การพัฒนาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในอาหารโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูง

สุวิมล อริยประกาย*
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ รามคำแหง 24 หัวหมาก กรุงเทพฯ 10240

* *Corresponding Author: suwimona@yahoo.com*
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางอาหาร คณะเทคโนโลยีชีวภาพ

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 10 กันยายน 2563
แก้ไข : 22 สิงหาคม 2564
ตอบรับ : 8 กันยายน 2564
DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.12

คำสำคัญ :
คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูง / โปรตีนอาหาร / อิมัลซิไฟเออร์ / อิมัลชัน / โฟม / เจล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการนำคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในอาหาร ได้แก่ สมบัติการละลายน้ำ สมบัติการอุ้มน้ำหรืออุ้มน้ำมัน สมบัติการสร้างเจล สมบัติอิมัลซิไฟเออร์ และสมบัติการเพิ่มความคงตัวอิมัลชันและโฟม โดยได้นำโปรตีนจากพืชและสัตว์ ได้แก่ จากถั่ว เมล็ดธัญพืช เมล็ดผักผลไม้ นม ไข่ และเนื้อสัตว์ มาพัฒนาสมบัติเชิงหน้าที่ให้ดีขึ้น พลังงานจากคลื่นเสียงความถี่สูงทำให้เกิดแรงเฉือน มีผลต่อการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโปรตีน ขนาดอนุภาคโปรตีน ขนาดโมเลกุลโปรตีน และช่วยปรับสัดส่วนบริเวณผิวรอบนอกของโปรตีนอันประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่ชอบน้ำ โครงสร้างที่มีประจุไฟฟ้า และหมู่ซัลไฟด์อิสระ ทำให้อันตรกิริยาภายในโมเลกุลโปรตีน อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีน และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนกับโมเลกุลน้ำในอาหารเปลี่ยนไป ค่ากำลังไฟฟ้า ระยะเวลาการใช้คลื่น อุณหภูมิ และ pH มีผลต่อการปรับโครงสร้างและสมบัติของโปรตีน บทความนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงกับโปรตีนจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

Improving Functional Properties of Food Proteins by Using High Intensity Ultrasonication Technology

Suwimon Ariyaprakai*
Assumption University, Ramkhumhaeng 24, Hua Mak, Bangkok 10240

** Corresponding Author: suwimona@yahoo.com*
Assistant Professor, Department of Food Biotechnology, Faculty of Biotechnology.

Article Info

Article History:
Received: September 10, 2020
Revised: August 22, 2021
Accepted: September 8, 2021
DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.12

Keywords:
High intensity ultrasonication / Food proteins / Emulsifier / Emulsion / Foam / Gel

Abstract

High intensity ultrasonic wave has recently been used to enhance functional properties of food proteins by improving solubility, water holding or oil holding capacity, gelation properties, emulsifier properties as well as foaming and emulsion stabilization abilities. Functional properties of various plant and animal proteins, such as those from beans, grains, seeds, milk, eggs, and meat, have been improved by high intensity ultrasonication. High intensity ultrasonic wave creates high shear force that disrupts protein aggregation and modifies protein particle sizes, molecular sizes and surface properties, including surface hydrophobicity, surface charges, and free sulfhydryl content. These lead to alteration of intramolecular interactions within protein molecules and intermolecular interactions between protein-protein molecules and between protein-water molecules in foods. Ultrasonic power, sonication time, temperature and pH have been noted to influence the modification of protein structures and properties. This article provides detailed information on the utilization of high intensity ultrasonic wave to modify proteins from different sources. These will be useful information for future application of this technology in food industry.

1. บทนำ

โปรตีนเป็นองค์ประกอบหนึ่งในอาหาร และมีสมบัติเชิงหน้าที่หลายอย่างในอาหาร ได้แก่ สมบัติการละลายน้ำ สมบัติการอุ้มน้ำหรืออุ้มน้ำมัน สมบัติในการสร้างเจล สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ และสมบัติการเพิ่มความคงตัวอาหารประเภทอิมัลชันและโฟม โปรตีนมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์สายยาว โปรตีนทำอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนด้วยกันและทำอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำก่อกำเนิดเป็นโครงข่ายเจลที่มีลักษณะอุ้มน้ำ พอลิเมอร์โปรตีนมีโครงสร้างบางส่วนชอบน้ำและบางส่วนไม่ชอบน้ำ โปรตีนจึงมีสมบัติระหว่างพื้นผิวและทำหน้าที่ลดแรงตึงทั้งระหว่างพื้นผิวน้ำและน้ำมันและระหว่างพื้นผิวน้ำและอากาศ ชั้นโปรตีนที่หนาและมีประจุไฟฟ้าล้อมรอบอนุภาคน้ำมันทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชัน ชั้นโปรตีนล้อมรอบอนุภาคฟองอากาศและทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้กับโฟมได้ในทำนองเดียวกัน [2]

โปรตีนอาหารสามารถพัฒนาให้มีสมบัติเชิงหน้าที่ที่ดีขึ้นโดยการผ่านการการใช้คลื่นความถี่สูงที่ความเข้มสูง คลื่นเสียงความถี่สูงที่ใช้อยู่ในช่วงความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ กำเนิดมาจากการใช้กระแสไฟฟ้ากำลังสูงผ่านหินคริสตัล (piezoelectric crystal) เพื่อทำให้โครงสร้างคริสตัลสั่น และกำเนิดเป็นคลื่นเสียง [3] คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูง คือ คลื่นเสียงดังกล่าวที่ทำให้มีความเข้มสูงขึ้น โดยให้พลังงานส่งผ่านแท่งโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดที่แคบ (titanium probe) พลังงานต่อพื้นที่หน้าตัดที่ปล่อยผ่านแท่งโลหะจึงมีความเข้มที่สูง ซึ่งอาจมีความเข้มตั้งแต่ 10-1000 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร [2] เมื่อนำแท่งโลหะดังกล่าวจุ่มในสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว กล่าวคือ สารละลายโปรตีน การสั่นจะส่งต่อลงไปยังของเหลว คลื่นเสียงทำให้โมเลกุลของเหลวถูกกดอัดเป็นช่วง ๆ ก่อให้เกิดช่วงแรงดันสูงและช่วงแรงดันต่ำในของเหลวตามจังหวะของคลื่นเสียง ในช่วงจังหวะคลื่นแรงดันสูงโปรตีนในของเหลวจะถูกอัดโดยความดันสูง ซึ่งอาจสูงถึง 1000 บรรยากาศ ในช่วงจังหวะคลื่นแรงดันต่ำอาจเกิดเป็นห้วงสุญญากาศและระเบิดแตกตัว ปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เรียกว่า cavitation ส่งผลให้ของเหลวมีลักษณะไหลปั่นป่วนด้วยความเร็วสูงและแรงดันสูง

ในบทความนี้กล่าวถึงผลของการการใช้คลื่นความถี่สูงต่อโครงสร้างของโปรตีนอาหาร โดยยกตัวอย่างรายละเอียดการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงกับโปรตีนอาหารจากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง และกล่าวถึงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนอาหารที่ได้พัฒนาให้ดีขึ้น บทความนี้จึงเป็นประโยชน์ต่อการนำเทคโนโลยีคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงไปประยุกต์ใช้ต่อไป

2. ผลของคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงต่อโครงสร้างโปรตีน

แรงอัดความดันสูงจากคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีน คลื่นเสียงความถี่สูงทำลายพันธะต่าง ๆ ทั้งพันธะระหว่างโมเลกุลโปรตีน (intermolecular interactions, intermolecular hydrophobic interactions) และพันธะภายในโมเลกุลโปรตีน (internal interactions, internal hydrophobic interactions) [4-6] พันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) และพันธะไฮโดรเจน [7] ถูกตัด ดังนั้น กลุ่มก้อนโปรตีนลดการเกาะกลุ่มกัน อนุภาคโปรตีนมีขนาดเล็กลง [6] โครงสร้างจตุรภูมิ [7] และโครงสร้างตติยภูมิของโปรตีนเปลี่ยนไป [8-10] ทำให้โมเลกุลโปรตีนคลายตัวหรือเสียสภาพธรรมชาติ เปลี่ยนสัดส่วนโครงสร้างไม่ชอบน้ำที่ปรากฏบนผิวบริเวณรอบนอกอนุภาคโปรตีน มีผลต่อค่าความไม่ชอบน้ำบริเวณผิว (surface hydrophobicity ค่าประจุไฟฟ้าสุทธิที่ปรากฏบนผิวบริเวณรอบนอกของอนุภาคโปรตีน และ ค่าปริมาณหมู่ซัลไฟด์อิสระ (-SH) นอกจากนี้ คลื่นเสียงความถี่สูงเปลี่ยนสัดส่วนโครงสร้างทุติยภูมิต่าง ๆ ของโปรตีน [4, 8] ได้แก่ โครงสร้างเกลียวคล้ายสปริง (helix) โครงสร้างม้วนพับ (sheet) โครงสร้างเทิร์น (turn) และโครงสร้างเกลียวสุ่ม (random coil) [10, 11] ในบางการศึกษาพบว่า คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้ขนาดมวลโมเลกุลของโปรตีนเปลี่ยนไป คลื่นเสียงความถี่สูงจึงอาจส่งผลถึงระดับโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน [5, 6, 8, 12]

ตัวอย่างเช่น มีการศึกษาพบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงมีผลเปลี่ยนสัดส่วนขนาดมวลโมเลกุลต่าง ๆ ของโปรตีนแล็กโทแอลบูมิน [12] โปรตีนเวย์ [6] และ โปรตีนสกัดจากเมล็ดขนุน [5] แต่ไม่พบว่ามีผลต่อเปลี่ยนสัดส่วนขนาดมวลโมเลกุลของโปรตีนถั่วลิพีนัท [9] และ โปรตีนหอยแชลล์ [11] คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลเปลี่ยนสัดส่วนโครงสร้างทุติยภูมิต่าง ๆ ของโปรตีนเนื้อไก่ โดยทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลโปรตีน ทำให้โครงสร้างเกลียวคล้ายสปริงที่เรียงตัวเป็นระเบียบมีสัดส่วนลดลง แต่มีสัดส่วนโครงสร้างม้วนพับ โครงสร้างเทิร์น และโครงสร้าง

เกลียวสุ่มเพิ่มขึ้น [10] ในทำนองเดียวกัน มีผลเปลี่ยนสัดส่วนโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนถั่วเหลือง [4] โปรตีนถั่วดำ [8] โปรตีนเวย์ [7] และ โปรตีนหอยแชลล์ [11] คลื่นเสียงความถี่สูงมีส่วนทำให้โครงสร้างตติยภูมิของโปรตีนถั่วเหลือง [4] โปรตีนถั่วดำ [8] โปรตีนถั่วพีนัท [9] และ โปรตีนเนื้อไก่ [10] คลายตัวเปิดออก และมีลักษณะเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ

3. สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนอาหารหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูง

คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงมีผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันของโปรตีน ค่าการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และค่าการอุ้มน้ำมัน (oil holding capacity) ของโปรตีน อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแล้วแต่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน [5, 13] โดยทั่วไปแล้วโปรตีนมีความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้นหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูง เนื่องจากกลุ่มก้อนโปรตีนมีขนาดเล็กลงกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้น บริเวณที่มีประจุไฟฟ้าปรากฏบนผิวรอบนอกโปรตีนเพิ่มขึ้น สารละลายโปรตีนอาจมีสมบัติการไหลเปลี่ยนไป อาทิเช่น ค่าดัชนีการไหล (consistency index) [5, 8, 11, 12]

โปรตีนหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงมีสมบัติในการสร้างเจลดีขึ้น เจลมีโครงสร้างที่แข็งแรง เนื้อเจลหนาแน่นเป็นเนื้อเดียวกันและมีเนื้อสัมผัสที่ดี เจลมีลักษณะอุ้มน้ำได้ดี ความเข้มข้นโปรตีนที่ต้องใช้ในการเตรียมเจล (least gelation concentration) ลดลง ทั้งนี้ ลักษณะเจลที่พัฒนาให้ดีขึ้น เพราะโครงสร้างเจลประกอบด้วยสายพอลิเมอร์โปรตีนที่มีขนาดสั้นลง พันธะไดซัลไฟด์และพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลโปรตีนเพิ่มขึ้นภายในเจล อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนและโปรตีน และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนและน้ำภายในเจลจึงเปลี่ยนไป Hu และคณะ [13] เตรียมเจลโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงและใช้กรดร่วม พบว่า เจลมีค่าความแข็งแรงเจลและค่าความหนาแน่นเจลสูงขึ้น เจลมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนในโปรตีนเจลเพิ่มขึ้น Hu และคณะ [14] เตรียมเจลโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงและใช้แคลเซียมซัลเฟตร่วม พบว่า เจลมีค่าการอุ้มน้ำและค่าความแข็งแรงเจลสูงขึ้น เนื่องจากคลื่นเสียงความถี่สูงปรับโครงสร้างโปรตีนให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง มีลักษณะคลายตัว มีค่าความไม่ชอบน้ำสูงขึ้น มีปริมาณหมู่ซัลไฟด์อิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นในระหว่างการสร้างเจลจึงมีการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ภายในเจลเพิ่มขึ้น และโครงข่ายเจลแน่นและเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น โครงข่ายเจลดังกล่าวมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีขึ้น

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงช่วยเพิ่มสมบัติระหว่างพื้นผิวของโปรตีน กล่าวคือ โปรตีนหลังผ่านการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีขนาดเล็กลงจึงเคลื่อนที่ไปยึดเกาะบริเวณระหว่างพื้นผิวน้ำและน้ำมันได้เร็วขึ้นและยึดเกาะได้ดี ชั้นโปรตีนบริเวณผิวมีความยืดหยุ่น ทำให้สามารถลดแรงตึงระหว่างผิวได้ดี [10, 15-16] โปรตีนหลังผ่านการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำหน้าที่อิมัลซิไฟเออร์ได้ดีขึ้น โมเลกุลโปรตีนจัดเรียงตัวเป็นชั้นล้อมรอบอนุภาคน้ำมันได้หนาแน่นและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อิมัลชันความคงตัวดี อนุภาคน้ำมันลดการรวมกลุ่มกันและลดการรวมตัวกัน อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และอาจเล็กลงถึงระดับนาโนอิมัลชัน การใช้โปรตีนหลังผ่านการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการเตรียมอิมัลชันมีผลทำให้ค่าความสามารถในการทำอิมัลชัน (emulsifying activity index) ค่าความจุในการทำอิมัลชัน (emulsifying capacity) และ ค่าความคงตัวอิมัลชัน (emulsion stability index) สูงขึ้น Resendiz-Vazquez และคณะ[5] พบว่าอิมัลชันที่เตรียมโดยโปรตีนสกัดจากเมล็ดขนุนหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถทำอิมัลชันได้ดี อิมัลชันมีความคงตัวสูงเพราะโครงสร้างโปรตีนยืดหยุดและยึดเกาะที่พื้นผิวได้ดี Li และคณะ [10] พบว่าโปรตีนเนื้อไก่หลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงมีสมบัติอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น ปริมาณโปรตีนบริเวณผิวอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น อิมัลชันที่เตรียมได้มีค่าความสามารถในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 77 เป็น 151 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าความคงตัวอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 80 นาที เมื่อเพิ่มระยะเวลาการใช้คลื่นเป็น 6 นาที อิมัลชันประกอบด้วยอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กลงจาก 2.082 เป็น 0.98 ไมโครเมตร และกระจายตัวดี อิมัลชันมีความคงตัวเป็นระยะเวลานานขึ้น

โฟมโปรตีนที่ผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงมีค่าความคงตัวโฟม (foaming stability index) สูง มีปริมาตรโฟมเพิ่มขึ้น (foaming capacity index) โปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กเคลื่อนที่ไปยึดเกาะบริเวณผิวฟองอากาศในอัตราที่เร็วขึ้น โปรตีนไม่เกาะกลุ่มกัน โปรตีนที่คลายตัวทำให้ล้อมรอบอนุภาคฟองอากาศได้ดีขึ้น อนุภาคฟองอากาศมีขนาดที่เล็กลง ชั้นโปรตีนบริเวณผิวมีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงดึงได้ดี Jambrak และคณะ [12]] เตรียมโฟมจากโปรตีนแล็กโทแอลบูมินโดยผ่านคลื่นเสียงความถี่

สูงและพบว่าค่าปริมาตรโฟมเพิ่มจาก 113 เป็น 134 % และค่าความคงตัวโฟมเพิ่มจาก 49.7 เป็น 58.7 นาที หลังใช้คลื่นเป็นระยะเวลา 30 นาที

4. รายละเอียดการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงและตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงที่ใช้นิยมในปัจจุบันใช้ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ และกำลังไฟฟ้าแตกต่างกันตั้งแต่ 120 วัตต์ ถึง มากกว่า 1,000 วัตต์ ความเข้มของคลื่นเสียงความถี่สูงวัดได้จากการวัดค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในของเหลวตัวอย่างต่อพื้นที่แท่งโลหะที่จุ่มในสารตัวอย่าง แท่งโลหะที่ใช้ในปัจจุบันมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.6 ถึง 2.5 เซนติเมตรค่าความเข้มของคลื่นเสียงความถี่สูงอาจมีค่าตั้งแต่ 10 ถึงมากกว่า 1,000 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร การดำเนินเครื่องอาจปรับค่ากำลังไฟฟ้า โดยปรับเปอร์เซ็นต์ความสูงของคลื่น (% Amplitude) ตั้งแต่ 0 ถึง 100% ที่กำลังไฟฟ้าสูงผลิตคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีความเข้มสูงทำให้กำเนิดพลังงานและแรงดันสูงตามลำดับ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่ากำลังไฟฟ้ามีผลต่อโครงสร้างโปรตีนและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนอย่างเห็นได้ชัด Jambrak และคณะ [6] และ Jambrak และคณะ [12] พบว่าการใช้คลื่นที่ความเข้มต่ำ 1 ถึง 2 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร กล่าวคือ ใช้คลื่นผ่านอ่างบรรจุตัวอย่างโดยตรงโดยไม่ได้ผ่านแท่งโลหะ มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแล็กโทแอลบูมินและโปรตีนเวย์แตกต่างจากการให้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงที่ผ่านแท่งโลหะที่ความเข้ม 39 ถึง 48 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร Jiang และคณะ [8] ใช้คลื่นที่กำลังไฟฟ้า 150 วัตต์, 300 วัตต์, และ 450 วัตต์ กับโปรตีนถั่วดำ และพบว่ามีผลที่แตกต่างกัน ที่ค่ากำลังไฟฟ้า 150 วัตต์ คลื่นเร่งให้อนุภาคโปรตีนมาเกาะกลุ่มกันอย่างหลวมๆ ที่ค่ากำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ กลุ่มก้อนโปรตีนที่เกาะกันหลวมๆ แตกตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดเล็กลงเพิ่มพื้นที่ผิวรอบนอกโปรตีน บริเวณผิวโดยรอบจึงมีค่าประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ที่ค่ากำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ อนุภาคโปรตีนกลับมาจัดเรียงตัวเกาะกลุ่มกันอีกรอบโดยอันตรกิริยาไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากโปรตีนบางส่วนเสียสภาพธรรมชาติ จึงทำให้โปรตีนเพิ่มการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนค่าประจุไฟฟ้าสุทธิบริเวณผิวรอบนอกโปรตีน Resendiz-Vazquez และคณะ [5] ใช้คลื่นกำลังไฟฟ้าจาก 0 วัตต์, 200 วัตต์, 400 วัตต์ และ 600 วัตต์ กับโปรตีนสกัดจากเมล็ดขนุน พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าโปรตีนมีค่าการอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 1.92 เป็น 3.22 กรัมต่อกรัมโปรตีน มีค่าการอุ้มน้ำลดลงจาก 3.35 เป็น 1.88 กรัมต่อกรัมโปรตีน มีค่าความจุในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 76.6 เป็น 296.0 มิลลิลิตรน้ำมันต่อกรัมโปรตีน ค่าคงตัวอิมัลชันและค่าความสามารถในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นถึง 100 % เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าถึง 400 และ 600 วัตต์ ขณะที่เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 0 ถึง 600 วัตต์ ค่าปริมาตรโฟมที่ pH 8 เพิ่มขึ้นจาก 251.3 เป็น 296.3% และมีความสามารถละลายน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.57 มิลลิกรัมต่อมิลลิตร Wu และคณะ [11] แปรค่ากำลังไฟฟ้าคลื่นเสียงความถี่สูงจาก 0 วัตต์, 200 วัตต์, 400 วัตต์, 600 วัตต์, 800 วัตต์ ถึง 950 วัตต์ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนหอยแชลล์ คือ ลดขนาดอนุภาคโปรตีน เปลี่ยนโครงสร้างทุติยภูมิ เพิ่มปริมาณหมู่ซัลไฟด์อิสระ เพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำจาก 80.98 เป็น 93.96% และลดขนาดอนุภาคน้ำมันถึงระดับต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร

ระยะเวลาในการการใช้คลื่นความถี่สูง อาจตั้งแต่น้อยกว่า 1 นาที ถึงนานกว่า 60 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ระยะเวลาในให้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน อาทิเช่น Zhang และคณะ [9] ใช้คลื่นกำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ กับโปรตีนถั่วพีนัท พบว่าขนาดอนุภาคโปรตีนลดลงตามลำดับเมื่อเพิ่มระยะเวลาการใช้คลื่นถึง 30 นาที ในขณะที่เมื่อใช้คลื่นเป็นระยะเวลา 1 นาที ค่าความสามารถในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 18.6 เป็น 24.0 ตารางเมตรต่อกรัม และ ค่าความคงตัวอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 55 นาที แต่เมื่อใช้ระยะเวลาใช้คลื่นนานมากกว่า 1 นาที ไม่มีผลต่อค่าทั้งสองชนิดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) Li และคณะ [10] ใช้คลื่นกำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ กับโปรตีนเนื้อไก่พบว่าเมื่อแปรระยะเวลาการใช้คลื่น 0 นาที, 3 นาทีและ 6 นาที ค่าความสามารถในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 77.34 เป็น 150.87 ตารางเมตรต่อกรัม และ ค่าความคงตัวอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 80 นาที ขนาดอนุภาคน้ำมันลดลงจาก 2082.67 เป็น 983.62 นาโนเมตรขนาดอนุภาคโปรตีนลดลงปริมาณหมู่ซัลไฟด์อิสระและค่าความไม่ชอบน้ำสูงขึ้น รวมทั้งโครงสร้าง ตติยภูมิ และโครงสร้างทุติยภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่ม

ขึ้นเมื่อได้รับคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นระยะเวลานานขึ้น

ปกติแล้วระหว่างการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลทำให้สารตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอาจส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน Zhang และคณะ [9] ศึกษาผลอุณหภูมิระหว่างการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วพีนัท โดยเมื่ออุณหภูมิระหว่างการการใช้คลื่นความถี่สูงเพิ่มจาก 0 เป็น 75 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น และค่าความสามารถในการทำอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 36 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าความคงตัวอิมัลชันเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 48 นาที

สภาวะ pH ของตัวอย่างสารละลายโปรตีนระหว่างการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีความสำคัญเช่นเดียวกัน เนื่องจากที่ค่า pH ต่าง ๆ โปรตีนมีค่าประจุไฟฟ้าแตกต่างกัน ที่ค่า pH ใกล้ค่า pI ของโปรตีน โปรตีนมีผลรวมประจุไฟฟ้าสุทธิเข้าใกล้ศูนย์ Gao และคณะ [7] พบว่า ศึกษาผลของค่า pH ต่าง ๆ คือ 3, 5, 7, 9, และ 11 หาก pH เข้าใกล้ pI ของโปรตีน กล่าวคือ ที่ pH 5 คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลทำให้อนุภาคโปรตีนมีลักษณะเกาะกลุ่มกันมากกว่าที่ค่า pH อื่น อนุภาคโปรตีนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้า สารละลายโปรตีนมีค่าความขุ่นสูงกว่าที่ค่า pH อื่น เมื่อสภาวะ pH ออกห่างจากค่า pI ของโปรตีน กล่าวคือ ที่ค่า pH 11 ค่าความไม่ชอบน้ำของโปรตีน และปริมาณหมู่ซัลไฟด์อิสระมีค่าสูง เนื่องจากโครงสร้างโปรตีนมีลักษณะคลายตัว และมีค่าประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นลบสูงกว่าที่ค่า pH อื่น ที่ค่า pH 11 พบว่าโปรตีนสามารถเพิ่มคงตัวอิมัลชันได้ดีกว่าที่ค่า pH อื่น โดยมีค่าความสามารถในการทำอิมัลชัน 160 ตารางเมตรต่อกรัม และ ค่าความคงตัวอิมัลชัน 60% เนื่องจากเกิดแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างอนุภาคน้ำมันในอิมัลชันเพิ่มขึ้น

นอกจากอุณหภูมิและ pH แล้ว ในอาหารจะมีปัจจัยหลักภายนอกอีกอย่าง คือ ปัจจัยชนิดและความเข้มข้นเกลือ จึงเสนอแนะให้มีการศึกษาปัจจัยดังกล่าวระหว่างการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงต่อไปในอนาคต

5. การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงกับโปรตีนจากแหล่งต่าง ๆ

โปรตีนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ มีโครงสร้าง จตุรภูมิ ตติยภูมิ โครงสร้างทุติยภูมิ และโครงสร้างปฐมภูมิที่แตกต่างกัน ตารางที่ 1 ได้สรุปผลจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการปรับโครงสร้างของโปรตีนจากแหล่งต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงที่แตกต่างกัน

O'Sullivan และคณะ [15] พบว่า คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนนม โปรตีนเวย์ และโปรตีนโซเดียมเคซีเนต แตกต่างกัน คลื่นมีผลลดค่าแรงตึงผิวของโปรตีนนมแต่ไม่มีผลต่อค่าแรงตึงผิวของโปรตีนเวย์ และโปรตีนโซเดียมเคซีเนต ทั้งนี้ เกิดจากคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อลดขนาดไมเซลล์ของโปรตีนนม เพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำ ทำให้โปรตีนนมมีอัตราเร็วในการเคลื่อนตัวไปยึดเกาะระหว่างพื้นผิวน้ำ-น้ำมันได้เร็วขึ้น และลดแรงตึงระหว่างผิวได้ดี ขนาดอนุภาคน้ำมันของอิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โปรตีนนมที่ผ่านคลื่นจึงมีขนาดที่เล็กลง แต่อิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โปรตีนเวย์ และโปรตีนโซเดียมเคซีเนตที่ผ่านคลื่นและไม่ผ่านคลื่นมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ดี อิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โปรตีนทั้งสามชนิดหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงมีความคงตัวอิมัลชันตลอดระยะเวลาการเก็บ 28 วัน โดยอนุภาคน้ำมันไม่รวมตัวกัน และมีขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Arzeni และคณะ [17] พบว่า โปรตีนเวย์ โปรตีนถั่วเหลือง และโปรตีนไข่ขาว ได้รับผลจากคลื่นเสียงความถี่สูงแตกต่างกัน คลื่นมีผลลดขนาดอนุภาคโปรตีนเวย์ ลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโปรตีนเวย์ ทำให้เจลโปรตีนเวย์แข็งขึ้น ในขณะที่คลื่นมีผลเพิ่มขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโปรตีนไข่ขาว อนุภาคโปรตีนไข่ขาวเกาะกลุ่มกันมากขึ้นโดยอันตรกิริยาไม่ชอบน้ำ มีค่าความไม่ชอบน้ำบริเวณผิวเพิ่มขึ้น โปรตีนไข่ขาวมีค่าการละลายน้ำลดลง คลื่นไม่มีผลต่อความแข็งของเจลโปรตีนไข่ขาว ส่วนโปรตีนถั่วเหลือง พบว่า คลื่นมีผลลดขนาดอนุภาคโปรตีนถั่วเหลือง โดยลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโปรตีนถั่วเหลือง และเพิ่มค่าการละลายน้ำ โปรตีนถั่วเหลืองมีลักษณะเจลที่แตกต่างจากโปรตีนชนิดอื่น สารละลายโปรตีนทั้งสามชนิดมีค่าดัชนีการไหลลดลง และค่าดัชนีการไหลของสารละลายโปรตีนถั่วเหลืองลดลงต่ำที่สุด

O'Sullivan และคณะ [16] ศึกษาเปรียบเทียบผลของคลื่นเสียงความถี่สูงต่อโครงสร้างโปรตีนจากสัตว์และโปรตีนจากพืช โดยศึกษาโปรตีนชนิดต่าง ๆ ดังนี้ เจลาตินจากวัว เจลาตินจากปลา โปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วพี โปรตีนถั่วเหลือง และโปรตีนข้าว คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลลดขนาดอนุภาคโปรตีนของเจลาตินจาก

ตารางที่ 1 การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงในการปรับสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนอาหารจากแหล่งต่าง ๆ

ชนิดของโปรตีน	แหล่งอ้างอิง	รายละเอียดการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง	โครงสร้างโปรตีนที่เปลี่ยนแปลง	สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนที่พัฒนาให้ดีขึ้น
โปรตีนถั่วเหลือง	[4]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 200, 400, และ 600 วัตต์ ระยะเวลา 15 และ 30 นาที ความเข้ม 75-83, 105-110, และ 131-138 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างทุติยภูมิ โครงสร้างตติยภูมิ	สมบัติการละลายน้ำ สมบัติการไหล
โปรตีนถั่วเหลือง	[13]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ ระยะเวลา 5, 20, และ 40 นาที ความเข้ม 105-110 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติการอุ้มน้ำ สมบัติเจล
โปรตีนถั่วเหลือง	[14]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ ระยะเวลา 5, 20, และ 40 นาที ความเข้ม 105-110 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติเจล
โปรตีนถั่วเหลืองร่วมกันเลซิทิน	[19]	คลื่นกำลังไฟฟ้า 150, 300, และ 450 วัตต์ ระยะเวลา 12 และ 24 นาที	การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโปรตีน	ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนถั่วพีนัท	[9]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 0, 120, 300, 480, 660, 840, และ 1020 วัตต์ ระยะเวลา 1, 3, 5, 10, 20, และ 30 นาที	โครงสร้างตติยภูมิ	ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนถั่วดำ	[8]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 150, 300, 450 วัตต์ ระยะเวลา 12 และ 24 นาที ความเข้ม 72-78, 96-104, และ 112-120 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างทุติยภูมิ โครงสร้างตติยภูมิ	สมบัติการละลายน้ำ
โปรตีนสกัดจากเมล็ดขนุน	[5]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ คลื่นกำลังไฟฟ้า 200, 400, และ 600 วัตต์ ระยะเวลา 15 นาที ความเข้ม 41, 61, และ 113 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างปฐมภูมิ การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโปรตีนขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติการละลายน้ำ สมบัติการอุ้มน้ำมัน สมบัติเจลความคงตัวอิมัลชัน ความคงตัวโฟม
โปรตีนนม โปรตีนเวย์ โปรตีนโซเดียมเคซีเนต	[15]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ระยะเวลา 2 นาที ความเข้ม 34 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติระหว่างพื้นผิว ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนเวย์	[7]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 120, 360, และ 600 วัตต์ ระยะเวลา 30 นาที ความเข้ม 14, 25, และ 43 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างทุติยภูมิ ขนาดอนุภาคโปรตีน	ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนแล็กโทแอลบูมิน	[12]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ระยะเวลา 15, 30 นาที ความเข้ม 39-44 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างปฐมภูมิ	สมบัติการละลายน้ำ ความคงตัวโฟม
โปรตีนเวย์ โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนไข่ขาว	[17]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ระยะเวลา 20 นาที พลังงานที่ให้ต่อตัวอย่าง 4.27 วัตต์	ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติเจล สมบัติการไหล
เจลาตินจากวัว เจลาตินจากปลา โปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วพี โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนข้าว	[16]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ระยะเวลา 2 นาที ความเข้ม 34 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติระหว่างพื้นผิว ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนเนื้อไก่	[10]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ ระยะเวลา 3 และ 6 นาที ความเข้ม 30 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างปฐมภูมิ โครงสร้างทุติยภูมิ โครงสร้างตติยภูมิ ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติระหว่างพื้นผิว ความคงตัวอิมัลชัน
โปรตีนหอยแชลล์ (scallops) *(Chlamys farreri)*	[11]	คลื่นความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 200, 400, 600, 800, และ 950 วัตต์ ระยะเวลา 60 นาที ความเข้ม 707.71, 1415.43, 2123.14, 2830.86, และ 3361.64 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	โครงสร้างทุติยภูมิ ขนาดอนุภาคโปรตีน	สมบัติการละลายน้ำ ความคงตัวอิมัลชัน

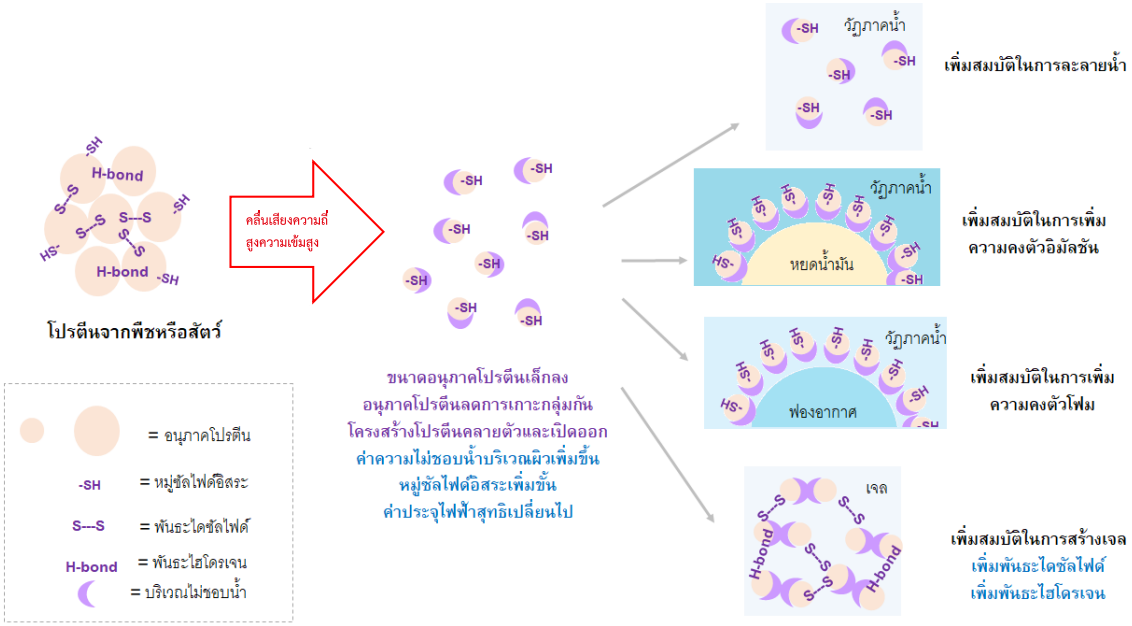
วัว เจลาตินจากปลา โปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วพี และโปรตีนถั่วเหลือง แต่ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคโปรตีนข้าว เนื่องจากโปรตีนข้าวมีโครงสร้างเกาะกันเป็นก้อนสูง ภายในก้อนประกอบด้วยองค์ประกอบอื่นที่ไม่ละลายน้ำอยู่ด้วย ได้แก่ คาร์บอไฮเดรต ผสมกับโปรตีนเสื่อมสภาพธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียมแยกโปรตีนข้าว คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลลดค่าแรงตึงระหว่างผิวของโปรตีนเจลาตินจากวัว โปรตีนไข่ขาว โปรตีนถั่วพี และโปรตีนถั่วเหลือง แต่ไม่มีผลลดค่าแรงตึงผิวระหว่างผิวของเจลาตินจากปลา และโปรตีนข้าว ทั้งนี้ คาดว่าคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อโปรตีนชนิดต่าง ๆ แตกต่างกัน อาทิเช่น องค์ประกอบโปรตีนที่เสื่อมสภาพธรรมชาติไม่เท่ากัน โครงสร้างโปรตีนที่เสื่อมสภาพธรรมชาติแตกต่างกัน และลักษณะการลดเกาะกลุ่มกันของโปรตีนแตกต่างกัน จึงมีผลต่อค่าแรงตึงระหว่างผิวน้ำและน้ำมันแตกต่างกัน ผลที่ตามมา คือขนาดอนุภาคน้ำมันของอิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โปรตีนเจลาตินจากวัว โปรตีนไข่ขาว และโปรตีนถั่วพีที่ผ่านคลื่นเท่านั้นที่มีขนาดเล็กกว่าโปรตีนที่ไม่ได้ผ่านคลื่น ถึงแม้ว่าโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านคลื่นมีความสามารถในการลดแรงตึงระหว่างผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่พบว่าลดขนาดอนุภาคอิมัลชัน เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองมีการเรียงตัวบนอนุภาคน้ำมันที่แตกต่างจากโปรตีนชนิดอื่น อิมัลชันที่เตรียมโดยใช้โปรตีนทุกชนิดหลังผ่านคลื่นเสียงความถี่สูงที่ความเข้มข้นเหมาะสมมีความคงตัวอิมัลชันในตลอดระยะเวลาการเก็บ 28 วัน โดยอนุภาคน้ำมันไม่รวมตัวกัน และมีขนาดอนุภาคน้ำมันเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงมีผลเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนอาหาร โดยลดการเกาะกลุ่มกันของกลุ่มก้อนโปรตีน ลดขนาดอนุภาคโปรตีน ทำให้โครงสร้างโปรตีนมีลักษณะคลายตัวและเปิดออก และอาจมีผลเปลี่ยนขนาดมวลโมเลกุลโปรตีน โปรตีนหลังผ่านการการใช้คลื่นความถี่สูงมีสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหารที่ดีขึ้น (ดังสรุปในรูปภาพที่ 1) กล่าวคือ มีสมบัติการละลายน้ำและสมบัติการอุ้มน้ำหรืออุ้มน้ำมันที่ดีขึ้น สมบัติเจลที่แข็งแรงและมีเนื้อสัมผัสได้ดีขึ้น สมบัติระหว่างพื้นผิวเพิ่มขึ้น และสมบัติอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีทำให้อิมัลชันและโฟมมีความคงตัวได้นานขึ้น อนุภาคน้ำมันในอิมัลชันมีขนาดเล็กลง ปริมาตรโฟมเพิ่มขึ้นอิทธิพลของคลื่นเสียงความถี่สูงขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของโปรตีน เนื่องจากโปรตีนแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้คลื่นที่เหมาะสมจึงแตกต่างแล้วแต่ชนิดของโปรตีนตัวอย่าง

คลื่นความถี่สูงความเข้มสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาหารโดยนำโปรตีนจากแหล่งต่าง ๆ ทั้งจากพืชและสัตว์มาใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ดี การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงอาจมีข้อควรระวัง คือ การใช้คลื่นดังกล่าวในอาหารที่มีองค์ประกอบอื่น ๆ นอกจากโปรตีนร่วมด้วยอาทิเช่น แป้ง และกากใย อาจมีผลต่อโครงสร้างของสารองค์ประกอบดังกล่าว และอาจมีผลเปลี่ยนคุณลักษณะของอาหารได้ [18] ข้อควรระวังอีกข้อ คือ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเป็นระยะเวลานานเกินไป หรือการเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากเกินไปอาจมีผลลดความคงตัวอิมัลชันได้ เนื่องจากการเพิ่มบริเวณไม่ชอบน้ำบริเวณผิวรอบนอกโปรตีนมากเกินไป ทำให้โปรตีนกลับมาเกาะกลุ่มกัน [19]

ปัจจุบัน ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่สูงความเข้มสูงในอุตสาหกรรมอาหาร [18] โดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงที่ประกอบด้วยแท่งโลหะขนาดใหญ่ที่เหมาะสำหรับการใช้งานในระดับโรงงานอุตสาหกรรมและเหมาะสำหรับการทำงานแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 2) คาดว่าจะมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้มากขึ้นในอนาคต เทคโนโลยีการใช้คลื่นความถี่สูงความเข้มสูงจัดว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมน้อย มีต้นทุนไม่สูงเกินไป การทำงานและการใช้งานที่ง่าย อาจประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตอาหาประเภทอิมัลชันได้อีกด้วย [20]



รูปที่ 1 ภาพแสดงการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูงในปรับโครงสร้างโปรตีนเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนในอาหาร

รูปที่ 2 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงความเข้มสูง (Ultrasonic Processor) ที่กำลังการผลิตระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม [1]

7. เอกสารอ้างอิง

1. Hielscher Ultrasonics GmbH, 1999-2021, Ultrasonic Laboratory / Industrial Ultrasonic Devices [Online], Available: www.hielscher.com. [28 October 2021]

2. Higuera-Barraza, O.A., Del Toro-Sanchez, C.L., Ruiz-Cruz, S. and Márquez-Ríos, E., 2016, "Effects of High-Energy Ultrasound on the Functional Properties of Proteins," *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, pp. 558-562.

3. McClemennts, D.J., 2005, Food Emulsions: Principles, Practice, and Techniques, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton.

4. Hu, H., Wu, J., Li-Chan, E.C.Y., Zhu, L., Zhang, F., Xu, X., Fan, G., Wang, L., Huang, X. and Pan, S., 2013, "Effects of Ultrasound on Structural and Physical Properties of Soy Protein Isolate (SPI) Dispersions," *Food Hydrocolloids*, 30 (2), pp. 647-655.

5. Resendiz-Vazquez, J.A., Ulloa, J.A., Urías-Silvas, J.E., Bautista-Rosales, P.U., Ramírez-Ramírez, J.C., Rosas-Ulloa, P. and González-Torres, L., 2017, "Effect of High-intensity Ultrasound on the Technofunctional Properties and Structure of Jackfruit (Artocarpus Heterophyllus) Seed Protein Isolate," *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, pp. 436-444.

6. Jambrak, A.R., Mason, T.J., Lelas, V., Paniwnyk, L. and Herceg, Z., 2014, "Effect of Ultrasound Treatment on Particle Size and Molecular Weight of Whey Proteins," *Journal of Food Engineering*, 121, pp. 15-23.

7. Gao, H., Ma, L., Li, T., Sun, D., Hou, J., Li, A. and Jiang, Z., 2019, "Impact of Ultrasonic Power on the Structure and Emulsifying Properties of Whey Protein Isolate under Various pH Conditions," *Process Biochemistry*, 81, pp. 113-122.

8. Jiang, L., Wang, J., Li, Y., Wang, Z., Liang, J., Wang, R., Chen, Y., Ma, W., Qi, B. and Zhang, M., 2014, "Effects of Ultrasound on the Structure and Physical Properties of Black Bean Protein Isolates," *Food Research International*, 62, pp. 595-601.

9. Zhang, Q.-T., Tu, Z.-C., Xiao, H., Wang, H., Huang, X.-Q., Liu, G.-X., Liu, C.-M., Shi, Y., Fan, L.-L. and Lin, D.-R., 2014, "Influence of Ultrasonic Treatment on the Structure and Emulsifying Properties of Peanut Protein Isolate," *Food and Bioproducts Processing*, 92 (1), pp. 30-37.

10. Li, K., Fu, L., Zhao, Y.-Y., Xue, S.-W., Wang, P., Xu, X.-L. and Bai, Y.-H., 2020, "Use of High-intensity Ultrasound to Improve Emulsifying Properties of Chicken Myofibrillar Protein and Enhance the Rheological Properties and Stability of the Emulsion," *Food Hydrocolloids*, 98, pp. 105275.

11. Wu, D., Wu, C., Ma, W., Wang, Z., Yu, C. and Du, M., 2019, "Effects of Ultrasound Treatment on the Physicochemical and Emulsifying Properties of Proteins from Scallops *(Chlamys farreri)*," *Food Hydrocolloids*, 89, pp. 707-714.

12. Jambrak, A.R., Mason, T.J., Lelas, V. and Krešić, G., 2010, "Ultrasonic Effect on Physicochemical and Functional Properties of @-lactalbumin," *LWT - Food Science and Technology*, 43 (2), pp. 254-262.

13. Hu, H., Fan, X., Zhou, Z., Xu, X., Fan, G., Wang, L., Huang, X., Pan, S. and Zhu, L., 2013, "Acid-induced Gelation Behavior of Soybean Protein Isolate with High Intensity Ultrasonic Pre-treatments," *Ultrasonics Sonochemistry*, 20 (1), pp. 187-195.

14. Hu, H., Li-Chan, E.C.Y., Wan, L., Tian, M. and Pan, S., 2013, "The Effect of High Intensity Ultrasonic Pre-treatment on the Properties of Soybean Protein Isolate Gel Induced by Calcium Sulfate," *Food Hydrocolloids*, 32 (2), pp. 303-311.

15. O'Sullivan, J., Arellano, M., Pichot, R. and Norton, I., 2014, "The Effect of Ultrasound Treatment on the Structural, Physical and Emulsifying Properties of Dairy Proteins," *Food Hydrocolloids*, 42, pp. 386-396.

16. O'Sullivan, J., Murray, B., Flynn, C. and Norton, I., 2016, "The Effect of Ultrasound Treatment on the Structural, Physical and Emulsifying Properties of Animal and Vegetable Proteins," *Food Hydrocolloids*, 53, pp. 141-154.

17. Arzeni, C., Martínez, K., Zema, P., Arias, A., Pérez, O.E. and Pilosof, A.M.R., 2012, "Comparative Study of High Intensity Ultrasound Effects on Food Proteins Functionality," *Journal of Food Engineering*, 108 (3), pp. 463-472.

18. Téllez-Morales, J.A., Hernández-Santo, B. and Rodríguez-Miranda, J., 2020, "Effect of Ultrasound on the Techno-functional Properties of Food Components/Ingredients: A Review," *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, pp. 104787.

19. Sui, X., Bi, S., Qi, B., Wang, Z., Zhang, M., Li, Y. and Jiang, L., 2017, "Impact of Ultrasonic Treatment on an Emulsion System Stabilized with Soybean Protein Isolate and Lecithin: Its Emulsifying Property and Emulsion Stability," *Food Hydrocolloids*, 63, pp. 727-734.

20. Taha, A., Ahmed, E., Ismaiel, A., Ashokkumar, M., Xu, X., Pan, S. and Hu, H., 2020, "Ultrasonic Emulsification: An Overview on the Preparation of Different Emulsifiers-stabilized Emulsions," *Trends in Food Science and Technology*, 105, pp. 363-377.