บทที่ 4

การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร

(Ultrasound in Food Processing)

บทนำ

โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงคลื่นอัลตร้าซาวน์ (ultrasound) แล้วหลายท่านคงนึกไปถึงบทบาททางด้านการแพทย์หรือในด้านสมุทรศาสตร์ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันอยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตร้าซาวน์มิได้จำกัดอยู่เพียงเท่านั้น ได้มีการนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว เช่น ปศุสัตว์ วัสดุศาสตร์ การวิเคราะห์ต่างๆ การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (non destructive testing) รวมทั้งงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมและการแปรรูปอาหารซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการนำอัลตร้าซาวน์มาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารเท่านั้น

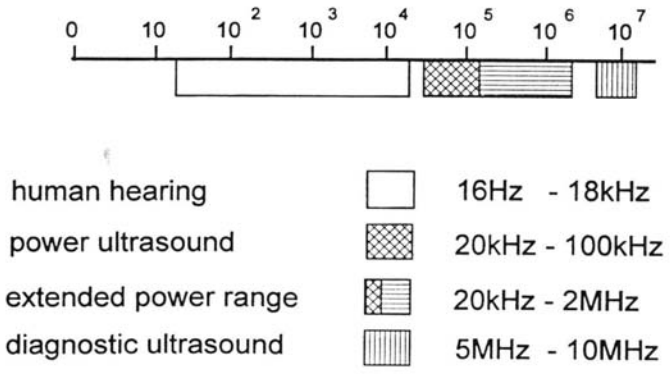
ความหมายของคลื่นอัลตร้าซาวน์

คลื่นอัลตร้าซาวน์หรือคลื่นอัลตร้าโซนิก (ultrasonic waves) หมายถึงพลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่า (Hoover, 2000) หรือหมายถึงคลื่นความดัน (pressure waves) ที่มีความถี่ (frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิร์ตซ์, kHz) ส่วนคำว่าอัลตร้าโซนิกส์ (ultrasonics) หรือโซนิเคชันส์ (sonications) หมายถึงการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียงหรืออัลตร้าซาวน์ในช่วงความถี่ดังกล่าวซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน

โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียง (sound) ที่มนุษย์ได้ยินนั้นเกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่ยืดหยุ่น (elastic medium) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 20,000 kHz คลื่นเสียงผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่ยืดหยุ่น

ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (longitudinal waves) แต่คลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปภายในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง (transverse waves)

ในการศึกษา การใช้ประโยชน์จากอัลตร้าซาวน์ตั้งแต่ต้นจนถึงปัจจุบัน พบว่ามีการนำอัลตร้าซาวน์มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การใช้อัลตร้าซาวน์กำลังต่ำและความถี่สูง (low power and high frequencies) ซึ่งใช้ในด้านการวิเคราะห์ (diagnostic ultrasound) เป็นส่วนใหญ่และการใช้อัลตร้าซาวน์กำลังสูงและความถี่ต่ำ (high power and low frequencies) หรือที่เรียกว่าพาวเวอร์อัลตร้าซาวน์ (power ultrasound) ที่มักนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Mason, 1998) คลื่นความถี่ของอัลตร้าซาวน์ในช่วงต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 คลื่นความถี่ของอัลตร้าซาวน์ในช่วงต่าง ๆ
ที่มา : Mason (1998)

การใช้พาวเวอร์อัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทำให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของอาหารเนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (cavitation) และส่วนมากใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20 – 40 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อัลตร้าซาวน์ทั่วไปที่ใช้ในการทำความสะอาด การทำให้เซลล์แตกและในการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น

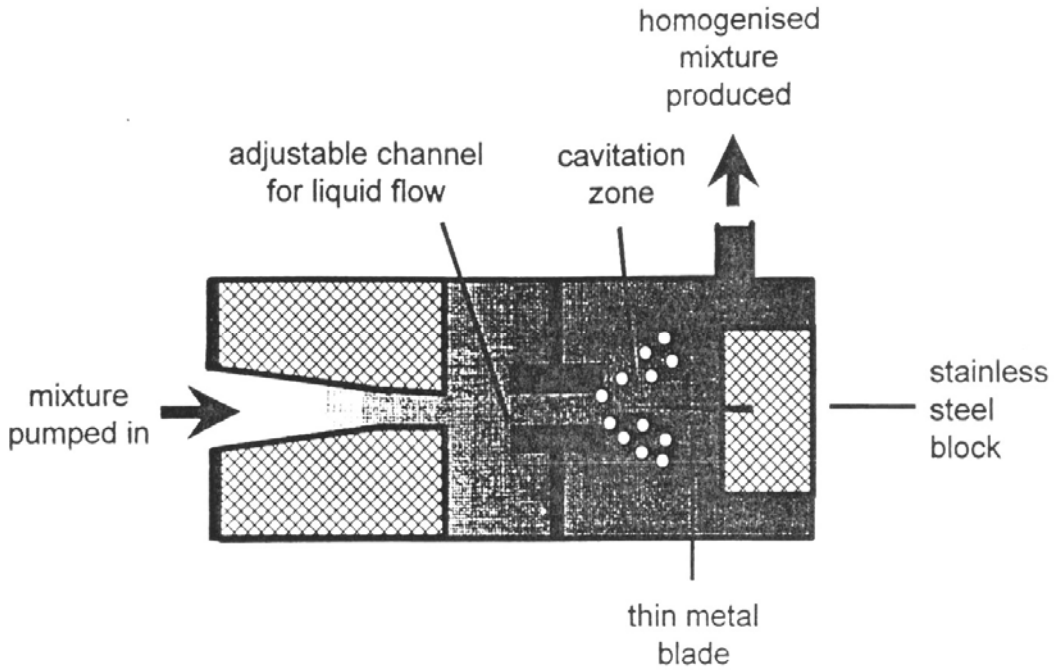
การสร้างคลื่นอัลตร้าซาวน์

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหารจำเป็นต้องรู้และเข้าใจถึงการเกิดคลื่นรวมทั้งวิธีการนำพลังงานคลื่นที่สร้างขึ้นไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว แหล่งของคลื่น

อัลตร้าซาวน์และชนิดของอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจาก ทรานส์ดิวเซอร์ (transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียง เป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการตัดสินใจนำอัลตร้าซาวน์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยทั่วไปสามารถแบ่งทรานส์ดิวเซอร์เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภทได้แก่

1. ลิควิดไดร์ฟเวนทรานส์ดิวเซอร์ (liquid driven transducer)

ลักษณะการทำงานของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ ทำให้เกิดคลื่นอัลตร้าซาวน์ได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและผ่านไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (thin blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะดังกล่าวเกิดการสั่นไปมา ในการสั่นแต่ละครั้งจะทำให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดคลื่นความดันขึ้นและทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชันขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปวิเตชันเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ แสดงดังภาพที่ 4.2

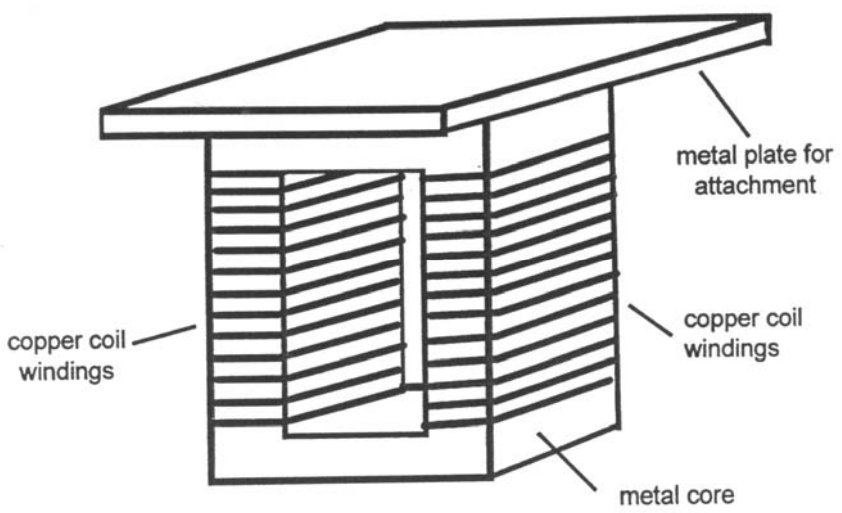


ภาพที่ 4.2 ลิควิดไดร์ฟเวนทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา : Mason (1998)

2. แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์ (magnetostrictive transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโตสตริกชัน (magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เช่นนิกเกิล (nickel) หรือเหล็ก (iron) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลีนอยด์ (solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอย (nickel alloy) ขนาดบางจำนวนหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้ามดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์
ที่มา : Mason (1998)

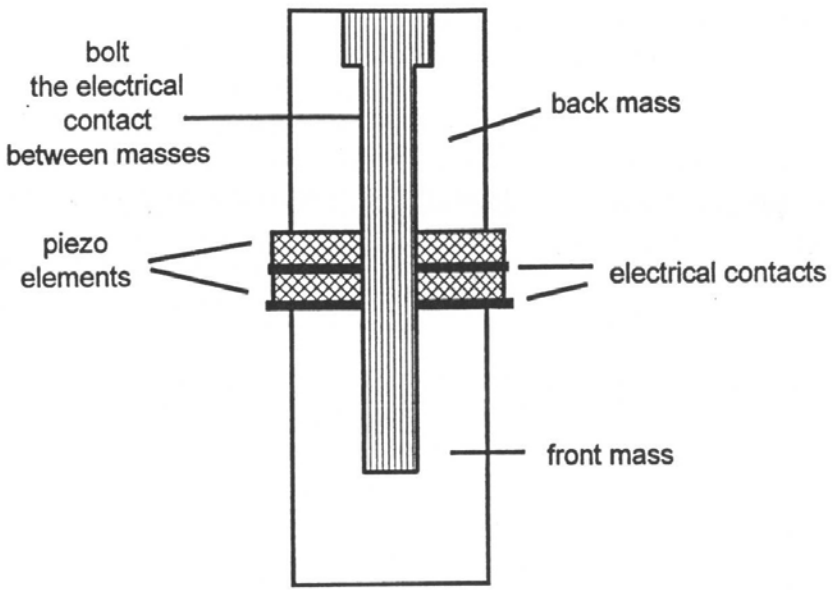
จากภาพเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด จะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนซึ่งผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (เรียกว่าเกิดแมกนีโตสตริกชัน - magnetostriction) และทำให้ขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ลดลงไปด้วยและเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานส์ดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดให้กระแสไฟฟ้าแก่ตัวแกนจะทำให้แกนมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดแรงสั่นที่ต้องการขึ้นได้ ทั้งนี้จะต้องออกแบบทรานส์ดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการสั่นตามความถี่ของคลื่นที่กำหนดไว้

ข้อเสียของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ได้แก่สามารถสร้างคลื่นอัลตร้าซาวน์ได้ต่ำกว่า 100 kHz และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 60% โดยจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน

ระบบนี้จึงมักต้องใช้การทำความเย็นภายนอกควบคู่กันไปด้วย ส่วนข้อดีได้แก่การที่ระบบนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน

3. พีโซอิเล็คตริกทรานส์ดิวเซอร์ (piezoelectric transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตร้าซาวน์โดยการใช้เซรามิกส์ (ceramics) ที่มีส่วนผสมของสารพีโซอิเล็คตริก (piezoelectric materials) เช่นแบเรียมไทแทเนต (barium titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (lead metaniobate) สารพีโซเซรามิกดังกล่าวนิยมใช้ในเครื่องอัลตร้าซาวน์ที่ใช้ชะสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ให้หลุดออกหรือเพื่อทำความสะอาด หรือใช้กับระบบโพรบ (probe systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูตรงกลาง ทรานส์ดิวเซอร์เซรามิกส์นี้จะมีความเปราะและแตกหักง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการแตกหักแล้ว ยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกินโดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นพีโซเซรามิกสองชนิด (เรียกว่า sandwich construction) ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว พีโซอิเล็คตริกทรานส์ดิวเซอร์แสดงดังภาพที่ 4.4 โดยทรานส์ดิวเซอร์นี้มีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 95% และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นอัลตร้าซาวน์



ภาพที่ 4.4 พีโซอิเล็คตริกทรานส์ดิวเซอร์

ที่มา : Mason (1998)

การออกแบบระบบอัลตร้าโซนิก

ระบบอัลตร้าโซนิกที่ใช้ลิควิดทรานส์ดิวเซอร์นั้นเป็นระบบที่ง่ายที่สุดและมีความทนทาน แต่ในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการปั๊มของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านรูขนาดเล็กไปยังแผ่นโลหะขนาดบาง ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้งานของระบบอัลตร้าโซนิกที่ใช้ลิควิดทรานส์ดิวเซอร์จึงได้แก่การผสม (mixing) และการโฮโมจีไนส์ (homogenization) ซึ่งช่วยทำให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นตัวให้กำเนิดพาวเวอร์อัลตร้าซาวน์ในปัจจุบันได้แก่ระบบที่ใช้ไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดคลื่นเสียง (electroacoustic systems) เช่นพีโซอิเล็คตริกหรือแมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์ หลังจากที่ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวให้กำเนิดคลื่นแล้วจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งถ่ายคลื่นอัลตร้าซาวน์ไปยังของเหลว โดยสรุปแล้วระบบอัลตร้าซาวน์จะต้องมีอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นอยู่ 3 ส่วน ได้แก่

- เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (generator) โดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับที่ความถี่ที่ต้องการและผ่านเข้าสู่ทรานส์ดิวเซอร์

- ทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงไปเป็นการสั่นเนื่องจากพลังงานกล ทรานส์ดิวเซอร์ที่นิยมในปัจจุบันคือชนิดที่ใช้เทคโนโลยีพีโซอิเล็คตริก โดยที่รูปร่างและขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ที่นำมาประกบกันจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ต้องการใช้งานและพลังงานจากทรานส์ดิวเซอร์แต่ละชนิดจะแปรผกผันกับกำลังสองของความถี่ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้พาวเวอร์อัลตร้าซาวน์จึงมักใช้ที่ช่วงความถี่ต่ำ โดยตัวทรานส์ดิวเซอร์จะอยู่ติดกับบูสเตอร์ (booster) หรือฮอร์น (horn) ด้านบนและเชื่อมต่อกับระบบส่งถ่ายพลังงาน

- ระบบส่งถ่ายพลังงาน (delivery systems) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งถ่ายพลังงานจากการสั่นสะเทือนไปยังของเหลว ในกรณีที่เป็นอ่างอัลตร้าโซนิก (ultrasonic bath) ตัวทรานส์ดิวเซอร์จะอยู่บริเวณฐานตรงด้านล่างของตัวอ่างหรือถังและส่งถ่ายพลังงานโดยตรงไปยังของเหลวที่อยู่ภายในอ่าง ส่วนระบบที่ต้องการพลังงานที่สูงกว่านี้ จะใช้วิธีขยายสัญญาณหรือพลังงานและส่งถ่ายพลังงานไปยังของเหลว โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์นซึ่งเป็นแท่งโลหะที่มีรูปร่างแตกต่างกันและจะติดกับทรานส์ดิวเซอร์ โดยตัวฮอร์นมักทำจากวัสดุที่ทำให้เกิดขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตัวของความยาวคลื่นเสียง หลังจากใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้บริเวณส่วนปลายของฮอร์นเกิด

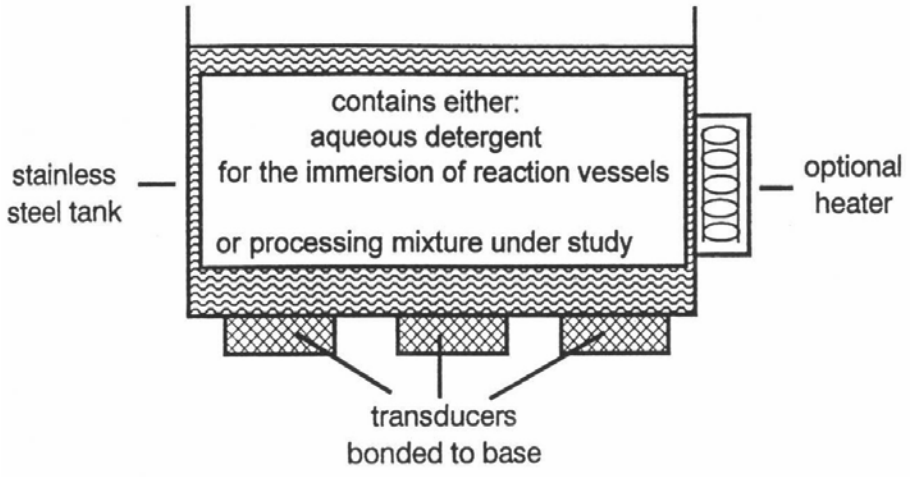
การกัดกร่อนและมีผลต่อความยาวของฮอร์นโดยทำให้สั้นลง จึงนิยมใช้ส่วนปลายฮอร์นชนิดที่ถอดเข้าออกได้และเป็นเกลียวซึ่งสามารถเปลี่ยนได้ง่าย

ประเภทของเครื่องอัลตร้าโซนิก (ultrasonic reactor)

เครื่องอัลตร้าโซนิกที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

1. อ่างอัลตร้าโซนิก (ultrasonic baths)

อ่างอัลตร้าโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบ โดยทั่วไปทรานส์ดิวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างของอ่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 kHz อ่างอัลตร้าโซนิกมีลักษณะดังภาพที่ 4.5



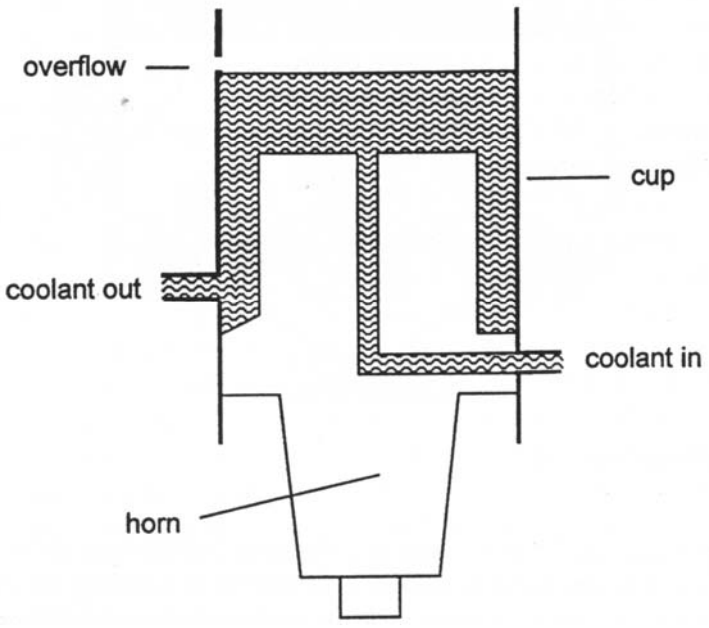
ภาพที่ 4.5 อ่างอัลตร้าโซนิก
ที่มา : Mason (1998)

สำหรับอ่างอัลตร้าโซนิกนั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่ตรงบริเวณระดับความสูงค่าหนึ่งตลอดความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อน (reflection) ของคลื่นอัลตร้าซาวน์ที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับ

ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง (สำหรับน้ำ มีค่า λ = 37 มิลลิเมตรที่ความถี่ 40 kHz) ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้

อ่างอัลตร้าโซนิกนั้นมีอุปกรณ์เสริมประเภทต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (thermostatically controlled heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (frequency sweeps) ที่ทำให้แคปติเวชันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงาน สวิทช์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตร้าโซนิกทั่วไปมักจะให้พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแคปวิเตชันที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างมักมีปริมาณมากทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง

รูปแบบของอ่างอัลตร้าโซนิกอีกประเภทหนึ่งเรียกว่าคัพฮอร์น (cup horn) แสดงดังภาพที่ 4.6 โดยจัดว่าเป็นอ่างอัลตร้าโซนิกที่สร้างพลังงานได้สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นอัลตร้าซาวน์ซึ่งติดอยู่กับทรานส์ดิวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับของเหลวและลักษณะการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวซึ่งมีความสำคัญมาก

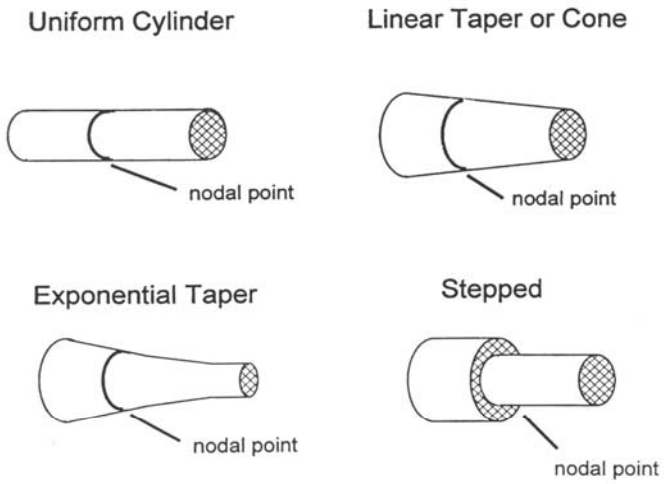


ภาพที่ 4.6 อ่างอัลตร้าโซนิกแบบคัพฮอร์น

ที่มา : Mason (1998)

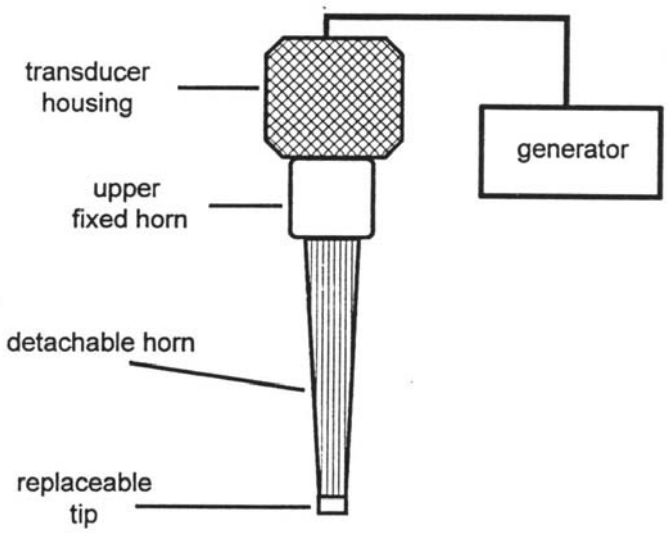
2. ระบบอัลตร้าโซนิกแบบโพรบ (ultrasonic probe systems)

ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากทรานส์ดิวเซอร์นั้น โดยทั่วไปจะนำ ทรานส์ดิวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 4.7 โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิต ระบบอัลตร้าโซนิกแบบโพรบแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.7 ลักษณะของฮอร์นชนิดต่างๆ

ที่มา : Mason (1998)



ภาพที่ 4.8 ระบบอัลตร้าโซนิกแบบโพรบ

ที่มา : Mason (1998)

แอมพลิจูดที่สร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (uniform cylinder) นั้นแอมพลิจูดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าตัดในฮอร์นระหว่างสองพื้นที่คือ driven face (D) และ emitting face (d) ตัวอย่างเช่นในฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น exponential หรือ linear tapered (cone) (ภาพที่ 4.7 บนขวาหรือล่างซ้าย) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ D/d ในขณะที่ฮอร์นที่มีลักษณะเป็น stepped (ภาพที่ 4.7 ล่างขวา) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ $(D/d)^2$ ซึ่งจะเห็นว่าฮอร์นแบบ stepped จะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่าเสมอ แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัตถุ (internal stress) อัตราส่วนระหว่าง D/d จะต้องมีค่าไม่สูงจนเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ คุณสมบัติของวัตถุที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดิวเซอร์และพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่น (emitting surface) ในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตทรานส์ดิวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดและคืนตัวกลับได้ดี เช่นไทเทเนียม (titanium) หรืออะลูมิเนียมอัลลอย (aluminium alloy) ซึ่งวัตถุทั้งสองชนิดมีความทนต่อการล้าเนื่องมาจากแรงกล แต่อะลูมิเนียมอัลลอยนั้นไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาแคปติเวชันเนื่องจากถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงควรใช้วัตถุพวกไทเทเนียมอัลลอยแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่นนั้น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ที่แอมพลิจูดสูงจะมีข้อจำกัดเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาแคปวิเตชันจะรบกวนการส่งถ่ายของพลังงานไปยังของเหลว

3. อุปกรณ์ที่ใช้ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (equipment involving parallel vibrating plates)

ระบบนี้พบว่าเป็นทางเลือกที่ดีในการนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาใช้กับงานที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์อย่างสม่ำเสมอในระหว่างทางที่ไปยังเครื่อง อัลตร้าโซนิกซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่บริเวณผนังด้านในตัวเครื่อง เมื่อแผ่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้นจะมีผลทำให้การลดทอนพลังงาน (attenuation) ของคลื่นเสียงภายในของเหลวมีค่าต่ำสุดและไม่เกิดคลื่น ข้อดีของระบบแผ่นสั่นคู่ที่ติดตั้งในแต่ละด้านของของเหลวเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบแผ่นสั่นแผ่นเดียวคือคลื่นพลังงานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งถ่ายไปยังของเหลวจะสะท้อนไปยังแผ่นที่สั่นอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้ผลที่เกิดจากแรงกลมีค่าสูงสุด

4. ระบบการสั่นตามแนวรัศมี (radial vibrating systems)

ในการให้พลังงานคลื่นอัลตร้าซาวน์กับของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อนั้น วิธีที่ดีที่สุดคือการใช้การสั่นของท่อเพื่อทำให้เกิดคลื่นพลังงานขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นรวมทั้งใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดสูงได้ ลักษณะการตัดขวางของท่อดังกล่าวมีความสำคัญโดยท่อทรงกระบอกที่สั่นจะทำให้เกิดคลื่นอัลตร้าซาวน์สูงสุดตรงบริเวณกึ่งกลางของท่อเช่นเดียวกับท่อที่มีลักษณะหกเหลี่ยมและการเกิดพลังงานน้อยกว่าตรงบริเวณที่ใกล้พื้นผิวด้านในของท่อมีผลดีคือช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการกัดกร่อนตรงบริเวณดังกล่าว การนำทรานส์ดิวเซอร์มาเชื่อมติดกับท่อโลหะโดยตรง ทำให้สามารถเกิดคลื่นในแนวรัศมีและเกิดบัพ (nodes) และปฏิบัพ (antinodes) เป็นช่วงระยะเท่ากับ $\lambda/2$ ตามความยาวของท่อ

เทคนิคการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์

เทคนิคหรือวิธีการในการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์สำหรับการใช้ประโยชน์ต่างๆ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

1) การทำให้เกิดการสั่นโดยตรง เช่นใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหรือในการผสมต่างๆ

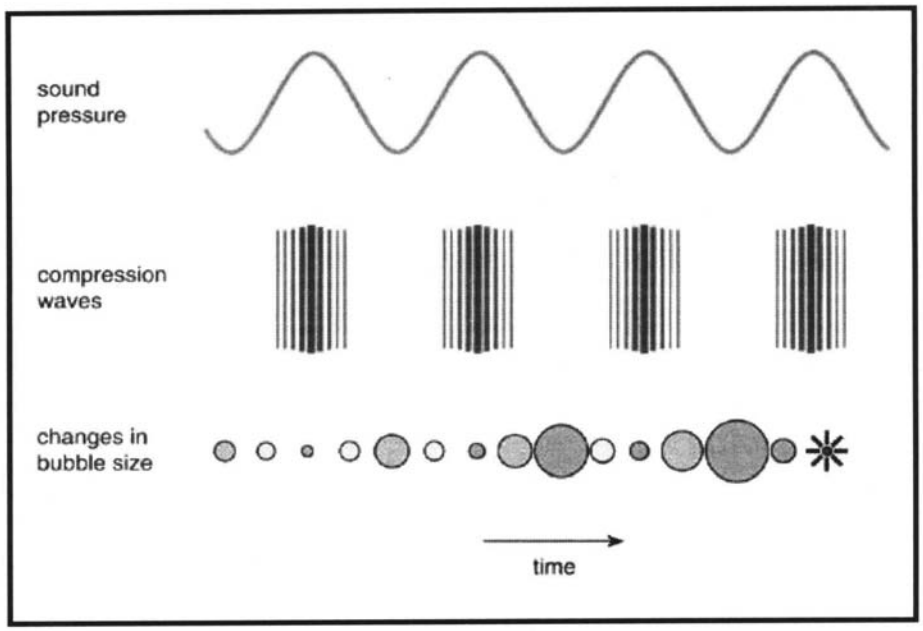
2) เทคนิคพัลสเอคโค (the pulse-echo ultrasound) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1940 เพื่อใช้ในการตรวจสอบตำหนิของโลหะ เทคนิคนี้มีหลักการที่ว่าทรานสดิวเซอร์จะสัมผัสกับตัวอย่าง จากนั้นปล่อยคลื่นอัลตร้าซาวน์เป็นระยะๆ ไปยังตัวอย่าง ถ้าคลื่นอัลตร้าซาวน์ที่ถูกปล่อยเข้าไปภายในตัวอย่างไปกระทบกับความหนาแน่น (density) หรือความยืดหยุ่น (elasticity) ที่แตกต่างออกไปจากเดิมจะทำให้มีพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับมายังทรานสดิวเซอร์ ซึ่งสัญญานที่ส่งกลับมาจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญานไฟฟ้า จากนั้นจะถูกขยาย (amplified) ปรับแต่ง (conditioned) และแสดงภาพ (displayed) ของโครงสร้างหรือลักษณะภายในดังกล่าวออกมาให้เห็นได้ เทคนิคนี้ใช้ในการควบคุมการไหลของของไหล วัดความหนาของชั้นไขมันในสัตว์ วัดความหนาของวัสดุต่างๆ รวมทั้งใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์

3) การใช้ผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (the Doppler effect) เทคนิคนี้ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยใช้หลักการที่ว่าความถี่ของเสียงสะท้อน

(the echoes) จากสิ่งที่เคลื่อนที่จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณที่ปล่อยออกมาเป็นจังหวะเนื่องจากระยะทางไปยังจุดหมายเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อจุดหมายเคลื่อนที่เข้ามาใกล้หรือเคลื่อนที่ไกลออกจากทรานสดิวเซอร์ จะทำให้ความถี่ที่ตรวจวัดได้ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงกว่าความถี่ที่ส่งผ่านออกมา (เช่นเดียวกับการที่หูของเราได้ยินเสียงหวูดของรถไฟเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้ามาใกล้หรือเคลื่อนที่ไกลออกไป) ซึ่งเทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านการแพทย์ เช่นการตรวจอัตราการไหลของเลือดและการตรวจหัวใจ

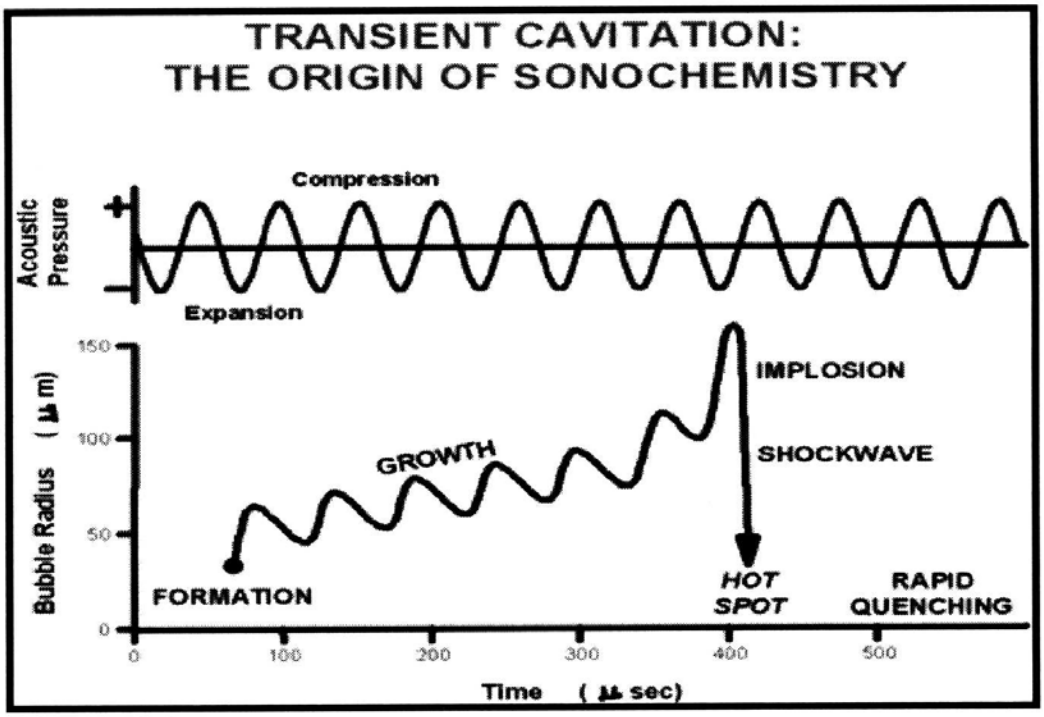
ปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation)

ปรากฏการณ์แคปวิเตชันหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นเสียงอัลตร้าซาวน์ โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางกายภาพ (จากแรงกล) เนื่องมาจากฟองอากาศ (bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์จะถูกบีบอัด (compress) และคลายตัว (stretch) ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.9 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตร้าซาวน์เป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน (Atchley and Crum, 1998) เป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุดแสดงดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตร้าซาวน์

ที่มา : Suslick (1994)



ภาพที่ 4.10 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตร้าซาวน์

ที่มา : Suslick (1994)

Frizzell (1988) รายงานว่าแคปวิเตชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่แคปวิเตชันแบบถาวร (stable cavitation) และแคปวิเตชันแบบชั่วคราว (transient cavitation) ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลทำให้พฤติกรรมหรือลักษณะของฟองแก๊สที่ได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์แตกต่างกันออกไป โดยแคปวิเตชันแบบถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศหรือฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่ง (oscillate) เมื่อได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์เป็นจำนวนหลายรอบของการสั่นแต่ไม่เกิดการแตกของฟองอากาศหรือฟองแก๊สดังกล่าว ซึ่งฟองอากาศหรือฟองแก๊สนี้อาจจะเพิ่มขนาดขึ้นจนถึงขนาดเรโซแนนซ์ (resonance size) (เป็นขนาดของฟองแก๊สที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากันกับความถี่ในการสั่นแบบบังคับ) ส่วนแคปวิเตชันแบบชั่วคราวนั้น เกิดขึ้นในระยะการบีบอัดของฟองแก๊ส (compression phase) ในของเหลวที่ได้รับความเครียด (tension stress) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเกิดการขยายตัวของฟองแก๊ส ซึ่งมีผลทำให้การแตกของฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่งและขยายขนาดเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะแตกออกอย่างรวดเร็วเมื่อฟองแก๊สนั้นขยายขนาดขึ้นเมื่อถึงขนาดที่จำเพาะ

Sala et al. (1995) รายงานว่าในสภาวะที่ฟองอากาศแตกนั้นพบว่าทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000 เคลวิน (K) และความดันสูงถึง 2,000 atm ในบริเวณจุดที่เกิดคลื่นกระแทก (shock waves) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเกิดการขยายและหดตัวของฟองแก๊สนั้น จะเกิดสมดุลขึ้นระหว่าง

ความดันไอภายในและภายนอกฟองแก๊สและพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะขยายตัวจะมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะหดตัว จึงเป็นผลให้การซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ขยายตัวเกิดขึ้นได้มากกว่า และฟองแก๊สนี้จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบความถี่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะขยายตัวต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะถูกอัดจะเพิ่มมากขึ้นในแต่ละรอบ จนกระทั่งฟองแก๊สมีขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในฟองแก๊สมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งรอบของการสั่น และเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากคลื่นอัลตร้าซาวน์ไม่เพียงพอในการคงสภาวะของแก๊สหรือไอ จึงทำให้เกิดการควบแน่น (condensation) ขึ้นทันทีทันใด โดยโมเลกุลที่ควบแน่นนั้นจะชนซึ่งกันและกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นและเกิดจุดหรือบริเวณเล็กๆ ที่มีอุณหภูมิและความดันที่สูงมาก (Suslick, 1988) และเป็นที่เชื่อกันว่าปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่เกิดในระหว่างที่ของเหลวได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์ ซึ่งทันทีที่ฟองแก๊สหรือฟองอากาศแตกจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีหรือสร้างวิถีของปฏิกิริยา (reaction pathway) หรือทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แตกต่างไปจากปฏิกิริยาเดิมจากสภาวะปกติ Williams (1994) รายงานว่าในการพูดคุยทั่วไป พบว่ากำลังของเสียง (sound power levels) มีค่าประมาณ 10^{-7} Wm^{-2} และเครื่องขุดเจาะถนน (pneumatic drill) ที่มีความดังของเสียง 110 dB จะให้ค่ากำลังของเสียงที่ประมาณ 10^{-1} Wm^{-2} แต่ในส่วนของคลื่นอัลตร้าซาวน์กำลังสูง (high power ultrasound) พบว่าค่าระดับกำลังของเสียงอยู่ในช่วง 10^{3} to 10^{6} Wm^{-2} (ที่ 10^{6} Wm^{-2} พบว่าอัลตร้าซาวน์จะสามารถเจาะทะลุแผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ยได้ภายใน 30 วินาที) และความดันที่เกิดขึ้นจะสูงถึง 10^{4} atm และมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 ถึง 1,500 K

ผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อจุลินทรีย์

การศึกษาเกี่ยวกับผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อเซลล์นั้น อาจกล่าวได้ว่ามีจุดเริ่มต้นจากการศึกษาผลของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงต่อเซลล์และพาราไซต์โดย Harvey and Loomis (1929) และประกอบกับการพัฒนาอุปกรณ์ในการสร้างคลื่นอัลตร้าซาวน์ทำให้มีการศึกษาผลของอัลตร้าซาวน์ต่อจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น Williams et al. (1970) ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในการทำให้กลุ่มของเซลล์จุลินทรีย์ (clump) ที่อยู่ในของเหลวเกิดการแยกออกจากกัน และ Dewhurst et al. (1986) ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์เพื่อทำให้สปอร์ของ *Bacillus cereus* ที่ติดอยู่บนพื้นผิวของโพลีเมอร์หลุดออก ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ปริมาณของจุลินทรีย์มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น และ Mett et al. (1988) ได้ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์เพื่อทำลายผนังเซลล์ (cell walls) ในการศึกษาองค์ประกอบภายในของเซลล์

นอกจากนั้นยังมีการศึกษาการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในการพาสเจอไรส์และสเตอริไลส์อาหารและอุปกรณ์สำหรับการผ่าตัดอีกด้วย (Sala et al.,1995)

การทำลายจุลินทรีย์เนื่องจากคลื่นอัลตร้าซาวน์นั้น มีรายงานว่าเกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาพบว่าในระหว่างการเกิดแคปวิเตชัน จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (highly reactive chemical radicals) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางของเหลวด้วย เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แต่พบว่าแท้จริงแล้วจุลินทรีย์ถูกทำลายเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันสูงจากการแตกตัว (implosions) ของฟองอากาศ ซึ่งการแตกตัวของฟองอากาศนั้นจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเป็นจุดร้อนขนาดเล็ก (hot spots) แต่เนื่องจากตัวกลางที่ได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ มีปริมาตรหรือขนาดเล็กมาก ดังนั้นอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นจะสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้เพียงส่วนน้อยเท่านั้น (Sherba et al., 1991)

แม้จะมีรายงานว่าจุลินทรีย์บางชนิดสามารถทนต่อความดันสูงได้ แต่พบว่าจะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันที่สลับเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดในช่วงปรากฏการณ์แคปติเวชันและมีผลทำให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลายแต่ก็ยังมีรายงานการศึกษาอีกหลายฉบับที่พบว่าผลในการทำลายจุลินทรีย์ของอัลตร้าซาวน์นั้นไม่ได้เกิดจากแรงกลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในส่วนของการทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์ของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ นั้น พบว่ามีการศึกษามากมายและแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ โดยพบว่าเซลล์ที่มีขนาดใหญ่จะทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์ได้น้อยกว่าเซลล์ขนาดเล็ก (หรือ sensitive มากกว่า) ยกเว้นเชื้อในตระกูล *Mycobacteriaceae* ส่วนเซลล์ที่มีรูปร่างกลม (coccal forms) จะทนต่ออัลตร้าซาวน์มากกว่าเซลล์รูปร่างแท่ง (rod shape) จุลินทรีย์แกรมบวกทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์มากกว่าแกรมลบและจุลินทรีย์พวกที่ต้องการอากาศ (aerobic species) ทนต่ออัลตร้าซาวน์มากกว่าพวกที่ไม่ต้องการอากาศ (anaerobic species) นอกจากนั้นพวกเซลล์ที่มีอายุอ่อนกว่า (young cells) จะทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์ได้ต่ำกว่าเซลล์ที่มีอายุแก่กว่าและพวกที่สร้างสปอร์ (sporulated microorganisms) ทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์มากกว่าเซลล์ปกติ (vegetative cells) มาก การทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์ของจุลินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวกลางแต่พบว่ามีรายงานการศึกษาเพียงเล็กน้อย

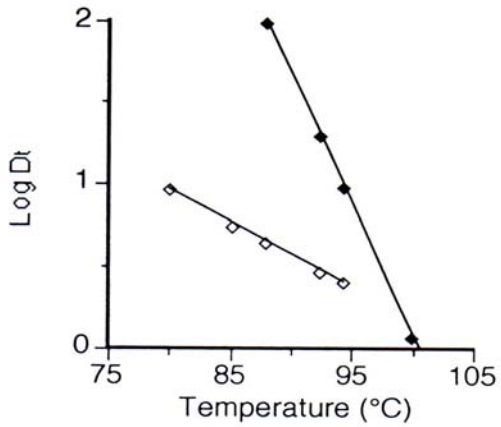
ผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อเอนไซม์และโปรตีน

Sala et al. (1995) รายงานว่ามีการรวบรวมผลการศึกษาในเรื่องผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อเอนไซม์และองค์ประกอบของอาหารอื่นๆ นั้นมีมานานแล้วโดยประมาณ 70 ปีที่ผ่านมา ซึ่งต่อมาในภายหลังพบว่าคลื่นอัลตร้าซาวน์สามารถทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) ขึ้นได้ ตัวอย่างเช่นพบว่าทำให้ความหนืดของสารละลายสตาร์ช (starch) กัมอะราบิก (gum arabic) เจลาติน (gelatin) และโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ชนิดอื่นๆ มีค่าลดลง หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโพลีเมอร์ของสตาร์ชและเด็กซ์แตรน (dextrans) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่โมเลกุลใหญ่ขึ้น รวมทั้งทำให้ DNA แตกสลายแต่ยังคงโครงสร้างขององค์ประกอบย่อยไว้ได้ เป็นต้น และในภายหลังยังค้นมีการพบว่าคลื่นอัลตร้าซาวน์นั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแก๊สที่ละลายหรือมีอยู่ในสารละลายที่นำมาสัมผัสกับคลื่น เช่นถ้าแทนที่แก๊สออกซิเจนด้วยไฮโดรเจน จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หลายชนิดเพิ่มขึ้นได้

ในส่วนของผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อโปรตีน พบว่ามีความซับซ้อนในการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสกับคลื่นอัลตร้าซาวน์ เช่นโพลีเมอร์ของโปรตีนทรงกลม (polymeric globular proteins) จะเกิดการแตกตัวทำให้มีขนาดเล็กลงเป็นหน่วยย่อย และถ้าในสารละลายตัวกลางนั้นมีแก๊สออกซิเจน อาจมีผลทำให้โครงสร้างจตุรภูมิ (quarternary structure) โดยอาจทำให้สูญเสียสภาพธรรมชาติได้ ในส่วนของไลโปโปรตีน (lipoprotein) คลื่นอัลตร้าซาวน์อาจทำให้ไขมันบางส่วนแยกออกจากโครงสร้าง (delipidation) และในฮีโมโปรตีน (haemoproteins) อาจทำให้เกิดการแยกตัวของฮีม (haeme) ออกจากโกลบิน (globin) และในกรณีที่สารละลายโปรตีนได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์เป็นเวลานานมากขึ้น อาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยสายโซ่โพลีเปบไทด์อาจแตกออกทำให้เกิดชิ้นส่วนของโมเลกุลย่อยที่มีขนาดเล็กลง เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์และจุลินทรีย์นั้นพบว่ามีการนำเทคนิคหรือกระบวนการอื่นๆมาใช้ร่วมกับการให้คลื่นอัลตร้าซาวน์ซึ่งมีรายงานการศึกษาที่แตกต่างกันออกไป

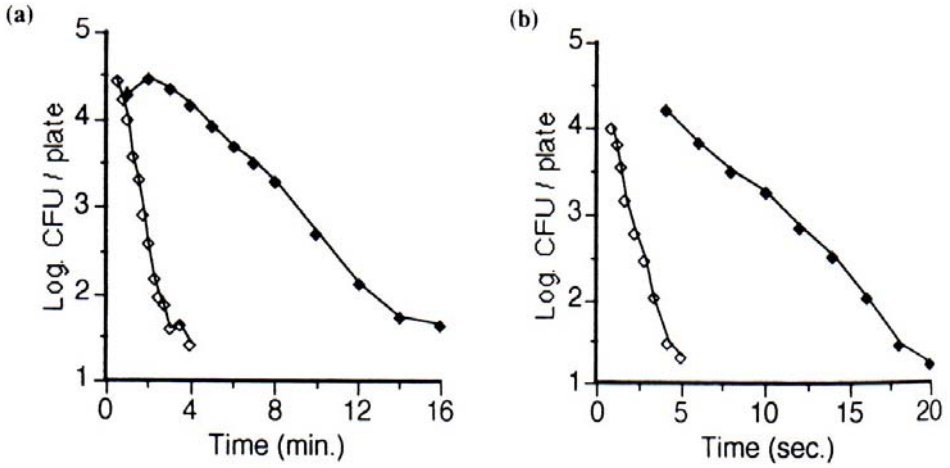
ผลของความร้อนและคลื่นอัลตร้าซาวน์ (Thermosonication) ต่อจุลินทรีย์

Sala et al. (1995) รายงานว่ามีการศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ร่วมกับกระบวนการให้ความร้อนในการทำลายจุลินทรีย์ไม่มากนัก โดยในระยะแรกเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง ค.ศ. 1930 – 1940 ได้มีการทดลองใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ภายใต้สภาวะแช่เย็น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลการทำลายเชื้อเนื่องจากความร้อน ซึ่งพบว่าผลการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน ในระยะต่อมา Burgos et al. (1972) ศึกษาผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อการทนความร้อนของสปอร์ของเชื้อ *Bacillus cereus* และ *Bacillus licheniformis* ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยพบว่าการให้คลื่นอัลตร้าซาวน์แก่สปอร์ของเชื้อดังกล่าวที่ 20 kHz ก่อนนำไปให้ความร้อน มีผลทำให้การทนต่อความร้อนของสปอร์ของเชื้อทั้งสองชนิดนี้ลดลง และต่อมา Ordonez et al. (1984) พบว่าการให้คลื่นอัลตร้าซาวน์พร้อมกับการให้ความร้อนมีผลในการทำลายจุลินทรีย์มากกว่าการให้คลื่นอัลตร้าซาวน์ก่อนและตามด้วยการให้ความร้อนภายหลัง ซึ่งเรียกกระบวนนี้ว่าเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชัน (thermoultrasonication) รายงานผลการศึกษาของเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อจุลินทรีย์บางชนิด เช่น Garcia et al. (1989) ศึกษาผลของเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวต่อสปอร์ของ *Bacillus subtilis* แสดงดังภาพที่ 4.11 โดยพบว่าสปอร์ของเชื้อที่ผ่านกระบวนการเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันจะทนต่อความร้อนได้น้อยลง



ภาพที่ 4.11 การทนความร้อนของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่ pH 7.0 เปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชัน (สี่เหลี่ยมทึบ) และการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (สี่เหลี่ยมขาว)
ที่มา : Garcia et al. (1989)

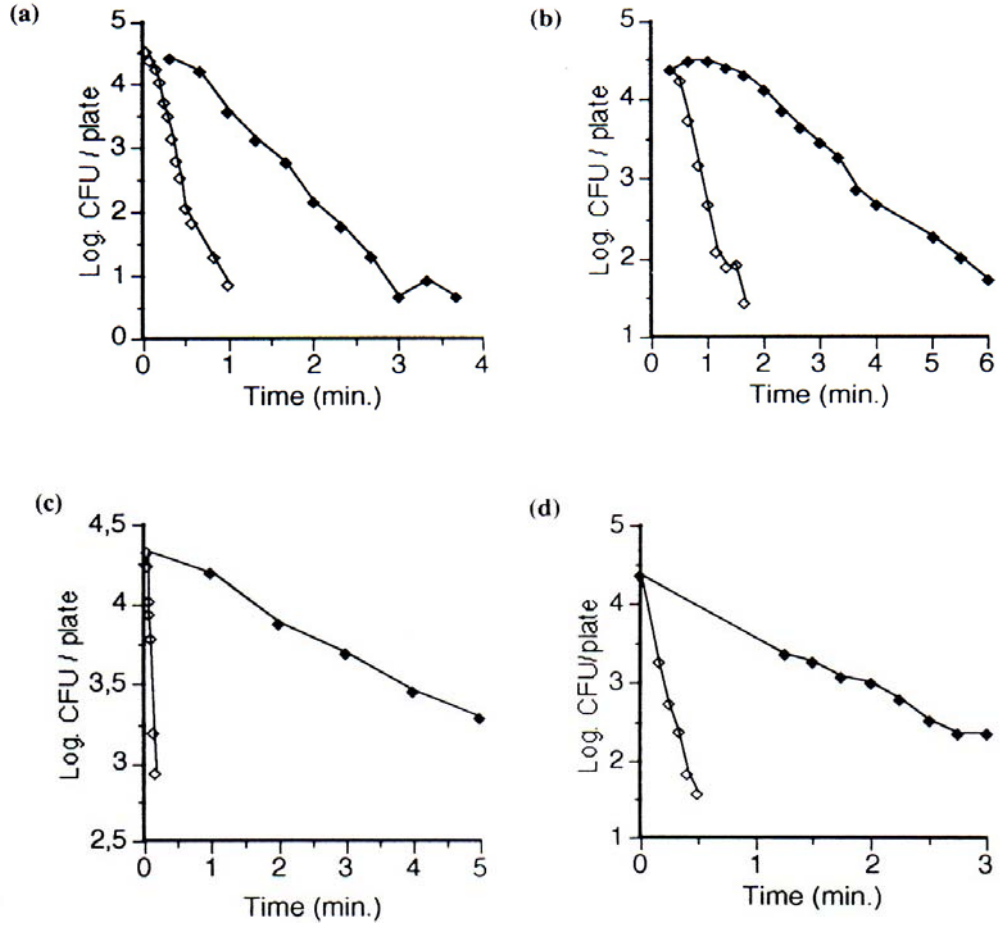
ในการศึกษาการใช้อัลตร้าซาวน์ร่วมกับความร้อนในระยะต่อมามีการให้ความดันร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ความดันไอ (vapour pressure) เพิ่มสูงขึ้นและเป็นผลให้ความหนืด (viscosity) ลดลง การเกิดแคปติเวชันจึงลดลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อคงประสิทธิภาพของการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ที่อุณหภูมิสูง จึงต้องกระทำภายใต้สภาวะให้ความดัน (Sala et al., 1995) โดยพบว่าการทดลองในระยะแรกๆ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และเรียกกระบวนการที่ใช้อัลตร้าซาวน์ร่วมกับความร้อนและความดันนี้ว่ามาโนเทอร์โมโซนิกเคชัน (mano-thermo-sonication process) การศึกษาผลของการทนต่อมาโนเทอร์โมโซนิกเคชันของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่ pH 7.0 โดยให้อุณหภูมิสูงระหว่าง 100 – 112 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.12 โดยพบว่ามาโนเทอร์โมโซนิกเคชันทำให้สปอร์ดังกล่าวทนความร้อนได้ลดลงเหลือประมาณหนึ่งในสิบเท่าของการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและยังพบว่าการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ร่วมกับอุณหภูมิสูงภายใต้ความดันยังคงมีประสิทธิภาพดีแม้ว่าอุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่าจุดเดือดของตัวกลางที่ใช้ก็ตาม



ภาพที่ 4.12 การรอดชีวิตของสปอร์ *Bacillus subtilis* ที่อุณหภูมิ 100 °C (a) และ 112 °C (b) (จุดสี่เหลี่ยมทึบเป็นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและจุดสี่เหลี่ยมขาวใช้กระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชัน)

ที่มา : Sala et al. (1995)

นอกจากนั้นยังมีการศึกษาผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ทั้งที่สร้างและไม่สร้างสปอร์ รวมทั้งเซลล์ปกติโดยพบว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อต่างๆ ได้ดีกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวเมื่อทดลองที่อุณหภูมิระดับเดียวกันดังภาพที่ 4.13

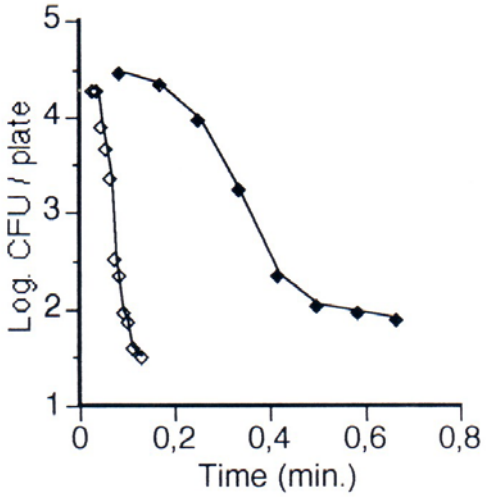


ภาพที่ 4.13 ผลของมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

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

ที่มา : Sala et al. (1995)

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันในการทำลายจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เพิ่มขึ้นระหว่าง 6 – 30 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อยีสต์ของกระบวนการนี้จะดีกว่าการทำลายสปอร์ ในส่วนของการทดลองศึกษากระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อจุลินทรีย์ในอาหาร เช่นน้ำนม แสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ผลของมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อ *Bacillus subtilis* ในน้ำนมเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (อุณหภูมิ104 °C) (จุดสี่เหลี่ยมทึบเป็นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและจุดสี่เหลี่ยมขาวใช้กระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชัน)
ที่มา : Sala et al. (1995)

จากภาพที่ 4.14 Sala et al. (1995) ได้รายงานว่าผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันนั้นไม่ใช่เป็นผลบวก (additive effect) แต่เป็นผลเสริมฤทธิ์ (synergistic effect) ซึ่งกันและกันและเนื่องจากจลนศาสตร์ (kinetics) ของการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เนื่องจากกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้ความร้อนจึงสามารถคำนวณหาเวลาในการทำลายจุลินทรีย์โดยใช้วิธีการเดียวกันได้

ผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อเอนไซม์

Sala et al. (1995) ศึกษาการผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อเอนไซม์บางชนิดได้แก่ ไลพอกซีจีเนส (lipoxygenase) เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase) และเอนไซม์โปรตีเอส (protease) และไลเปส (lipase) จาก *Pseudomonas fluorescens* โดยพบว่ากลไกการยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (first order kinetics) ในการทดลองผลของความร้อนต่อเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส พบว่าเส้นกราฟในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ต่อเวลาที่ได้จะมีลักษณะเป็นสองขั้น (biphasic course) กล่าวคือขั้นที่สองจะเกิดขึ้นเมื่อเอนไซม์ถูกทำลายกิจกรรมไปแล้วประมาณร้อยละ 70 โดยทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการปรากฏของไอโซไซม์ (isozymes) ซึ่งแต่ละชนิดมีความสามารถในการทนต่อความร้อนที่แตกต่างกัน โดยมีผู้รายงานว่า

อาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (aggregates) ของเอนไซม์ แต่จากการศึกษาผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อเอนไซม์ชนิดนี้พบว่ากราฟที่ได้จะไม่ปรากฏเป็นขั้น ซึ่งถ้าการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเอนไซม์แล้ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการที่คลื่นอัลตร้าซาวน์มีผลทำให้เอนไซม์ที่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวกระจายตัวออกจากกัน (Lopez et al., 1994) และ Sala et al. (1995) ได้รายงานว่าผลของกระบวนการมาโนเทอร์โมอัลตร้าโซนิกเคชันต่อเอนไซม์นั้นไม่ใช่เป็นผลบวก (additive effect) แต่เป็นผลเสริมฤทธิ์ (synergistic effect) ซึ่งกันและกันเช่นเดียวกันกับการยับยั้งจุลินทรีย์

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร

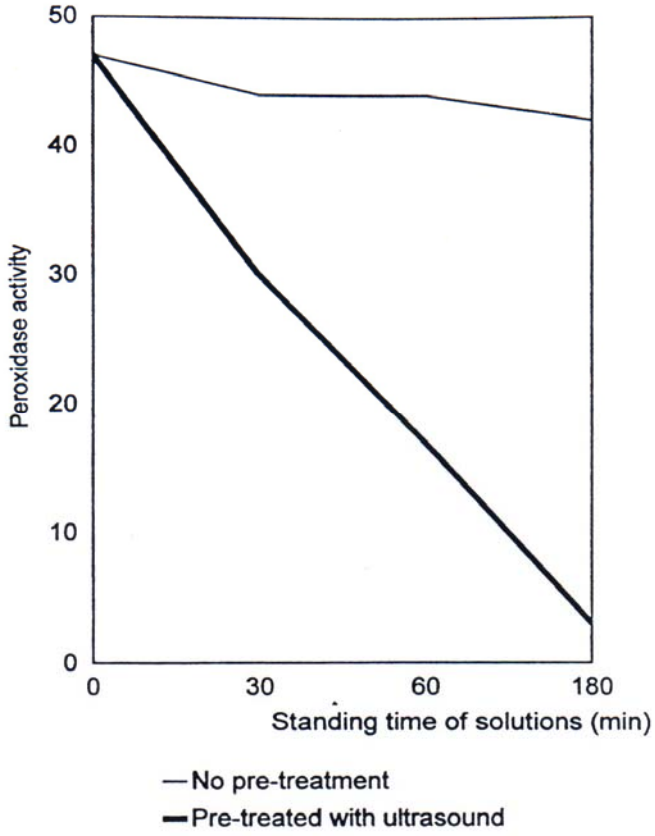
การนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้น มีความหลากหลายและแตกต่างกันไปตามชนิดหรือประเภทของอาหารและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ Mason (1998) รายงานการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหารโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process)

มีการนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่นปฏิกิริยาการบ่ม (aging) ของผลิตภัณฑ์หมัก เช่น ไวน์และสุรากลั่น โดยทำให้เกิดกลิ่นรสและรสชาติที่เฉพาะตัวในช่วงระยะเวลาการบ่มที่สั้นลง เช่นมีการศึกษาการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ขนาด 1 MHz แก่ผลิตภัณฑ์หมักดังกล่าว ซึ่งทำให้อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อเอสเทอร์เกิดความสมดุลและช่วยให้เกิดลักษณะปรากฏที่ดี และในส่วนของวิสกี้ (whisky) พบว่าช่วยลดเวลาในการบ่มให้ต่ำกว่า 1 ปีได้

2. ปฏิกิริยาเอนไซม์ (enzyme reactions)

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่ากิจกรรมเอนไซม์ต่างๆจะถูกยับยั้งได้เนื่องจากการเกิดแคปวิเตชัน ตัวอย่างเช่น มีการศึกษาการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ขนาด 20 kHz ที่กำลัง 371 $W.cm^{-2}$ แก่เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในผักและผลไม้สดและเป็นเอนไซม์ที่กระตุ้นให้เกิดรสชาติผิดปกติและทำให้เกิดสีน้ำตาล เมื่อให้คลื่นอัลตร้าซาวน์ขนาดดังกล่าวแก่เอนไซม์ในฟอสเฟสบัฟเฟอร์ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 20°ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์นี้ลดลง 90% แสดงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ผลของคลื่นอัลตร้าซาวน์ต่อกิจกรรมเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (เส้นหนาคือเอนไซม์ที่ให้คลื่นอัลตร้าซาวน์ขนาด 20 kHz ในฟอสเฟสบัฟเฟอร์ pH 7.0ที่อุณหภูมิ 20°ซ)

ที่มา : Mason (1998)

นอกจากนั้นยังมีรายการศึกษาการทนต่อคลื่นอัลตร้าซาวน์ของเอนไซม์ชนิดต่างๆ พบว่าสามารถเรียงลำดับความทนได้ดังนี้ ออกซิเดส (oxidase) < คะตะเลส (catalase) (ที่ความเข้มข้นต่ำ) < รีดักเตส (reductase) และอะมัยเลส (amylase)

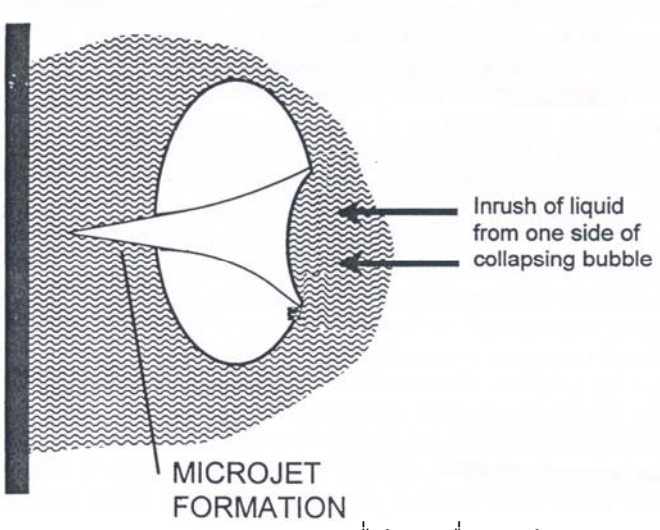
3. การกระตุ้นเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (stimulation of living cells)

มีรายงานการศึกษาการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยในการผลิตโยเกิร์ต โดยพบว่าสามารถลดเวลาในการผลิตลงถึง 40% และยังช่วยปรับปรุงลักษณะของโยเกิร์ต เช่นเนื้อสัมผัสให้ดีขึ้น นอกจากนั้นคลื่นอัลตร้าซาวน์ยังสามารถกระตุ้นการงอกของเมล็ดพืชได้ ทำให้ปริมาณผลผลิตในการผลิตขนาดใหญ่เพิ่มสูงขึ้น โดยคลื่นอัลตร้าซาวน์จะเหนี่ยวนำให้การงอกของเมล็ดเกิดได้รวดเร็วขึ้น รวมทั้งกระตุ้นให้รากงอกได้เร็วขึ้น เช่นในเมล็ดทานตะวันเมื่อ เมื่อทดลองให้คลื่นอัลตร้าซาวน์

พบว่าจะสามารถงอกในดินได้ดีกว่าเมล็ดที่ไม่ได้รับคลื่นถึง 3 เท่า หรือในมะเขือเทศซึ่งพบว่าเมล็ดของมะเขือเทศที่ได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์จะลดระยะเวลาการสุกได้เป็นระยะเวลาถึง 10 วัน

4. กระบวนการสเตอริไลเซชัน (sterilization)

มีการนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาใช้ในการทำความสะอาด โดยช่วยลดการปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิว (surface decontamination) เนื่องจากการเกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็ก (microjet) จากการที่ฟองอากาศเกิดการแตกและมีทิศทางพุ่งเข้าสู่พื้นผิวด้วยความเร็วสูง เป็นผลให้สิ่งสกปรกและแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่ที่บริเวณพื้นผิวหลุดออกแสดงดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 การแตกของฟองแก๊สในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิว

ที่มา : Mason (1998)

นอกจากนั้นยังสามารถใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในการทำลายแบคทีเรียที่ปนเปื้อนบนผิวของไข่โดยใช้ร่วมกับสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (bactericide) และคลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อด้วยสารเคมีเนื่องจากทำให้เซลล์แบคทีเรียที่เกาะกลุ่มกันอยู่เกิดการแตกกระจายเป็นผลให้สารเคมีสามารถสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น

5. การใช้อัลตร้าซาวน์ในการทำให้เกิดอิมัลชัน (ultrasonic emulsification)

คลื่นอัลตร้าซาวน์ทำให้อิมัลชันเสถียรขึ้น เนื่องจากการที่ฟองอากาศเกิดการแตกตรงบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟส (phase boundary) ของของเหลวสองชนิดที่เข้ากันไม่ได้ ซึ่งคลื่นกระแทกที่มีแรงดันสูงที่เกิดขึ้นจะทำให้การผสมและเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนั้นการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ใน

แบบที่เรียกว่าลิควิดวิซเทิล (liquid whistle) สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ไหลอย่างต่อเนื่อง (flow processing) และสามารถเชื่อมต่อกับระบบประมวลผลได้ ทำให้สามารถเพิ่มปริมาตรในการผลิตได้สูงถึง 12,000 ลิตรต่อชั่วโมง เช่นในการผลิตน้ำผลไม้ ซอสมะเขือเทศและมายองเนส เป็นต้น

6. การสกัด (extraction)

คลื่นอัลตร้าซาวน์จะช่วยทำให้ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในวัสดุที่นำมาสกัดได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นคลื่นอัลตร้าซาวน์ยังไปทำลายพื้นผิวที่บริเวณผนังเซลล์และภายในเซลล์ทำให้สารที่ต้องการสกัดสามารถออกมาได้ง่ายขึ้น ตัวอย่าง เช่นการสกัดน้ำตาลออกจากหัวบีท (sugar beets) การสกัดโปรตีนจากสาหร่ายและจากถั่วเหลืองที่สกัดไขมัน การสกัดสารในชาออกจากใบชาในการผลิตชาสำเร็จรูปละลายได้ทันที เป็นต้น

7. การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์กับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (meat products)

การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์จะช่วยสกัดสารพวกโปรตีนที่ละลายในน้ำเกลือที่อยู่ในเนื้อสัตว์ออกมาได้เพิ่มมากขึ้น โดยใช้ร่วมกับสารละลายเกลือ ซึ่งคลื่นอัลตร้าซาวน์จะไปทำลายโครงสร้างไมโอไฟบริล (myofibrils) ภายในเนื้อสัตว์ และทำให้สารละลายภายในเซลล์ไหลออกมา เป็นผลให้เนื้อสัตว์เกาะติดกันได้ดีขึ้น นอกจากนั้นคลื่นอัลตร้าซาวน์ยังทำให้เนื้อสัตว์มีความนุ่มเพิ่มขึ้น โดยมีผลทำลายเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissues) ทำให้มีปริมาณลดลง

8. การตกผลึก (crystallization)

คลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยในการก่อตัวของผลึกขณะเริ่มต้น (initiation of seeding) และช่วยในการขยายขนาดผลึก (crystal growth) โดยมีรายงานว่าคลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยเร่งอัตราการเกิดนิวเคลียส (the nucleation rate) และเร่งอัตราการขยายขนาดผลึกในสารละลายอิ่มตัว (saturated) หรือในอาหารหรือตัวกลางที่เย็นยิ่งยวด (supercooled medium) ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตยาและในผลไม้แช่เยือกแข็ง เช่น สตรอเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง โดยช่วยทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกของน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์ รวมทั้งทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์มีขนาดเล็กลงเป็นผลให้โอกาสในการทำลายเซลล์เนื่องจากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลงไปด้วย

9. การกำจัดแก๊สออกจากของเหลว (degassing of liquids)

การกำจัดแก๊สออกจากของเหลว เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาแคปวิเตชัน ซึ่งแก๊สที่ละลายอยู่ (dissolved gases) หรือฟองอากาศ (gas bubbles) ขนาดเล็กภายในสารละลายจะเปรียบเสมือนนิวเคลียสสำหรับการเกิดฟองแก๊สที่จะขยายขนาดเพิ่มขึ้น และเกิดการแตกออกเมื่อได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์ เป็นผลให้ฟองอากาศที่อยู่ภายในของเหลวรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่บริเวณพื้นผิวและหลุดออกไป เช่นการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์กับของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น ชอคโกแลต ทำให้ลดการเกิดฟองอากาศภายในผลิตภัณฑ์ได้

10. การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยในการกรอง (acoustically aided filtration)

คลื่นอัลตร้าซาวน์ช่วยทำให้อัตราการกรองของของเหลวเพิ่มขึ้น โดยทำให้เกิดผลที่สำคัญต่อการกรองสองประการได้แก่ ทำให้เกิดการรวมตัวกัน (agglomeration) ของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (fine particles) ทำให้การกรองเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และอีกประการหนึ่งคือคลื่นอัลตร้าซาวน์จะให้พลังงานบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการสั่นของวัตถุ (vibration energy) แก่ของเหลว มีผลทำให้อนุภาคบางส่วนยังคงแขวนลอยอยู่ได้และทำให้สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในการช่วยการกรองน้ำแอปเปิ้ล ทำให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น

11. การทำแห้ง (acoustic drying)

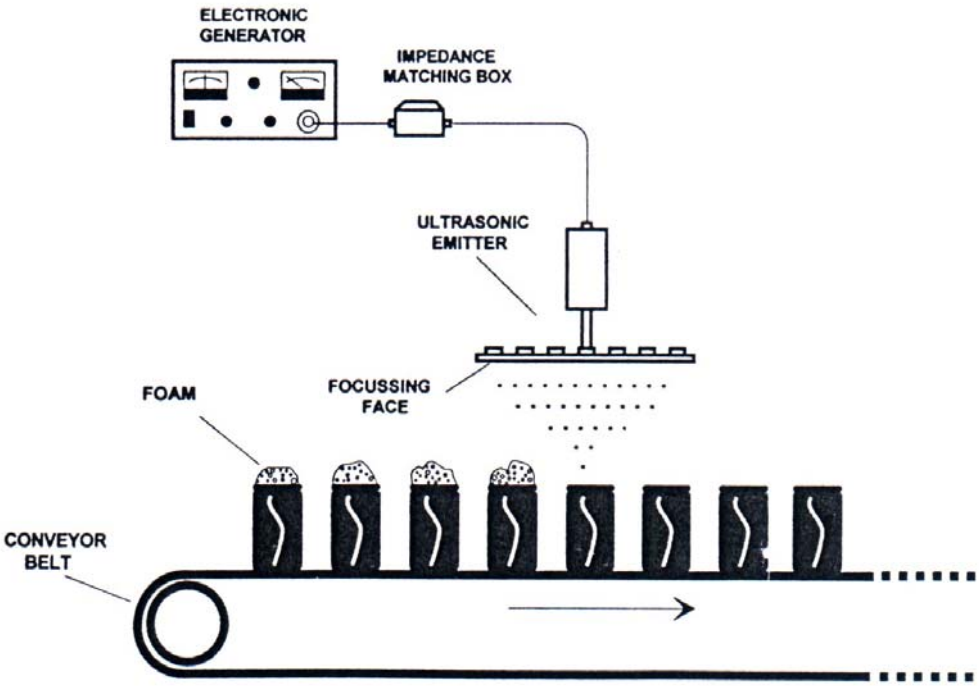
การใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ร่วมกับกระบวนการทำแห้ง จะทำให้สามารถลดอุณหภูมิการทำแห้งลงได้ และทำให้ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันหรือการสลายตัว (degradation) ของสารลดลง มีการศึกษาหลากหลายเกี่ยวกับการนำคลื่นอัลตร้าซาวน์มาใช้ร่วมกับกระบวนการทำแห้งในการผลิตอาหารประเภทต่างๆ และมีการสภาวะที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดแคปวิเตชันทำให้โครงสร้างของวัตถุดิบถูกทำลาย ทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 30 – 60%

12. ผลต่อเมล็ดข้าว (effects on rice grains)

มีการศึกษาการให้คลื่นอัลตร้าซาวน์แก่เมล็ดข้าวในน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้สตาร์ชออกมาจากเมล็ดข้าวได้รวดเร็วขึ้นในระหว่างการหุง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชันตรงบริเวณพื้นผิวของข้าวทำให้เกิดการทำลายผนังชั้นนอกของเมล็ดข้าว เป็นผลให้ลดระยะเวลาในการหุงต้มและเวลาในการเกิดเจลสั้นลง

13. การกำจัดโฟม (defoaming)

Gallego-Juarez (1998) รายงานว่าโฟมคือฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของแก๊สภายในของเหลวซึ่งมีระยะห่างฟองแก๊สแต่ละฟองน้อยมาก ซึ่งในระบบของโฟมนั้นพบว่าอัตราส่วนของปริมาตรอากาศหรือแก๊สและของเหลวมีค่าสูงมากและค่า bulk density ของโฟมมีค่าใกล้เคียงกับแก๊ส วิธีการดั้งเดิมในการกำจัดโฟมคือการใช้ความร้อน สารเคมี ใช้กระแสไฟฟ้าและใช้แรงกล ซึ่งมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปการบรรจุของเหลวที่มีโฟมล้นออกมาจากภาชนะบรรจุหลังจากเติมลงไปและนำไปปิดผนึกทันที จะทำให้ปริมาตรของของเหลวในภาชนะบรรจุลดลง การกำจัดโฟมที่ล้นเกินออกมาจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ในการใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์เพื่อกำจัดโฟมที่ล้นออกมาแสดงดังภาพที่ 4.17 โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการทำลายโฟมด้วยวิธีอื่นๆ และสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 4.17 การกำจัดโฟมโดยใช้คลื่นอัลตร้าซาวน์ในกระบวนการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง

ที่มา : Gallego-Juarez (1998)

เอกสารอ้างอิง

สิทธิกร จำเริญลาภกุล. 2528. อุลตร้าโซนิก. วิทยาศาสตร์การอาหาร 16(2) : 1-6.

Atchley, A. A. and L. A. Crum. 1998. Acoustic cavitation and bubbles dynamics. pp. 1- 64. *In* " Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects". K. S. Suslick (ed.). VCH Publishers, Inc. New York.

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.

Dewhurst, E., D. M. Rawson and G. C. Steele. 1986. The use of a model system to compare the efficiency of ultrasound and agitation in the recovery of *Bacillus cereus* spores from polymer surfaces. J. Appl. Bacteriol. 61 : 357-363.

FDA. 2000. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies. http://vm.cfscan.fda.gov/~comm/ift-toc.html. สืบค้นเมื่อ 23 พค. 2548.

Floros, J. D. and Liang, H. 1994. Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials. Food. Technol. 48(12) : 79-84.

Frizzell, L. A. 1988. Biological effects of acoustic cavitation. pp. 287- 303. *In* " Ultrasounds, its chemical, physical and biological effects". K. S. Suslick (ed.). VCH Publishers, Inc. New York.

Gallego-Juarez, J. A. 1998. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. pp. 127 – 143. *In* "" Ultrasound in Food Processing". Povey, M. J. W. and Mason, T. J. (eds.). Blackie Academic & Professional, London.

Garcia, M. L., J. Burgos, B. Sanz and J. A. Ordonez. 1989. Effect of heat and ultrasonic waves on the survival of two strains of *Bacillus subtilis*. J. Appl. Bacteriol. 67 : 619-628.

Gennaro, L. D. , Cavella, S. , Romano, R. and Masi, P. 1999. The use of ultrasound in food technology I : inactivation of peroxidase by thermosonication. J. Food. Eng. 39 : 401 – 407.

Harvey, E. and A. Loomis. 1929. The destruction of luminous bacteria by high frequency sound waves. J. Bacteriol.17 : 373-379.

Hoover, D. G. 2000. Ultrasound. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies. J. Food Sci. Supplement. 93-95.

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.

Mason, T. J. 1998. Power ultrasound in food processing – the way forward. pp. 105-126. *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.

McClements, D. J. 1995. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. Trends in Food Sci. & Technol. 6 : 293-299.

McClements, D. J. 1997. Ultrasonic characterization of foods and drinks : principles, methods and application. Crit. Rev. Food Sci. & Technol. 37(1) : 1-46.

Mett, H., B. Schacher, and L. Wegman. 1988. Ultrasonic disintegration of bacteria may lead to irreversible inactivation of lactamase. J. Antimicr. Chemotherapy 22: 292-298.

Mizrach, A. , Galili, N. and Rosenhouse, G. 1994. Determining quality of fresh products by ultrasonic excitation. Food Technol. 48 : 68-71.

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 thermoduric *streptococci*. J. Appl. Bacteriol. 56 : 175 -177.

Piyasena, P. , Mohereb, E. and Mckeller, R. C. 2003. Inactivation of microbes using ultrasound : a review. Int. J. Food Microbiol. 2726 : 1-10.

Povey, M. J. W. 1989. Ultrasonics in Food Engineering. Part II : Applications. J. Food Eng. 9 : 1 – 20.

Povey, M. J. W. and Mason, T. J. 1998. Ultrasound in Food Processing. Blackie Academic & Professional, London. 282 p.

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.

Sherba, G., R. M. Weigel and J. R. O' Brien. 1991. Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy. Appl. Environ. Microbiol. 57 : 2079-2084.

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. Callely 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.