1.92	5.95	1.57	73.61
			2	0.38	5.77	1.73	5.39	1.35	74.95
			3	0.34	6.18	1.86	5.84	1.52	73.97
		3.5	1	0.41	5.96	1.86	5.55	1.45	73.87
			2	0.36	6.03	1.86	5.67	1.50	73.54
			3	0.36	6.24	1.94	5.88	1.58	73.13
		4	1	0.32	5.63	1.71	5.31	1.39	73.82
			2	0.33	5.30	1.62	4.97	1.29	74.04
			3	0.34	5.74	1.75	5.40	1.41	73.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักฟอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
80	28	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.31	6.00	1.78	5.69	1.47	74.17
			2	0.24	6.56	1.99	6.32	1.75	72.31
			3	0.36	6.58	1.95	6.22	1.59	74.44
		1	1	0.39	6.35	1.92	5.96	1.53	74.33
			2	0.38	6.61	1.95	6.23	1.57	74.80
			3	0.36	6.54	1.91	6.18	1.55	74.92
		1.5	1	0.40	6.42	1.90	6.02	1.50	75.08
			2	0.35	5.89	1.77	5.54	1.42	74.37
			3	0.37	6.08	1.84	5.71	1.47	74.26
		2	1	0.36	6.18	1.83	5.82	1.47	74.74
			2	0.38	6.96	2.01	6.58	1.63	75.23
			3	0.35	6.52	1.90	6.17	1.55	74.88
		2.5	1	0.38	5.32	1.65	4.94	1.27	74.29
			2	0.36	5.75	1.78	5.39	1.42	73.65
			3	0.34	5.33	1.65	4.99	1.31	73.75
		3	1	0.35	5.17	1.47	4.82	1.12	76.76
			2	0.35	5.66	1.69	5.31	1.34	74.76
			3	0.35	5.22	1.51	4.87	1.16	76.18
		3.5	1	0.30	6.32	1.84	6.02	1.54	74.42
			2	0.31	5.93	1.70	5.62	1.39	75.27
			3	0.32	5.46	1.60	5.14	1.28	75.10
4	1	0.39	5.96	1.54	5.57	1.15	79.35		
	2	0.36	5.84	1.78	5.48	1.42	74.09		
	3	0.36	6.42	1.91	6.06	1.55	74.42		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักพอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
80	40	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.21	6.01	1.59	5.80	1.38	76.21
			2	0.24	6.41	1.79	6.17	1.55	74.88
			3	0.23	5.83	1.54	5.60	1.31	76.61
		1	1	0.24	6.60	1.67	6.36	1.43	77.52
			2	0.23	6.27	1.71	6.04	1.48	75.50
			3	0.24	6.62	1.80	6.38	1.56	75.55
		1.5	1	0.24	6.73	1.86	6.49	1.62	75.04
			2	0.24	6.08	1.69	5.84	1.45	75.17
			3	0.24	6.47	1.64	6.23	1.40	77.53
		2	1	0.26	5.49	1.58	5.23	1.32	74.76
			2	0.26	6.15	1.71	5.89	1.45	75.38
			3	0.26	6.44	1.86	6.18	1.60	74.11
		2.5	1	0.24	5.58	1.60	5.34	1.36	74.53
			2	0.25	6.17	1.75	5.92	1.50	74.66
			3	0.25	5.41	1.59	5.16	1.34	74.03
		3	1	0.25	5.65	1.62	5.40	1.37	74.63
			2	0.26	5.32	1.60	5.06	1.34	73.52
			3	0.24	5.41	1.60	5.17	1.36	73.69
		3.5	1	0.24	6.26	1.75	6.02	1.51	74.92
			2	0.23	6.17	1.79	5.94	1.56	73.74
			3	0.24	5.48	1.55	5.24	1.31	75.00
4	1	0.23	5.66	1.65	5.43	1.42	73.85		
	2	0.25	5.49	1.56	5.24	1.31	75.00		
	3	0.22	5.45	1.60	5.23	1.38	73.61		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักฟอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
100	0	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.33	5.88	1.69	5.55	1.36	75.50
			2	0.36	5.72	1.60	5.36	1.24	76.87
			3	0.31	5.81	1.72	5.50	1.41	74.36
		1	1	0.33	5.99	1.54	5.66	1.21	78.62
			2	0.33	6.33	1.72	6.00	1.39	76.83
			3	0.30	5.39	1.78	5.09	1.48	70.92
		1.5	1	0.31	5.21	1.55	4.90	1.24	74.69
			2	0.32	4.93	1.46	4.61	1.14	75.27
			3	0.31	5.16	1.59	4.85	1.28	73.61
		2	1	0.30	5.12	1.58	4.82	1.28	73.44
			2	0.31	5.81	1.78	5.50	1.47	73.27
			3	0.30	4.90	1.54	4.60	1.24	73.04
		2.5	1	0.34	4.25	1.38	3.91	1.04	73.40
			2	0.32	5.08	1.58	4.76	1.26	73.53
			3	0.29	5.46	1.73	5.17	1.44	72.15
		3	1	0.32	4.37	1.44	4.05	1.12	72.35
			2	0.32	4.60	1.50	4.28	1.18	72.43
			3	0.29	4.74	1.52	4.45	1.23	72.36
		3.5	1	0.33	4.04	1.34	3.71	1.01	72.78
			2	0.30	4.77	1.55	4.47	1.25	72.04
			3	0.32	4.29	1.45	3.97	1.13	71.54
4	1	0.31	3.94	1.33	3.63	1.02	71.90		
	2	0.31	4.60	1.46	4.29	1.15	73.19		
	3	0.33	4.99	1.66	4.66	1.33	71.46		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักฟอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และฟอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
100	28	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.34	5.57	1.70	5.23	1.36	74.00
			2	0.36	5.73	1.73	5.37	1.37	74.49
			3	0.36	5.89	1.81	5.53	1.45	73.78
		1	1	0.35	6.37	1.89	6.02	1.54	74.42
			2	0.33	6.11	1.85	5.78	1.52	73.70
			3	0.34	5.54	1.71	5.20	1.37	73.65
		1.5	1	0.32	5.41	1.66	5.09	1.34	73.67
			2	0.34	5.60	1.69	5.26	1.35	74.33
			3	0.35	5.30	1.62	4.95	1.27	74.34
		2	1	0.36	5.43	1.61	5.07	1.25	75.35
			2	0.40	5.90	1.76	5.50	1.36	75.27
			3	0.35	5.89	1.83	5.54	1.48	73.29
		2.5	1	0.35	6.05	1.83	5.70	1.48	74.04
			2	0.35	6.08	1.83	5.73	1.48	74.17
			3	0.35	4.98	1.67	4.63	1.32	71.49
		3	1	0.32	5.79	1.81	5.47	1.49	72.76
			2	0.32	5.90	1.86	5.58	1.54	72.40
			3	0.32	4.92	1.58	4.60	1.26	72.61
		3.5	1	0.33	4.73	1.60	4.40	1.27	71.14
			2	0.34	4.86	1.61	4.52	1.27	71.90
			3	0.35	5.15	1.67	4.80	1.32	72.50
4	1	0.34	5.26	1.71	4.92	1.37	72.15		
	2	0.33	4.42	1.45	4.09	1.12	72.62		
	3	0.37	4.45	1.42	4.08	1.05	74.26		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองของความชื้นในตัวอย่าง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำ หนักพอยล์ (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง และพอยล์ หลังลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%mc (wb)
100	40	0	1	0.33	6.77	1.89	6.44	1.56	75.78
			2	0.34	6.33	1.76	5.99	1.42	76.29
			3	0.32	7.38	1.95	7.06	1.63	76.91
		0.5	1	0.33	6.49	1.76	6.16	1.43	76.79
			2	0.38	5.58	1.65	5.20	1.27	75.58
			3	0.35	6.51	1.87	6.16	1.52	75.32
		1	1	0.35	4.87	1.46	4.52	1.11	75.44
			2	0.34	5.20	1.48	4.86	1.14	76.54
			3	0.33	5.92	1.71	5.59	1.38	75.31
		1.5	1	0.32	5.16	1.49	4.84	1.17	75.83
			2	0.34	5.35	1.67	5.01	1.33	73.45
			3	0.35	5.98	1.80	5.63	1.45	74.25
		2	1	0.31	4.85	1.49	4.54	1.18	74.01
			2	0.35	4.77	1.51	4.42	1.16	73.76
			3	0.33	5.48	1.67	5.15	1.34	73.98
		2.5	1	0.31	4.42	1.40	4.11	1.09	73.48
			2	0.30	4.98	1.54	4.68	1.24	73.50
			3	0.32	4.62	1.44	4.30	1.12	73.95
		3	1	0.30	4.60	1.43	4.30	1.13	73.72
			2	0.30	4.67	1.47	4.37	1.17	73.23
			3	0.31	4.65	1.51	4.34	1.20	72.35
		3.5	1	0.31	4.71	1.51	4.40	1.20	72.73
			2	0.32	4.95	1.61	4.63	1.29	72.14
			3	0.34	5.58	1.88	5.24	1.54	70.61
4	1	0.33	4.31	1.48	3.98	1.15	71.11		
	2	0.33	5.16	1.74	4.83	1.41	70.81		
	3	0.34	4.70	1.62	4.36	1.28	70.64		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองของน้ำหนักที่สูญเสีย

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	0	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	6.89	6.82	1.02
			2	7.78	7.74	0.51
			3	7.04	7.01	0.43
			4	6.74	6.51	3.41
			5	7.26	7.14	1.65
			6	7.80	7.43	4.74
		1	1	7.08	7.03	0.71
			2	6.77	6.70	1.03
			3	7.65	7.60	0.65
			4	7.83	7.46	4.73
			5	7.40	7.07	4.46
			6	7.62	7.39	3.02
		1.5	1	7.17	7.06	1.53
			2	7.19	7.07	1.67
			3	7.48	7.35	1.74
			4	7.37	6.95	5.70
			5	6.68	6.03	9.73
			6	7.88	7.41	5.96
2	1	7.51	7.42	1.20		
	2	7.01	6.88	1.85		
	3	6.63	6.50	1.96		
	4	7.64	7.31	4.32		
	5	7.73	7.33	5.17		
	6	6.62	6.18	6.65		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	0	2.5	1	6.78	6.67	1.62
			2	7.98	7.80	2.26
			3	7.79	7.68	1.41
			4	7.74	7.37	4.78
			5	6.90	6.69	3.04
			6	6.71	6.26	6.71
		3	1	7.09	6.93	2.26
			2	6.93	6.78	2.16
			3	7.93	7.80	1.64
			4	6.71	6.32	5.81
			5	7.92	7.60	4.04
			6	7.62	7.29	4.33
		3.5	1	6.68	6.58	1.50
			2	7.56	7.40	2.12
			3	7.83	7.60	2.94
			4	7.24	6.63	8.43
			5	6.80	6.44	5.29
			6	7.72	7.43	3.76
		4	1	7.65	7.38	3.53
			2	7.17	6.98	2.65
			3	7.28	7.14	1.92
			4	7.55	6.91	8.48
			5	7.91	7.37	6.83
			6	7.95	7.37	7.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	28	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.36	7.31	0.68
			2	7.49	7.46	0.40
			3	7.53	7.47	0.80
			4	7.75	7.63	1.55
			5	6.65	6.49	2.41
			6	6.72	6.61	1.64
		1	1	7.57	7.47	1.32
			2	7.38	7.25	1.76
			3	6.98	6.97	0.14
			4	7.92	7.81	1.39
			5	6.60	6.41	2.88
			6	7.32	7.14	2.46
		1.5	1	8.00	7.91	1.13
			2	7.05	6.89	2.27
			3	7.48	7.38	1.34
			4	7.49	7.28	2.80
			5	7.88	7.68	2.54
			6	7.32	7.13	2.60
2	1	7.41	7.26	2.02		
	2	7.83	7.70	1.66		
	3	7.05	6.87	2.55		
	4	7.02	6.76	3.70		
	5	7.39	7.25	1.89		
	6	6.88	6.70	2.62		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานโดยการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	28	2.5	1	6.64	6.56	1.20
			2	6.74	6.44	4.45
			3	7.96	7.82	1.76
			4	7.22	6.98	3.32
			5	7.98	7.69	3.63
			6	7.40	7.17	3.11
		3	1	7.97	7.76	2.63
			2	6.57	6.36	3.20
			3	6.82	6.53	4.25
			4	6.76	6.53	3.40
			5	7.54	7.23	4.11
			6	7.53	7.29	3.19
		3.5	1	7.86	7.60	3.31
			2	7.82	7.56	3.32
			3	7.69	7.46	2.99
			4	7.79	7.56	2.95
			5	7.15	6.91	3.36
			6	6.97	6.70	3.87
		4	1	7.13	6.82	4.35
			2	7.85	7.54	3.95
			3	7.71	7.51	2.59
			4	7.08	6.84	3.39
			5	7.71	7.43	3.63
			6	7.38	7.09	3.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	40	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.73	7.70	0.39
			2	7.84	7.80	0.51
			3	7.66	7.54	1.57
			4	7.68	7.29	5.08
			5	7.80	7.53	3.46
			6	7.11	6.94	2.39
		1	1	7.14	7.07	0.98
			2	7.59	7.49	1.32
			3	7.42	7.28	1.89
			4	7.62	7.34	3.67
			5	6.89	6.70	2.76
			6	6.53	6.43	1.53
		1.5	1	6.92	6.78	2.02
			2	7.54	7.37	2.25
			3	6.92	6.79	1.88
			4	7.58	7.33	3.30
			5	6.78	6.64	2.06
			6	7.24	7.13	1.52
2	1	7.30	7.21	1.23		
	2	6.96	6.85	1.58		
	3	7.84	7.51	4.21		
	4	6.80	6.62	2.65		
	5	7.51	7.46	0.67		
	6	7.21	6.83	5.27		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
60	40	2.5	1	8.11	7.85	3.21
			2	6.72	6.57	2.23
			3	7.47	7.22	3.35
			4	7.00	6.55	6.43
			5	8.00	7.43	7.13
			6	6.64	6.22	6.33
		3	1	6.45	6.24	3.26
			2	7.30	7.10	2.74
			3	7.62	7.23	5.12
			4	7.39	7.27	1.62
			5	7.65	7.37	3.66
			6	7.66	7.24	5.48
		3.5	1	7.67	7.31	4.69
			2	7.47	7.09	5.09
			3	7.05	6.84	2.98
			4	7.24	7.08	2.21
			5	8.00	7.62	4.75
			6	7.16	7.03	1.82
		4	1	8.06	7.66	4.96
			2	8.02	7.65	4.61
			3	7.47	7.12	4.69
			4	6.59	6.00	8.95
			5	7.29	7.04	3.43
			6	6.94	6.90	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	0	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	6.88	6.82	0.87
			2	7.23	7.20	0.41
			3	7.10	6.91	2.68
			4	7.88	7.46	5.33
			5	7.48	7.09	5.21
			6	7.09	6.66	6.06
		1	1	7.70	7.34	4.68
			2	7.18	6.80	5.29
			3	7.80	7.36	5.64
			4	6.81	6.29	7.64
			5	7.98	7.42	7.02
			6	7.93	7.63	3.78
		1.5	1	6.79	6.36	6.33
			2	7.90	7.40	6.33
			3	6.93	6.44	7.07
			4	7.64	6.91	9.55
			5	7.19	6.46	10.15
			6	6.87	6.30	8.30
2	1	7.23	6.53	9.68		
	2	7.51	6.87	8.52		
	3	7.77	7.13	8.24		
	4	7.79	7.00	10.14		
	5	7.65	6.73	12.03		
	6	7.98	7.41	7.14		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	0	2.5	1	7.81	7.10	9.09
			2	7.87	7.00	11.05
			3	6.73	6.05	10.10
			4	7.66	6.94	9.40
			5	7.20	6.05	15.97
			6	6.76	5.92	12.43
		3	1	7.63	6.70	12.19
			2	7.30	6.46	11.51
			3	7.98	6.92	13.28
			4	7.77	6.90	11.20
			5	7.33	6.06	17.33
			6	7.64	6.91	9.55
		3.5	1	7.30	6.23	14.66
			2	6.78	5.78	14.75
			3	7.79	6.67	14.38
			4	7.26	6.15	15.29
			5	7.82	6.57	15.98
			6	7.78	6.78	12.85
		4	1	7.74	6.56	15.25
			2	7.09	5.63	20.59
			3	7.88	6.85	13.07
			4	7.27	5.95	18.16
			5	6.80	5.67	16.62
			6	7.93	6.73	15.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	28	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.14	6.96	2.52
			2	6.68	6.55	1.95
			3	8.15	7.98	2.09
			4	7.33	6.65	9.28
			5	7.53	6.97	7.44
			6	7.70	7.14	7.27
		1	1	6.67	6.50	2.55
			2	8.15	7.90	3.07
			3	6.86	6.66	2.92
			4	7.44	6.77	9.01
			5	7.78	7.31	6.04
			6	7.98	7.37	7.64
		1.5	1	7.76	6.70	13.66
			2	7.11	6.71	5.63
			3	7.15	6.67	6.71
			4	7.52	6.91	8.11
			5	7.40	6.86	7.30
			6	7.83	6.96	11.11
2	1	7.80	7.01	10.13		
	2	6.55	5.91	9.77		
	3	7.79	7.07	9.24		
	4	7.53	6.73	10.62		
	5	7.80	7.12	8.72		
	6	7.68	6.98	9.11		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	28	2.5	1	7.91	7.10	10.24
			2	7.83	7.02	10.34
			3	7.97	6.79	14.81
			4	7.30	6.67	8.63
			5	7.85	6.82	13.12
			6	6.83	5.90	13.62
		3	1	7.30	6.67	8.63
			2	7.85	6.82	13.12
			3	6.83	5.90	13.62
			4	7.30	6.67	8.63
			5	7.85	6.82	13.12
			6	6.83	5.90	13.62
		3.5	1	7.40	6.46	12.70
			2	6.40	5.53	13.59
			3	8.44	7.30	13.51
			4	7.45	6.74	9.53
			5	6.95	6.33	8.92
			6	6.62	5.91	10.73
		4	1	6.64	5.68	14.46
			2	7.94	5.46	31.23
			3	6.14	5.66	7.82
			4	7.30	6.36	12.88
			5	7.42	6.27	15.50
			6	7.86	6.87	12.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	40	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.08	7.05	0.42
			2	6.52	6.37	2.30
			3	7.55	7.36	2.52
			4	7.28	7.20	1.10
			5	7.60	7.22	5.00
			6	6.67	6.48	2.85
		1	1	7.65	7.25	5.23
			2	7.69	7.30	5.07
			3	6.71	6.38	4.92
			4	8.05	7.52	6.58
			5	6.73	6.46	4.01
			6	7.48	7.20	3.74
		1.5	1	6.67	6.25	6.30
			2	6.85	6.37	7.01
			3	7.83	7.37	5.87
			4	7.95	7.30	8.18
			5	6.66	6.33	4.95
			6	7.26	6.78	6.61
2	1	6.70	6.16	8.06		
	2	6.72	6.05	9.97		
	3	7.64	7.13	6.68		
	4	6.97	6.00	13.92		
	5	7.49	6.92	7.61		
	6	7.85	7.28	7.26		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
80	40	2.5	1	6.88	6.11	11.19
			2	7.20	6.39	11.25
			3	6.92	6.08	12.14
			4	6.85	6.16	10.07
			5	7.47	6.71	10.17
			6	6.98	5.99	14.18
		3	1	7.95	6.96	12.45
			2	6.74	5.89	12.61
			3	7.55	6.89	8.74
			4	7.15	6.10	14.69
			5	6.86	5.88	14.29
			6	7.23	6.27	13.28
		3.5	1	6.95	5.97	14.10
			2	6.70	5.75	14.18
			3	7.20	6.30	12.50
			4	7.62	6.52	14.44
			5	7.67	6.76	11.86
			6	7.07	5.92	16.27
		4	1	6.70	5.99	10.60
			2	7.72	6.52	15.54
			3	6.81	5.83	14.39
			4	6.72	6.15	8.48
			5	7.32	5.71	21.99
			6	7.51	6.07	19.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
100	0	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.85	7.64	2.68
			2	7.42	7.10	4.31
			3	7.10	6.73	5.21
			4	6.68	6.49	2.84
			5	6.98	6.53	6.45
			6	6.60	6.33	4.09
		1	1	6.63	5.93	10.56
			2	7.31	6.52	10.81
			3	7.37	6.60	10.45
			4	7.22	6.44	10.80
			5	7.74	6.98	9.82
			6	6.62	5.98	9.67
		1.5	1	7.05	6.05	14.18
			2	8.44	7.18	14.93
			3	6.96	5.76	17.24
			4	6.75	5.86	13.19
			5	6.76	5.59	17.31
			6	7.20	6.40	11.11
2	1	8.21	6.57	19.98		
	2	6.78	5.19	23.45		
	3	8.30	6.96	16.14		
	4	7.67	6.31	17.73		
	5	7.53	6.25	17.00		
	6	7.05	5.74	18.58		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังกระดานข่าววิชาการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การสูญเสีย น้ำหนัก
100	0	2.5	1	6.25	4.68	25.12
			2	8.06	6.11	24.19
			3	6.92	5.12	26.01
			4	6.87	5.17	24.75
			5	7.18	5.74	20.06
			6	7.64	5.71	25.26
		3	1	8.01	5.87	26.72
			2	6.41	4.78	25.43
			3	7.22	5.15	28.67
			4	7.19	5.49	23.64
			5	7.13	5.22	26.79
			6	7.00	5.12	26.86
		3.5	1	7.88	5.71	27.54
			2	6.69	4.65	30.49
			3	7.16	4.91	31.42
			4	6.74	4.75	29.53
			5	7.51	5.52	26.50
			6	6.54	4.69	28.29
		4	1	7.70	5.35	30.52
			2	6.70	4.76	28.96
			3	7.74	5.40	30.23
			4	6.72	4.63	31.10
			5	7.09	5.08	28.35
			6	6.93	5.37	22.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
100	28	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	7.44	7.11	4.44
			2	7.82	7.40	5.37
			3	7.85	7.48	4.71
			4	6.89	6.11	11.32
			5	6.60	6.15	6.82
			6	6.94	6.50	6.34
		1	1	7.62	6.77	11.15
			2	7.14	6.42	10.08
			3	7.11	6.18	13.08
			4	7.43	6.79	8.61
			5	7.33	6.72	8.32
			6	6.60	6.02	8.79
		1.5	1	7.19	6.14	14.60
			2	7.66	6.55	14.49
			3	6.72	5.68	15.48
			4	6.71	5.81	13.41
			5	6.62	6.02	9.06
			6	6.50	5.73	11.85
2	1	7.76	6.11	21.26		
	2	7.29	5.85	19.75		
	3	6.56	5.31	19.05		
	4	7.05	6.02	14.61		
	5	7.63	6.57	13.89		
	6	7.32	6.22	15.03		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังหน่วยงานอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
100	28	2.5	1	6.95	5.20	25.18
			2	6.59	5.19	21.24
			3	7.07	5.48	22.49
			4	8.00	6.62	17.25
			5	7.94	6.71	15.49
			6	6.74	5.37	20.33
		3	1	7.06	5.34	24.36
			2	7.04	5.07	27.98
			3	7.67	5.76	24.90
			4	8.00	6.37	20.38
			5	7.80	6.39	18.08
			6	7.35	5.60	23.81
		3.5	1	7.25	5.16	28.83
			2	7.68	5.40	29.69
			3	7.00	5.19	25.86
			4	6.59	5.10	22.61
			5	6.49	5.22	19.57
			6	7.28	5.57	23.49
		4	1	7.18	5.01	30.22
			2	6.93	4.82	30.45
			3	7.31	5.09	30.37
			4	7.54	5.71	24.27
			5	6.50	5.10	21.54
			6	6.53	4.81	26.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
100	40	0	1	6.97	-	-
			2	7.36	-	-
			3	7.88	-	-
			4	7.25	-	-
			5	7.13	-	-
			6	7.53	-	-
		0.5	1	6.52	6.00	7.98
			2	7.70	7.18	6.75
			3	6.89	6.55	4.93
			4	7.63	6.76	11.40
			5	6.96	6.34	8.91
			6	7.72	6.93	10.23
		1	1	6.94	6.22	10.37
			2	7.33	6.77	7.64
			3	7.60	6.90	9.21
			4	6.53	5.63	13.78
			5	6.50	5.73	11.85
			6	7.12	6.45	9.41
		1.5	1	6.99	5.89	15.74
			2	6.69	5.83	12.86
			3	8.19	7.11	13.19
			4	6.70	5.62	16.12
			5	6.81	5.57	18.21
			6	8.11	7.17	11.59
2	1	7.81	6.50	16.77		
	2	7.96	6.67	16.21		
	3	6.95	5.65	18.71		
	4	6.71	5.43	19.08		
	5	7.41	4.97	32.93		
	6	7.33	6.01	18.01		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้วยวิธีการใช้คอมพิวเตอร์สืบค้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการสูญเสียน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	%การ สูญเสีย น้ำหนัก
100	40	2.5	1	7.93	6.09	23.20
			2	6.37	4.74	25.59
			3	6.43	4.85	24.57
			4	6.74	5.11	24.18
			5	6.75	5.38	20.30
			6	6.81	5.23	23.20
		3	1	6.33	4.62	27.01
			2	6.84	5.23	23.54
			3	6.85	5.01	26.86
			4	6.50	4.75	26.92
			5	6.80	5.27	22.50
			6	6.71	4.88	27.27
		3.5	1	8.03	5.98	25.53
			2	6.93	5.05	27.13
			3	7.49	5.18	30.84
			4	7.34	5.43	26.02
			5	6.74	5.28	21.66
			6	7.63	5.98	21.63
		4	1	7.18	5.25	26.88
			2	7.47	5.17	30.79
			3	6.57	4.75	27.70
			4	6.63	5.04	23.98
			5	6.95	5.43	21.87
			6	7.24	5.26	27.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
60	0	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	10.70	10.68	10.49	10.47	0.19
			2	9.74	9.65	9.55	9.46	0.92
			3	9.60	9.31	9.41	9.13	3.02
			4	9.09	8.97	8.91	8.79	1.32
			5	9.71	9.39	9.52	9.21	3.30
			6	8.76	8.60	8.59	8.43	1.83
		2	1	8.22	8.06	8.06	7.90	1.95
			2	10.83	10.61	10.62	10.40	2.03
			3	9.45	9.40	9.26	9.22	0.53
			4	9.70	9.73	9.51	9.54	-0.31
			5	8.67	8.46	8.50	8.29	2.42
			6	8.59	8.33	8.42	8.17	3.03
		3	1	8.79	8.55	8.62	8.38	2.73
			2	9.53	9.23	9.34	9.05	3.15
			3	9.38	9.15	9.20	8.97	2.45
			4	10.58	10.48	10.37	10.27	0.95
			5	8.93	8.83	8.75	8.66	1.12
			6	9.72	9.48	9.53	9.29	2.47
4	1	10.59	10.19	10.38	9.99	3.78		
	2	9.60	9.32	9.41	9.14	2.92		
	3	10.10	9.71	9.90	9.52	3.86		
	4	10.38	10.14	10.18	9.94	2.31		
	5	9.55	9.25	9.36	9.07	3.14		
	6	8.34	7.99	8.18	7.83	4.20		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการดำเนินงานที่อาจมีความลับ ไม่นานนักหลังจากนี้จะไม่ใช้ประโยชน์จากเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
60	28	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	10.89	10.77	10.62	10.54	0.79
			2	8.32	8.22	8.12	8.04	0.89
			3	10.35	10.11	10.10	9.89	2.01
			4	10.41	10.04	10.15	9.82	3.25
			5	10.73	10.33	10.47	10.11	3.43
			6	9.17	8.87	8.94	8.68	2.97
		2	1	8.85	8.36	8.63	8.18	5.24
			2	8.74	8.50	8.53	8.32	2.44
			3	9.58	9.20	9.34	9.00	3.67
			4	9.42	8.80	9.19	8.61	6.29
			5	9.53	9.18	9.30	8.98	3.37
			6	9.23	8.66	9.00	8.47	5.88
		3	1	10.22	9.77	9.97	9.56	4.10
			2	9.73	9.28	9.49	9.08	4.33
			3	8.50	8.39	8.29	8.21	0.99
			4	9.28	8.82	9.05	8.63	4.66
			5	9.96	9.60	9.72	9.39	3.31
			6	10.13	9.68	9.88	9.47	4.14
4	1	9.74	9.37	9.50	9.17	3.50		
	2	10.40	10.13	10.14	9.91	2.29		
	3	8.63	8.25	8.42	8.07	4.10		
	4	9.60	9.25	9.36	9.05	3.34		
	5	8.53	8.18	8.32	8.00	3.80		
	6	9.22	8.76	8.99	8.57	4.69		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
60	40	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	8.52	8.40	8.34	8.23	1.41
			2	10.02	9.80	9.81	9.60	2.20
			3	10.74	10.55	10.52	10.33	1.77
			4	7.96	7.94	7.80	7.78	0.25
			5	10.45	10.03	10.24	9.82	4.02
			6	9.02	8.85	8.83	8.67	1.88
		2	1	9.70	9.40	9.50	9.21	3.09
			2	8.92	8.52	8.74	8.34	4.48
			3	8.67	8.50	8.49	8.33	1.96
			4	10.15	9.96	9.94	9.76	1.87
			5	8.93	8.44	8.75	8.27	5.49
			6	8.70	8.43	8.52	8.26	3.10
		3	1	10.64	10.10	10.42	9.89	5.08
			2	9.72	9.47	9.52	9.28	2.57
			3	9.67	9.13	9.47	8.94	5.58
			4	8.31	7.96	8.14	7.80	4.21
			5	10.13	9.40	9.92	9.21	7.21
			6	9.21	8.86	9.02	8.68	3.80
4	1	8.95	8.61	8.77	8.43	3.80		
	2	10.16	9.63	9.95	9.43	5.22		
	3	10.16	9.68	9.95	9.48	4.72		
	4	10.73	10.14	10.51	9.93	5.50		
	5	9.67	9.39	9.47	9.20	2.90		
	6	9.52	9.05	9.32	8.86	4.94		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการและสมาชิกของคณะกรรมการฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากกรรมการฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
80	0	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	9.56	8.85	9.37	8.68	7.43
			2	11.97	10.80	11.74	10.59	9.77
			3	10.40	9.35	10.20	9.17	10.10
			4	7.94	7.34	7.78	7.20	7.56
			5	9.26	8.27	9.08	8.11	10.69
			6	8.50	7.77	8.33	7.62	8.59
		2	1	10.79	9.12	10.58	8.94	15.48
			2	9.89	8.63	9.70	8.46	12.74
			3	8.20	6.79	8.04	6.66	17.20
			4	9.11	8.03	8.93	7.87	11.86
			5	10.04	8.67	9.84	8.50	13.65
			6	8.90	7.60	8.73	7.45	14.61
		3	1	9.28	7.17	9.10	7.03	22.74
			2	9.88	7.82	9.69	7.67	20.85
			3	9.72	8.19	9.53	8.03	15.74
			4	9.43	7.40	9.25	7.25	21.53
			5	11.40	8.67	11.18	8.50	23.95
			6	10.49	8.62	10.28	8.45	17.83
4	1	9.64	7.50	9.45	7.35	22.20		
	2	10.05	7.42	9.85	7.27	26.17		
	3	10.10	7.70	9.90	7.55	23.76		
	4	8.38	7.14	8.22	7.00	14.80		
	5	7.48	5.64	7.33	5.53	24.60		
	6	9.49	7.53	9.30	7.38	20.65		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
80	28	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	10.24	9.40	9.97	9.15	8.20
			2	9.35	8.70	9.10	8.47	6.95
			3	8.48	7.57	8.26	7.37	10.73
			4	9.12	8.14	8.88	7.92	10.75
			5	11.39	10.49	11.09	10.21	7.90
			6	8.62	7.92	8.39	7.71	8.12
		2	1	9.52	8.17	9.27	7.95	14.18
			2	8.52	7.50	8.29	7.30	11.97
			3	9.89	8.45	9.63	8.23	14.56
			4	8.10	6.95	7.89	6.77	14.20
			5	8.93	7.38	8.69	7.18	17.36
			6	9.38	8.35	9.13	8.13	10.98
		3	1	12.44	10.54	12.11	10.26	15.27
			2	9.55	7.88	9.30	7.67	17.49
			3	9.06	7.12	8.82	6.93	21.41
			4	9.26	7.37	9.01	7.17	20.41
			5	9.85	8.25	9.59	8.03	16.24
			6	10.46	8.41	10.18	8.19	19.60
4	1	9.90	7.69	9.64	7.49	22.32		
	2	10.13	7.99	9.86	7.78	21.13		
	3	10.20	7.80	9.93	7.59	23.53		
	4	9.06	7.02	8.82	6.83	22.52		
	5	9.26	7.55	9.01	7.35	18.47		
	6	10.85	8.50	10.56	8.27	21.66		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
80	40	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	10.32	9.48	10.06	9.24	8.14
			2	9.08	8.42	8.85	8.21	7.27
			3	11.14	10.32	10.86	10.06	7.36
			4	9.85	8.96	9.60	8.74	9.04
			5	10.14	9.39	9.89	9.16	7.40
			6	10.05	9.18	9.80	8.95	8.66
		2	1	8.46	7.23	8.25	7.05	14.54
			2	8.03	7.19	7.83	7.01	10.46
			3	8.04	7.02	7.84	6.84	12.69
			4	11.09	9.82	10.81	9.57	11.45
			5	10.84	9.88	10.57	9.63	8.86
			6	9.29	8.33	9.06	8.12	10.33
		3	1	10.58	8.77	10.32	8.55	17.11
			2	10.41	8.88	10.15	8.66	14.70
			3	9.87	8.36	9.62	8.15	15.30
			4	9.04	7.18	8.81	7.00	20.58
			5	10.24	8.33	9.98	8.12	18.65
			6	9.03	6.91	8.80	6.74	23.48
4	1	9.36	7.20	9.13	7.02	23.08		
	2	7.39	6.35	7.21	6.19	14.07		
	3	10.06	8.67	9.81	8.45	13.82		
	4	10.13	7.63	9.88	7.44	24.68		
	5	9.19	7.18	8.96	7.00	21.87		
	6	8.80	6.80	8.58	6.63	22.73		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังกำไรเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
100	0	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	8.31	6.76	8.09	6.58	18.65
			2	9.58	8.68	9.33	8.45	9.39
			3	9.04	8.07	8.80	7.86	10.73
			4	10.72	9.34	10.44	9.09	12.87
			5	9.25	7.21	9.01	7.02	22.05
			6	9.67	8.05	9.41	7.84	16.75
		2	1	8.31	6.65	8.09	6.47	19.98
			2	8.63	6.18	8.40	6.02	28.39
			3	7.80	6.09	7.59	5.93	21.92
			4	8.41	6.58	8.19	6.41	21.76
			5	8.06	6.46	7.85	6.29	19.85
			6	8.20	6.12	7.98	5.96	25.37
		3	1	7.59	5.01	7.39	4.88	33.99
			2	8.46	6.63	8.24	6.45	21.63
			3	9.15	6.63	8.91	6.45	27.54
			4	9.66	6.98	9.40	6.80	27.74
			5	9.71	7.38	9.45	7.18	24.00
			6	8.29	6.14	8.07	5.98	25.93
4	1	8.11	5.88	7.90	5.72	27.50		
	2	9.46	6.05	9.21	5.89	36.05		
	3	9.26	5.85	9.01	5.70	36.83		
	4	8.34	5.44	8.12	5.30	34.77		
	5	8.93	5.40	8.69	5.26	39.53		
	6	7.93	5.23	7.72	5.09	34.05		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
100	28	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	8.99	8.35	8.77	8.14	7.12
			2	8.96	8.30	8.74	8.09	7.37
			3	8.00	7.26	7.80	7.08	9.25
			4	8.52	7.51	8.31	7.32	11.85
			5	10.02	8.98	9.77	8.76	10.38
			6	10.38	8.74	10.12	8.52	15.80
		2	1	8.50	7.31	8.29	7.13	14.00
			2	9.24	7.55	9.01	7.36	18.29
			3	8.92	6.62	8.70	6.45	25.78
			4	8.21	6.19	8.01	6.04	24.60
			5	8.32	6.47	8.11	6.31	22.24
			6	8.31	6.02	8.10	5.87	27.56
		3	1	8.70	6.36	8.48	6.20	26.90
			2	8.57	5.53	8.36	5.39	35.47
			3	8.62	6.37	8.40	6.21	26.10
			4	9.20	6.34	8.97	6.18	31.09
			5	8.00	5.31	7.80	5.18	33.63
			6	9.44	7.17	9.20	6.99	24.05
4	1	9.88	6.40	9.63	6.24	35.22		
	2	10.53	6.86	10.27	6.69	34.85		
	3	9.86	6.98	9.61	6.81	29.21		
	4	8.09	5.60	7.89	5.46	30.78		
	5	9.42	6.28	9.18	6.12	33.33		
	6	8.67	6.31	8.45	6.15	27.22		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	น้ำหนักกึ่ง ก่อนลวก (g.)	น้ำหนักกึ่ง หลังลวก (g.)	ปริมาตรกึ่ง ก่อนลวก (m <sup>3</sup> )	ปริมาตรกึ่ง หลังลวก (m <sup>3</sup> )	%ปริมาตรที่ เปลี่ยนแปลง
100	40	0	1	8.18	-	7.98	-	-
			2	8.89	-	8.67	-	-
			3	8.35	-	8.14	-	-
			4	8.43	-	8.22	-	-
			5	9.12	-	8.90	-	-
			6	8.88	-	8.66	-	-
		1	1	10.34	9.20	10.17	9.05	11.03
			2	10.77	9.47	10.59	9.31	12.07
			3	8.59	7.20	8.45	7.08	16.18
			4	9.77	8.15	9.61	8.02	16.58
			5	9.40	8.17	9.24	8.04	13.09
			6	9.61	8.08	9.45	7.95	15.92
		2	1	10.29	7.50	10.12	7.38	27.11
			2	9.47	6.74	9.31	6.63	28.83
			3	8.75	6.91	8.61	6.80	21.03
			4	10.01	7.60	9.84	7.47	24.08
			5	8.53	7.51	8.39	7.39	11.96
			6	9.87	7.18	9.71	7.06	27.25
		3	1	10.40	7.50	10.23	7.38	27.88
			2	10.11	7.36	9.94	7.24	27.20
			3	11.35	8.55	11.16	8.41	24.67
			4	8.56	5.87	8.42	5.77	31.43
			5	9.85	6.65	9.69	6.54	32.49
			6	9.63	6.50	9.47	6.39	32.50
4	1	9.45	6.60	9.29	6.49	30.16		
	2	9.32	7.33	9.17	7.21	21.35		
	3	9.57	6.65	9.41	6.54	30.51		
	4	8.28	6.74	8.14	6.63	18.60		
	5	9.13	6.18	8.98	6.08	32.31		
	6	7.52	5.07	7.40	4.99	32.58		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
60	0	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	47.86	-0.07	1.07	47.79	0.04	1.03	47.79	0.39	0.89
			2	44.92	0.50	0.77	44.94	0.56	0.72	44.82	0.83	0.55
			3	45.37	-1.26	0.45	45.46	-1.01	0.39	45.42	-0.56	0.13
			4	45.01	1.72	4.13	45.06	1.65	4.16	44.97	1.66	4.11
			5	46.76	-0.11	2.70	46.61	-0.02	2.73	46.56	-0.01	2.85
			6	40.56	2.72	5.11	40.61	2.72	5.10	40.65	2.72	5.04
		2	1	44.75	2.08	3.11	44.73	2.03	3.12	44.70	2.07	3.12
			2	46.95	1.42	3.35	46.98	1.47	3.39	46.98	1.61	3.25
			3	48.89	2.06	4.48	48.81	2.14	4.45	48.85	2.24	4.36
			4	50.29	6.91	8.01	50.25	6.76	7.97	50.25	6.82	8.05
			5	51.28	4.35	7.73	51.05	4.52	7.70	51.37	4.49	7.64
			6	46.41	5.01	8.46	46.46	4.88	8.49	46.46	4.85	8.41
		3	1	51.69	4.75	3.40	51.67	4.47	3.37	51.69	4.73	3.41
			2	50.57	8.05	5.03	50.57	2.07	5.02	50.59	2.07	5.04
			3	50.70	3.51	4.63	50.72	3.48	4.59	50.68	8.53	4.61
			4	53.04	8.66	10.13	53.00	8.74	10.12	52.91	8.90	10.10
			5	53.70	6.42	8.01	53.70	6.42	8.02	53.71	6.40	8.11
			6	55.10	5.59	8.28	55.19	5.62	8.32	55.19	5.70	8.28
4	1	49.93	4.45	4.18	49.92	4.48	4.12	49.94	4.46	4.12		
	2	49.19	4.11	4.97	49.15	4.11	4.99	49.16	4.04	5.00		
	3	54.11	4.67	5.04	54.12	4.73	5.02	54.14	4.57	5.09		
	4	57.12	7.07	9.95	57.12	6.96	9.94	57.09	7.12	10.02		
	5	56.18	8.20	9.45	56.18	8.13	9.43	56.20	8.05	9.39		
	6	57.97	9.17	10.04	57.93	9.05	10.07	57.93	8.86	10.15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
60	28	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	47.76	2.18	2.50	47.77	2.38	2.60	47.83	2.39	2.62
			2	46.16	0.72	1.89	46.19	0.97	1.79	46.17	0.99	1.76
			3	45.62	-0.46	0.09	45.56	-0.71	0.14	45.51	-0.73	0.12
			4	42.29	0.47	7.22	42.36	0.22	7.25	42.18	0.23	7.24
			5	38.95	0.29	7.20	39.00	0.34	7.17	38.86	0.35	7.25
			6	38.44	1.23	7.53	38.43	1.23	7.52	38.43	1.20	7.52
		2	1	49.03	3.44	3.44	49.03	3.25	3.51	48.99	3.18	3.59
			2	52.23	2.33	2.81	52.22	2.31	2.85	52.22	2.23	2.87
			3	46.40	3.83	4.60	46.35	3.86	4.61	46.33	3.81	4.59
			4	48.17	0.86	8.30	48.18	0.72	8.31	48.35	0.58	8.33
			5	48.96	1.44	9.31	48.87	1.55	9.33	48.82	1.62	9.43
			6	48.89	0.82	9.10	48.87	0.89	9.05	48.96	0.97	9.05
		3	1	55.44	6.40	5.77	55.44	6.39	5.82	55.45	6.35	5.84
			2	55.37	3.41	4.55	55.35	3.59	4.47	55.40	3.49	4.47
			3	53.96	6.50	6.25	53.96	6.54	6.25	53.95	6.68	6.19
			4	51.87	1.33	9.92	51.77	1.46	9.98	51.71	1.46	9.98
			5	48.41	1.76	9.26	48.37	1.67	9.31	48.26	1.58	9.41
			6	49.87	1.22	9.69	49.89	1.19	9.67	49.87	1.26	9.68
4	1	54.60	8.91	8.11	54.60	8.87	8.06	54.60	8.82	8.11		
	2	53.00	9.14	6.46	53.03	9.21	6.41	52.99	9.28	6.36		
	3	56.96	11.04	9.22	56.96	11.07	9.21	56.96	10.98	9.27		
	4	56.89	2.35	10.27	56.80	2.55	10.28	56.72	2.66	10.28		
	5	58.61	3.25	12.21	58.63	3.21	12.29	58.62	3.32	12.25		
	6	57.11	2.02	10.19	57.11	1.97	10.30	57.02	1.91	10.40		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
60	40	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	44.08	1.27	2.54	44.07	1.22	2.55	44.08	1.47	2.40
			2	45.87	1.93	2.84	45.82	1.83	2.86	45.80	1.87	2.89
			3	44.18	2.29	1.84	44.24	2.39	1.78	44.18	2.45	1.78
			4	42.87	3.69	9.55	42.91	3.60	9.49	43.00	3.37	9.45
			5	43.44	-1.51	5.53	43.32	-1.52	5.47	43.28	-1.64	5.41
			6	41.18	-1.31	5.31	41.18	-1.31	5.29	41.26	-1.35	5.47
		2	1	58.38	10.48	11.34	58.34	10.56	11.32	58.35	10.51	11.36
			2	59.67	12.10	11.71	59.68	12.14	11.73	59.65	12.25	11.69
			3	60.57	13.27	12.15	60.56	13.22	12.14	60.54	13.26	12.15
			4	47.07	6.62	11.89	46.99	6.85	11.94	47.00	6.87	11.94
			5	49.30	1.49	9.16	49.34	1.42	9.07	49.30	1.46	9.20
			6	47.04	2.77	8.95	47.04	2.77	8.96	47.03	2.74	9.00
		3	1	55.93	8.31	7.61	55.90	8.29	7.66	55.90	8.02	7.72
			2	56.88	10.16	9.08	56.82	10.25	9.08	56.79	10.26	9.08
			3	54.62	9.32	8.49	54.55	9.44	8.41	54.57	9.62	8.36
			4	51.65	5.77	12.73	51.46	5.82	12.77	51.59	5.60	12.75
			5	52.28	4.24	11.47	52.31	4.08	11.38	52.24	3.94	11.41
			6	51.62	5.63	12.09	51.68	5.56	12.05	51.58	5.60	12.19
4	1	55.61	8.05	8.57	55.59	8.09	8.52	55.61	7.96	8.55		
	2	54.04	8.97	9.61	54.04	8.91	9.60	54.00	8.83	9.68		
	3	61.05	6.32	6.61	61.03	6.39	6.63	61.03	6.45	6.62		
	4	55.34	6.68	13.48	55.40	6.68	13.48	55.36	6.71	13.48		
	5	53.90	5.71	11.86	53.85	5.85	11.84	53.97	5.66	11.83		
	6	53.28	6.08	13.06	53.27	6.11	13.03	53.26	6.16	13.02		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
80	0	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	59.16	3.70	4.11	59.16	3.72	4.11	59.19	3.69	4.10
			2	59.44	5.54	3.75	59.42	5.36	5.77	59.35	5.40	5.69
			3	59.56	7.77	7.20	59.59	7.91	7.00	59.50	7.76	7.14
			4	58.47	4.75	12.47	58.45	4.76	12.46	58.44	4.76	12.45
			5	57.33	3.80	10.98	57.31	3.85	10.99	57.67	3.87	10.96
			6	57.58	6.16	12.87	57.58	6.14	12.68	57.58	6.10	12.86
		2	1	64.19	7.83	7.49	64.13	7.82	7.65	64.16	7.75	7.57
			2	64.71	9.45	9.11	64.71	9.45	9.11	64.16	9.62	8.96
			3	63.58	9.48	8.94	63.56	9.48	8.88	63.53	9.59	8.81
			4	66.07	8.02	16.13	65.92	8.18	16.20	65.96	7.90	16.04
			5	62.93	9.08	16.15	62.84	9.16	16.13	62.95	9.13	16.16
			6	64.55	9.17	16.94	64.42	9.25	16.85	64.47	9.21	16.90
		3	1	65.06	12.75	10.10	65.05	12.85	10.05	65.07	12.71	10.11
			2	64.59	11.59	10.33	64.67	11.57	10.33	64.64	11.54	10.31
			3	67.91	10.32	9.68	67.89	10.33	9.70	67.84	10.33	9.79
			4	67.32	7.36	15.73	67.13	7.46	15.65	67.13	7.45	15.70
			5	65.99	9.39	16.91	65.97	9.44	16.54	65.86	9.23	16.74
			6	64.83	9.73	16.84	64.64	10.11	16.81	64.62	10.08	16.84
4	1	66.96	8.87	8.25	66.93	8.82	8.35	66.97	8.70	8.41		
	2	64.82	10.85	8.88	64.84	10.80	8.91	64.78	10.83	8.94		
	3	66.02	11.57	9.75	65.87	11.63	9.84	65.80	11.63	9.86		
	4	65.97	10.33	17.25	66.09	10.31	17.29	66.02	10.36	17.26		
	5	65.92	9.88	17.01	65.92	9.91	17.01	65.87	9.89	16.99		
	6	67.61	9.04	17.65	67.53	9.13	17.77	67.51	9.04	17.79		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
80	28	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	53.39	6.14	5.05	53.39	6.19	5.06	52.46	6.00	5.13
			2	54.58	9.47	7.97	54.55	9.44	7.93	54.53	9.40	7.92
			3	53.80	9.22	7.91	53.83	9.23	7.88	53.83	9.14	7.93
			4	59.74	6.14	13.00	59.78	6.15	13.00	59.84	6.11	13.02
			5	58.90	7.01	14.39	58.88	6.80	14.37	58.97	7.06	14.40
			6	59.64	6.92	13.97	59.66	6.91	14.03	59.66	6.91	14.07
		2	1	58.38	10.48	11.34	58.34	10.56	11.32	58.35	10.51	11.36
			2	59.67	12.10	11.71	59.68	12.14	11.73	59.65	12.25	11.69
			3	60.57	13.27	12.15	60.56	13.22	12.14	60.54	13.26	12.15
			4	64.65	8.63	16.07	64.68	8.69	16.15	64.68	8.80	16.11
			5	64.86	7.98	15.01	64.71	7.89	14.92	64.68	7.95	14.93
			6	66.02	8.61	15.93	65.88	8.59	15.87	65.88	8.58	15.82
		3	1	62.76	13.25	11.44	62.61	13.18	11.48	62.59	13.20	11.45
			2	60.23	14.80	13.58	60.23	14.74	13.61	60.20	14.81	13.60
			3	63.05	14.71	12.50	63.03	14.69	12.53	63.01	14.66	12.53
			4	65.32	8.30	16.27	65.66	8.24	16.16	65.64	8.12	16.09
			5	65.43	9.89	17.39	65.42	9.95	17.35	65.44	9.88	17.38
			6	65.03	10.00	16.09	65.09	9.92	16.10	65.09	9.99	16.07
4	1	59.24	11.94	11.05	59.24	11.98	11.05	59.21	12.02	11.07		
	2	62.41	13.52	11.67	62.40	13.54	11.64	62.40	13.51	11.64		
	3	66.34	10.94	9.22	66.34	10.93	9.20	66.35	10.81	9.24		
	4	67.59	8.60	15.95	67.43	8.65	15.97	67.58	8.46	15.91		
	5	67.41	9.39	16.15	67.44	9.40	16.14	67.31	9.44	16.19		
	6	67.29	9.22	16.03	67.32	9.24	16.02	67.29	9.23	16.01		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
80	40	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	57.38	5.93	5.72	57.37	5.91	5.78	57.38	5.89	5.80
			2	56.59	5.98	6.33	56.62	6.01	6.40	56.59	5.98	6.43
			3	58.70	5.63	6.07	58.70	5.90	5.96	58.68	6.08	5.88
			4	57.99	8.36	7.79	57.96	8.40	7.76	57.97	8.38	7.78
			5	60.67	8.03	8.64	60.67	8.00	8.65	60.66	7.99	8.64
			6	59.11	6.49	7.47	59.11	6.48	7.48	59.10	6.46	7.50
		2	1	62.11	10.47	8.70	62.13	10.51	8.67	62.13	10.38	8.84
			2	64.56	10.07	9.89	64.52	10.11	9.92	64.52	10.13	9.89
			3	61.89	9.49	9.38	61.80	9.51	9.45	61.83	9.78	9.20
			4	64.00	9.78	10.25	63.98	9.77	10.29	63.98	10.13	10.27
			5	63.14	12.80	11.14	63.13	12.78	11.13	63.11	12.80	11.10
			6	65.34	9.27	10.64	65.30	9.29	10.62	65.28	9.30	10.59
		3	1	67.25	10.56	12.10	67.22	10.63	12.05	67.24	10.53	12.04
			2	66.01	11.40	11.72	66.14	11.31	11.73	66.22	11.00	11.77
			3	65.82	11.77	12.35	65.84	11.87	12.33	65.82	11.93	12.31
			4	66.96	9.40	11.78	66.96	9.43	7.66	66.96	9.49	11.79
			5	61.19	10.73	11.96	61.19	10.73	11.95	61.19	10.65	12.00
			6	65.00	13.07	13.63	64.96	13.10	13.63	64.95	13.09	13.63
4	1	68.63	12.10	12.70	68.50	12.15	12.73	68.57	12.18	12.69		
	2	67.12	12.49	13.34	67.10	12.49	13.32	67.07	12.36	13.22		
	3	67.85	12.08	11.83	67.97	11.84	17.79	67.55	11.95	11.96		
	4	64.20	10.62	11.95	64.20	10.60	11.95	64.19	16.56	11.94		
	5	67.09	9.48	11.06	67.07	9.47	11.05	67.04	9.45	11.04		
	6	67.52	12.12	12.53	67.52	12.09	12.53	67.52	12.08	12.58		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
100	0	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	63.34	11.62	8.60	63.35	11.65	8.57	63.29	11.73	8.60
			2	64.09	12.08	9.56	64.09	12.14	9.56	64.12	12.08	9.55
			3	65.20	11.78	10.40	65.19	11.91	10.21	65.21	11.93	10.29
			4	71.04	12.84	13.39	70.83	12.94	13.45	70.82	12.98	13.33
			5	70.01	12.68	12.30	69.84	12.68	12.31	70.02	12.53	12.33
			6	67.93	12.91	13.47	67.63	12.98	13.60	67.71	12.74	13.56
		2	1	65.52	11.44	10.04	65.53	11.29	10.16	65.55	11.05	10.19
			2	63.66	14.63	11.51	63.70	14.55	11.48	62.61	14.62	11.53
			3	65.71	11.82	9.70	65.67	11.87	9.67	65.66	11.90	9.64
			4	70.76	14.41	15.07	70.77	14.46	15.01	70.68	14.61	14.98
			5	67.54	14.32	13.50	67.40	14.12	13.68	67.34	13.92	13.82
			6	63.16	11.74	13.92	63.16	11.66	13.85	63.02	12.00	13.83
		3	1	66.36	11.87	10.80	66.38	11.91	10.80	66.41	11.90	10.76
			2	65.83	13.36	11.33	65.85	13.24	11.30	65.89	13.26	11.14
			3	64.47	13.32	11.25	64.41	13.39	11.24	64.40	13.33	11.18
			4	66.84	18.43	14.43	66.93	13.07	14.52	66.72	13.08	14.51
			5	60.65	9.15	12.02	60.50	9.25	11.91	60.70	9.64	11.87
			6	68.48	12.17	13.76	68.33	12.35	13.77	68.11	12.46	13.87
4	1	67.66	11.51	11.32	67.71	11.57	11.37	67.64	11.68	11.41		
	2	67.36	13.62	12.62	67.32	13.65	12.45	67.34	13.63	12.48		
	3	66.48	13.14	11.62	66.51	13.15	11.54	66.51	13.17	11.60		
	4	66.47	12.98	14.38	66.91	12.69	13.96	66.78	12.88	14.05		
	5	68.53	12.92	14.03	68.62	12.36	13.84	68.56	12.73	14.13		
	6	67.55	12.45	13.95	67.59	12.28	13.99	67.61	12.21	14.02		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
100	28	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	64.68	9.97	9.16	64.67	9.82	9.20	64.62	9.83	9.19
			2	65.08	10.73	9.69	65.07	10.80	9.71	65.08	10.81	9.63
			3	64.08	10.70	9.46	64.11	10.60	9.47	64.10	10.62	9.46
			4	64.25	8.97	16.61	64.04	9.06	16.72	64.08	8.99	16.67
			5	55.74	6.82	14.89	55.68	6.86	14.92	55.62	6.82	14.96
			6	58.60	8.61	15.34	58.60	8.57	15.39	58.57	8.84	15.35
		2	1	68.65	10.75	10.18	68.63	10.91	10.11	68.64	10.81	10.10
			2	65.82	9.23	8.78	65.88	9.34	8.68	65.86	9.42	8.69
			3	67.41	11.03	8.82	67.45	10.94	8.90	67.39	11.06	8.84
			4	64.06	11.12	17.37	64.07	11.22	17.31	64.22	10.97	17.24
			5	61.89	7.26	15.33	61.90	7.45	15.29	61.87	7.48	15.30
			6	65.12	9.00	16.93	65.04	8.97	16.94	64.96	8.93	16.89
		3	1	65.40	13.35	12.07	65.29	13.21	12.20	65.33	13.23	12.08
			2	66.63	13.62	12.34	66.57	13.65	12.36	66.52	13.76	12.27
			3	66.07	12.16	11.20	66.09	12.11	11.09	66.07	12.07	11.12
			4	65.00	8.95	17.28	64.96	9.02	17.28	64.85	8.91	17.24
			5	61.52	9.26	16.56	61.54	9.07	16.59	61.60	9.01	16.56
			6	64.99	11.13	17.50	65.26	11.20	17.50	65.16	11.27	17.48
4	1	68.26	10.69	10.57	68.25	11.07	10.43	68.31	11.12	10.42		
	2	66.28	13.91	11.91	66.87	13.72	11.96	66.86	13.74	11.95		
	3	67.51	12.85	11.09	67.49	12.88	11.02	67.40	13.02	10.99		
	4	66.58	8.85	16.79	66.58	8.85	16.73	66.66	8.58	16.52		
	5	65.31	11.04	18.09	65.38	11.00	18.03	65.51	11.07	18.04		
	6	66.08	9.18	16.81	66.06	9.37	16.93	66.18	9.36	16.96		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองของค่าสี่ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b
100	40	0	1	31.16	-0.56	0.59	31.60	-0.52	0.61	31.56	-0.38	0.55
			2	32.75	1.02	3.14	32.74	1.04	3.17	32.80	0.97	3.13
			3	34.13	0.93	2.06	34.10	0.88	2.13	34.07	0.44	2.07
			4	33.56	-0.16	4.66	33.56	-0.11	4.67	33.61	-0.02	4.70
			5	34.87	2.42	5.33	34.93	2.40	5.35	34.88	2.72	5.23
			6	34.42	1.14	4.04	34.37	1.09	4.04	34.39	1.18	4.01
		1	1	61.92	12.90	11.26	61.92	13.02	11.10	61.93	13.15	10.97
			2	65.01	9.77	10.05	65.03	9.78	10.01	65.00	9.72	10.08
			3	62.32	11.01	10.70	62.29	11.16	10.65	62.29	11.17	10.56
			4	60.85	14.55	15.25	60.88	14.55	15.21	60.90	14.40	15.25
			5	59.90	16.11	15.49	59.90	15.97	15.48	59.90	15.97	15.39
			6	59.47	15.26	14.97	59.43	15.29	14.99	59.49	15.14	14.97
		2	1	63.80	13.30	12.20	63.30	13.23	12.24	63.30	13.29	12.23
			2	63.87	14.54	11.99	63.87	14.46	12.15	63.87	14.28	12.21
			3	65.21	11.27	10.07	65.20	11.35	10.07	65.20	11.32	10.07
			4	60.30	14.95	15.50	60.34	14.86	15.47	60.27	14.94	1.52
			5	61.60	14.51	14.73	61.60	14.27	14.69	61.59	14.35	14.80
			6	59.82	13.91	12.67	60.15	13.70	12.67	60.14	13.61	12.74
		3	1	64.90	14.11	11.98	64.96	13.92	12.00	64.93	13.88	12.06
			2	66.35	11.47	10.50	66.38	11.40	10.49	66.39	11.39	10.52
			3	66.33	13.65	12.27	66.32	13.64	12.16	66.31	13.55	12.21
			4	67.59	15.48	15.00	67.59	15.23	14.93	67.45	15.43	15.02
			5	64.74	15.22	14.89	64.66	15.38	14.94	64.61	15.40	15.02
			6	61.84	14.68	15.25	61.79	14.47	15.26	61.81	14.53	15.14
4	1	64.89	13.50	11.09	64.88	13.45	11.14	64.90	13.51	11.13		
	2	67.14	12.55	10.39	67.16	12.33	10.45	67.11	12.31	10.51		
	3	65.28	14.20	12.54	65.23	14.39	12.42	65.26	14.43	12.37		
	4	69.28	14.13	14.98	69.31	13.90	14.88	69.18	14.14	14.96		
	5	67.27	12.51	14.09	67.45	12.50	13.98	67.31	12.73	14.02		
	6	65.75	11.89	13.71	65.44	12.10	13.84	65.43	12.09	13.80		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/mm <sup>2</sup> )
60	0	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1329.31
			2	2783.12
			3	2683.00
			4	1965.13
			5	2398.74
			6	2694.40
		2	1	2706.63
			2	2444.92
			3	2918.36
			4	2006.42
			5	2098.78
			6	2444.92
		3	1	1906.14
			2	2600.59
			3	2415.05
			4	2220.39
			5	2788.04
			6	1875.48
4	1	2186.43		
	2	2118.40		
	3	2094.21		
	4	2120.71		
	5	1962.70		
	6	2235.29		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/ mm <sup>2</sup> )
60	28	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	2019.68
			2	2247.92
			3	2468.46
			4	2087.34
			5	2507.38
			6	2646.23
		2	1	2311.64
			2	2740.50
			3	2199.62
			4	2584.69
			5	2198.40
			6	2104.49
		3	1	2700.72
			2	2339.33
			3	2298.92
			4	2420.39
			5	1990.94
			6	2304.53
4	1	1812.09		
	2	2070.96		
	3	2145.56		
	4	2110.29		
	5	1989.03		
	6	2149.95		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 กรัม grams (g/ mm <sup>2</sup> )
60	40	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	2389.52
			2	2590.58
			3	2729.99
			4	1965.13
			5	2398.74
			6	2694.40
		2	1	2159.15
			2	2322.53
			3	2024.09
			4	2006.42
			5	2098.78
			6	2444.92
		3	1	1334.43
			2	1746.20
			3	1684.70
			4	2220.39
			5	2788.04
			6	1875.48
4	1	1412.04		
	2	1725.69		
	3	1174.30		
	4	2120.71		
	5	1962.70		
	6	2235.29		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/ mm <sup>2</sup> )
80	0	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1216.21
			2	954.32
			3	1007.33
			4	1407.10
			5	1156.45
			6	1146.12
		2	1	1159.21
			2	1434.94
			3	1371.00
			4	1269.17
			5	1057.46
			6	1285.93
		3	1	1052.10
			2	1240.02
			3	1188.19
			4	894.45
			5	-
			6	925.19
4	1	1098.60		
	2	1277.47		
	3	1387.31		
	4	1034.54		
	5	849.05		
	6	1008.99		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/mm <sup>2</sup> )
80	28	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1135.32
			2	1932.60
			3	1441.46
			4	1412.60
			5	1189.82
			6	1585.12
		2	1	1047.52
			2	928.80
			3	999.08
			4	1011.22
			5	1004.03
			6	1166.06
		3	1	841.98
			2	863.59
			3	1026.71
			4	843.65
			5	1010.93
			6	891.94
4	1	863.12		
	2	1186.25		
	3	1031.35		
	4	1048.35		
	5	1093.81		
	6	1136.72		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/ mm <sup>2</sup> )
80	40	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	914.49
			2	1184.96
			3	1040.60
			4	1190.80
			5	1141.09
			6	945.58
		2	1	1007.88
			2	1331.50
			3	1104.68
			4	902.56
			5	1118.88
			6	1262.90
		3	1	1453.61
			2	1343.72
			3	1193.76
			4	1184.31
			5	1234.73
			6	1524.16
4	1	1043.50		
	2	1027.39		
	3	1285.22		
	4	1196.38		
	5	1326.93		
	6	67.52		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/mm <sup>2</sup> )
100	0	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1477.55
			2	1582.16
			3	1279.30
			4	1329.74
			5	1679.74
			6	1297.86
		2	1	1370.70
			2	1449.42
			3	1594.98
			4	1284.24
			5	1258.02
			6	1454.18
		3	1	1317.74
			2	1343.18
			3	1290.64
			4	1475.01
			5	1365.45
			6	1294.24
4	1	1324.28		
	2	1382.78		
	3	1366.95		
	4	1128.05		
	5	1266.74		
	6	1216.18		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/ mm <sup>2</sup> )
100	28	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1259.23
			2	1377.12
			3	1121.09
			4	1360.62
			5	1538.72
			6	1410.96
		2	1	1298.58
			2	1239.23
			3	1511.07
			4	1264.08
			5	1369.20
			6	1087.59
		3	1	1255.86
			2	1126.90
			3	1380.51
			4	1407.85
			5	1054.91
			6	939.02
4	1	1100.78		
	2	1318.46		
	3	1263.39		
	4	1143.65		
	5	1379.04		
	6	1155.56		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองของลักษณะเนื้อสัมผัส (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	เวลา (min)	ซ้ำ ที่	ความชื้นที่ช่วง 200-300 grams (g/mm <sup>2</sup> )
100	40	0	1	2991.07
			2	2440.34
			3	2596.90
			4	2350.34
			5	2626.26
			6	2645.65
		1	1	1350.07
			2	1002.97
			3	781.66
			4	905.87
			5	1087.55
			6	1053.17
		2	1	1041.51
			2	1398.82
			3	1319.19
			4	840.87
			5	932.22
			6	1188.91
		3	1	1026.04
			2	1071.78
			3	1243.56
			4	1078.22
			5	1194.84
			6	939.02
4	1	717.28		
	2	1166.21		
	3	1196.82		
	4	887.06		
	5	1355.83		
	6	975.78		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้