บทที่ 2
เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำผึ้ง

น้ำผึ้ง เป็นน้ำหวานที่ผึ้งเก็บมาจากต่อมน้ำหวานของดอกไม้โดยผึ้งจะกลืนน้ำหวานลงสู่กระเพาะ ซึ่งภายในกระเพาะจะมีเอนไซม์ช่วยย่อยน้ำหวานจากนั้นจะนำไปเก็บไว้ในหลอดรวงผึ้ง น้ำผึ้งจะบ่มตัวเองโดยการระเหยน้ำออกไปจนกระทั่งน้ำผึ้งมีปริมาณน้ำเข้มข้นขึ้นในระดับที่เหมาะสมกับการเก็บรักษา ผึ้งงานก็จะปิดฝาหลอดรวงผึ้ง เรียก น้ำผึ้งสุก เป็นน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐาน คือมีน้ำอยู่ไม่เกินร้อยละ 20-21 (มอก., 2526) นอกจากนี้ มอก. และ Codex ยังกำหนดมาตรฐานทางเคมีอื่นๆของน้ำผึ้งไว้ดังตารางที่ 2.1 น้ำผึ้งมีลักษณะเป็นของเหลวค่อนข้างข้น มีสีเหลืองจนถึงน้ำตาลเข้ม น้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดหลัก คือ กลูโคส และฟรักโทส (สุกัลยา, 2550)

น้ำผึ้งป่ามีความแตกต่างจากน้ำผึ้งที่ได้จากผึ้งเลี้ยง คือน้ำผึ้งป่าไม่สามารถจำแนกสัดส่วนของน้ำหวานจากดอกไม้หลายๆชนิดได้ ในขณะที่ผึ้งเลี้ยงสามารถบอกได้ทันทีว่าเป็นน้ำผึ้งจากดอกของพืชชนิดใด เนื่องจากทราบว่าผู้เลี้ยงผึ้งวางรังผึ้งไว้ตามระยะเวลาการบานของดอกไม้ชนิดใดอย่างเจาะจง เช่น ดอกทานตะวัน ลิ้นจี่ ลำไย นุ่น หรือยางพารา ซึ่งฤดูการนี้ภาษาผึ้งเรียกว่า ฤดูน้ำหวานไหลนอง หรือ Honey Flour ดังนั้น น้ำผึ้งจึงมีลักษณะ กลิ่น สี รส แตกต่างกันไปตามลักษณะของดอกไม้ที่ผึ้งงานไปเก็บมา แล้วผ่านกระบวนการภายในรังผึ้งจนมีความชื้นเหลือประมาณร้อยละ 17-20 น้ำผึ้งเป็นของเหลวแขวนลอยอยู่ในขวด มีลักษณะโปร่งแสง ในบางครั้งน้ำผึ้งที่ได้จากดอกไม้บางชนิด เช่น ทานตะวัน ยางพารา ซึ่งเป็นน้ำผึ้งที่ดี เมื่อเก็บไว้ได้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือถูกเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำนานๆอาจเกิดตะกอนซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกขึ้นได้ ทำให้ผู้บริโภคเข้าใจว่าเป็นน้ำผึ้งปลอม ผลึกน้ำผึ้งที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขให้คืนสภาพเดิมได้ โดยการนำภาชนะบรรจุน้ำผึ้งที่ตกผลึกแช่ลงในน้ำร้อนอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินกว่านี้จะทำให้สารอินฮิบิน และสารอื่นๆ ที่มีในน้ำผึ้งสูญเสียไป (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานทางเคมีของน้ำผึ้ง

คุณลักษณะทางเคมี	เกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน มอก.	เกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน CODEX
1. น้ำตาลรีดิวซ์ คิดเป็นน้ำตาลอินเวิร์ท ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	65	65
2. ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	21	21
3. ซูโครส ร้อยละไม่เกิน	5	5
4. สารที่ไม่ละลายน้ำ ร้อยละ ไม่เกิน	0.1	0.1
5. เถ้า ร้อยละ ไม่เกิน	0.6	0.6
6. ความเป็นกรด มิลลิอีควิวาเลนต์ของกรด ต่อ 1000 กรัม ไม่เกิน	40	40
7. ค่าไดแอสเทส แอคทิวิตี (diastase activity) และปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล		
7.1 ค่าไดแอสเทส แอคทิวิตี ต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	8 40	3 80
7.2 ค่าไดแอสเทส แอคทิวิตี ต้องไม่น้อยกว่า เมื่อปริมาณ ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	3 15	- -

ที่มา: มอก. (2526) และ Codex Alimentarius (2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณสารอาหารในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งมีคุณค่าทางโภชนาการที่หลากหลาย แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้ง		
คุณค่าทางโภชนาการ ต่อ 100 กรัม (3.5 ออนซ์) พลังงาน 1270 กิโลจูล (300 กิโลแคลอรี่)		
คาร์โบไฮเดรต	82.4	กรัม
น้ำตาล	82.12	กรัม
ใยอาหาร	0.2	กรัม
ไขมัน	0	กรัม
โปรตีน	0.3	กรัม
น้ำ	17.10	กรัม
ไรโบฟลาวิน (วิตามินบี 2)	0.0038	มิลลิกรัม
ไนอะซิน (วิตามินบี 3)	0.121	มิลลิกรัม
กรดแพนโททานิก (วิตามินบี 5)	0.068	มิลลิกรัม
ไพริดอกซิน (วิตามินบี 6)	0.024	มิลลิกรัม
โฟเลต (วิตามินบี 9)	2	ไมโครกรัม
วิตามินซี	0.5	มิลลิกรัม
แคลเซียม	6	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.42	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	2	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	4	มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	52	มิลลิกรัม
โซเดียม	4	มิลลิกรัม
สังกะสี	0.22	มิลลิกรัม

ที่มา: USDA (2008)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1.) น้ำตาล

มากกว่าร้อยละ 80 ในส่วนของแข็งของน้ำผึ้งคือคาร์โบไฮเดรต โดยองค์ประกอบหลักได้แก่พวกฟรักโทสและกลูโคส (ตารางที่ 2.2) ซึ่งน้ำผึ้งเกือบทุกชนิดจะมีฟรักโทสเป็นองค์ประกอบหลัก จะมีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่พบว่ามีสัดส่วนของกลูโคสสูงกว่าฟรักโทส (White, 1979) โดยองค์ประกอบของน้ำตาลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดอกไม้ สภาวะอากาศและพื้นที่ที่ผึ้งดูดน้ำหวานมา (Zamora and Chirife, 2006)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในน้ำผึ้ง 1 ช้อนโต๊ะ (15 มิลลิลิตร หรือ 21 กรัม)

องค์ประกอบ	ปริมาณโดยเฉลี่ย (ร้อยละ)
คาร์โบไฮเดรต (โดยรวม)	17.64 กรัม
- ฟรักโทส	8.16 กรัม
- กลูโคส	6.57 กรัม
- มอลโทส	1.53 กรัม
- ซูโครส	0.23 กรัม
- อื่นๆ	0.88 กรัม

ที่มา : The Board Nation Honey (2007)

น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำผึ้งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นองค์ประกอบทางธรรมชาติที่ได้จากต่อมน้ำหวานของพืชหรือเป็นส่วนผสมของน้ำหวานที่แมลงจำพวกเพลี้ยปล่อยออกมาหลังจากที่ดูดกินน้ำเลี้ยงจากพืช ส่วนน้ำหวานหรือน้ำเชื่อมที่ได้จากการเอาน้ำตาลทราย น้ำตาลปีป น้ำตาลปึกหรือน้ำตาลสังเคราะห์อื่นๆไปละลายน้ำแล้วให้ผึ้งกิน มักไม่เป็นที่ยอมรับว่าเป็นส่วนผสมของน้ำผึ้งโดยธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีข้อกำหนดว่าจะต้องมีซูโครสได้เพียงไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำผึ้งที่มีปริมาณซูโครสสูงกว่านี้จะถือว่าเป็นน้ำผึ้งผสม หรือน้ำผึ้งเทียม (มอก., 2526; Codex Alimentarius, 2001)

2.) ความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อคุณภาพของน้ำผึ้ง เนื่องจากปริมาณความชื้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพที่ดีและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Abramovic *et al*., 2007) โดยความชื้นที่เหมาะสมของน้ำผึ้งควรน้อยกว่าร้อยละ 21 (มอก., 2526; Codex Alimentarius, 2001) และถ้าปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งยิ่งมากคุณภาพของน้ำผึ้งยิ่งลดลง ดังนั้นความเชื่อที่ว่าน้ำผึ้งที่ดี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ที่สุดคือน้ำผึ้งเดือน 5 เนื่องจากเป็นหน้าแล้งที่ฝนยังไม่ตก และเป็นช่วงที่ดอกไม้หลายชนิดกำลังบาน น้ำผึ้งที่ได้จึงเป็นน้ำผึ้งเกรดเอเนื่องจากมีความชื้นน้อย (บุเรศ, 2528)

3.) ค่าวอเทอร์แอกทิวิตี (a_w)

ค่าวอเทอร์แอกทิวิตี คือความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของน้ำในอาหารและความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิเดียวกันโดยค่าวอเทอร์แอกทิวิตี ของน้ำบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 1 แต่เมื่อน้ำก่อพันธะกับสารอื่น (หรือเมื่ออยู่ในอาหาร) ความดันไอของน้ำในอาหารจะมีค่าน้อยกว่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ เป็นสาเหตุให้ค่าวอเทอร์แอกทิวิตี น้อยกว่า 1 ค่าวอเทอร์แอกทิวิตี เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร โดยออสโมฟิลิคยีสต์เป็นจุลินทรีย์ที่พบได้ในอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง สามารถเจริญได้หากมีค่าวอเทอร์แอกทิวิตี สูงกว่า 0.6 ซึ่งค่าวอเทอร์แอกทิวิตี ของน้ำผึ้งจะอยู่ในช่วง 0.5-0.65 ดังนั้นในบางครั้งจะพบว่าน้ำผึ้งจะเกิดการเสื่อมเสียได้จากการหมักของออสโมฟิลิคยีสต์ (Gleiter, 2006)

4.) เอนไซม์ในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งมีเอนไซม์ประกอบอยู่หลายชนิด เอนไซม์สำคัญที่สุดที่พบในน้ำผึ้ง คือ อินเวอร์เทส มีหน้าที่เปลี่ยนซูโครสในน้ำหวานเป็นน้ำตาลอินเวิร์ท ได้แก่ กลูโคส และ ฟรักโทส ส่วนไดแอสเทส หรือ อะไมเลส จะทำหน้าที่ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล และคะตะเลส (catalase) ซึ่งเปลี่ยนเพอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำและออกซิเจน นอกจากนั้น กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) ยังทำหน้าที่เปลี่ยนกลูโคสเป็นกลูโคโนแลกโตน และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งเชื่อว่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทำหน้าที่ยับยั้งการเจริญและทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ (The National Honey Board, 2007) ไดแอสเทสสามารถใช้ประเมินร่วมกับปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัลได้ว่าน้ำผึ้งนั้นเคยผ่านความร้อนหรือไม่ (Belitz and Grosch, 1999) ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าไดแอสเทสแอคทิวิตี และปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล ไว้ในมาตรฐานน้ำผึ้ง ดังตารางที่ 2.1

5.) กรด

กรดในน้ำผึ้งมีหลายชนิด แต่ที่สำคัญคือกรดกลูโคนิก ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส นอกจากนั้นยังพบกรดชนิดอื่นๆ แต่มีอยู่ในปริมาณน้อย เช่น กรดแอซีติก กรดบิวทีริก กรดแลคติก กรดซิตริก กรดฟอร์มิก กรดมาลิก และกรดออกซาลิก เป็นต้น (Belitz and Grosch, 1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

6.) กรดอะมิโน

น้ำผึ้งประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ซึ่งกรดอะมิโนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโปรตีน กรดอะมิโนพบได้ในเกสรดอกไม้ที่ผึ้งไปดูดน้ำหวานมา ซึ่งตัวอย่างกรดอะมิโนที่มีในน้ำผึ้งแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 กรดอะมิโนที่พบในน้ำผึ้ง

กรดอะมิโน	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำผึ้ง (น้ำหนักฐานแห้ง)
กรดแอสพาร์ติก (Asp)	3.44
แอสพาราจีน (Asn) และ กลูตามีน (Gln)	11.64
กรดกลูตามิก (Glu)	2.94
โพรลีน (Pro)	59.65
ไกลซีน (Gly)	0.68
อะลานีน (Ala)	2.07
ซิสเตอีน (Cys)	0.47
วาลีน (Val)	2.00
เมไทโอนีน (Met)	0.33
ไอโซลูซีน (Ile)	1.12
ลูซีน (Leu)	1.03
ไทโรซีน (Try)	2.58
ฟีนิลอะลานีน (Phe)	14.75
บีต้า-อะลานีน (β-Ala)	1.06
แกรมมา-อะมิโนบิวทีริก (γ-Abu)	2.15
ไลซีน (Lys)	0.99
ออนิทีน (Orn)	0.26
ฮีสติดีน (His)	3.84
ทริฟโตเฟน (Trp)	3.84
อาร์จินีน (Arg)	1.72
กรดอะมิโนที่ไม่สามารถระบุชนิดได้	24.53
รวมทั้งหมด	118.77

ที่มา: Belitz and Grosch (1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

7.) วิตามินและ แร่ธาตุ

ในน้ำผึ้งมีวิตามินอยู่หลายชนิด เช่น วิตามินบี2 บี3 บี6 และวิตามินซี เป็นต้น โดยปริมาณวิตามินที่พบจะแตกต่างกันไปตามที่มาของน้ำผึ้ง ส่วนแร่ธาตุที่พบในน้ำผึ้ง เช่น แคลเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ปริมาณแร่ธาตุเหล่านี้แม้จะมีปริมาณไม่มาก แต่ก็อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม การเติมน้ำผึ้งแทนน้ำตาลในอาหารชนิดต่างๆจึงช่วยเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นในร่างกายได้

8.) อินฮิบิน (inhibine)

อินฮิบิน คือ สารที่มีสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรค คนในสมัยโบราณนิยมใช้น้ำผึ้งในการรักษาบาดแผลและแก้อาการอักเสบ ซึ่งได้ผลเพราะน้ำผึ้งมีสารอินฮิบินเป็นองค์ประกอบ น้ำผึ้งยังมีสรรพคุณในทางยาหลายประการ เช่น แก้ท้องเดิน ช่วยเร่งลำไส้ที่อักเสบให้มีอาการฟื้นตัวเร็วขึ้น แก้ช่องคลอดอักเสบจากเชื้อรา (เชื้อแคนดิดา) บำรุงร่างกาย บรรเทาอาการไอ หลอดลมอักเสบ มีเสมหะ ท้องอืด ท้องเฟ้อ ท้องผูก ท้องเสียรุนแรง กล้ามเนื้อเป็นตะคริว ใช้ปิดบริเวณบาดแผลช่วยให้เกิดเนื้อเยื่อใหม่ได้เร็วขึ้น โรคกระเพาะ ฯลฯ นอกจากนั้นยังมีนักวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณประโยชน์ของน้ำผึ้งด้านอื่นๆ อีกมากมาย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

9.) สารต้านอนุมูลอิสระ

น้ำผึ้งประกอบด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด ได้แก่ สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (chrysin pinocembrin, pinobanksin, quercetin, kaempferol, luteolin, galangin, apigenin, hesperetin และ myricetin) สารกลุ่มฟีโนลิก (caffeic coumaric ferrulic ellagic chlorogenic) กรดแอสคอร์บิก คะตะเลส เพอร์ออกซิเดส แคโรทีนอยด์ และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Gheldof and Engeseth, 2002; Turkmen *et al.*, 2005; Gheldof, Wang and Engeseth, 2004) มีรายงานการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อสารต้านอนุมูลอิสระและสีของน้ำผึ้ง โดยทดลองให้ความร้อนแก่น้ำผึ้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อสุขภาพของมนุษย์ แต่พบว่าสีของน้ำผึ้งนั้นจะเข้มขึ้นทำให้ไม่เป็นที่พอใจของผู้บริโภค (Turkmen *et al*., 2005)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งประกอบด้วยสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ดังนี้

1.) สมบัติด้านการไหล

น้ำผึ้งส่วนใหญ่จะมีการไหลแบบ Newtonian ดังนั้นความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน แต่ก็ยังมีน้ำผึ้งบางชนิดที่มีสมบัติการไหลแบบ thixotropic เช่น น้ำผึ้ง manuka จากประเทศนิวซีแลนด์ โดยปริมาณโปรตีน และมวลโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรต จะมีผลต่อสมบัติการไหล (The National Honey Board, 2007)

2.) ความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำผึ้งขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำหวานที่ผึ้งนำมาผลิตเป็นน้ำผึ้ง ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำผึ้ง เช่น น้ำผึ้งที่มีความชื้นร้อยละ 15 และ 18 จะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ 1.435 และ 1.417 ตามลำดับ (The National Honey Board, 2007)

3.) ค่าความหนืด

ค่าความหนืดเป็นลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสที่สำคัญอย่างหนึ่ง ที่สามารถแสดงถึงคุณลักษณะของน้ำผึ้ง น้ำผึ้งเป็นของเหลวที่มีการไหลเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newtonian fluid) Sopade *et al*. (2002) และ Yanniotis *et al*. (2006) พบว่าค่าความหนืดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น ผลึก สารแขวนลอยในน้ำผึ้ง และชนิดของน้ำผึ้งด้วย โดยความหนืดของน้ำผึ้งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และเมื่อมีความชื้นสูงความหนืดจะมีค่าต่ำลง ดังนั้นค่าความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (ความเร็วที่ใช้วัด) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 นอกจากนี้ค่าความหนืดของน้ำผึ้งยังแปรผันตามปริมาณของแข็งในน้ำผึ้ง เมื่อมีของแข็งมากย่อมมีแรงต้านทานการไหลมาก ส่งผลให้มีค่าความหนืดมาก (The National Honey Board, 2007)

ตารางที่ 2.5 ความหนืดของน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่างๆที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 16.1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (cP)
13.7	6000
29.0	6840
39.4	2140
48.1	1070
71.1	260

ที่มา : The National Honey Board (2007)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.6 ความหนืดของน้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นต่างกัน วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ความหนืด (cP)
15.5	13800
17.1	6900
18.2	4810
19.1	3490
20.2	2040

ที่มา : The National Honey Board (2007)

2.1.3 สมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์

งานวิจัยในหลายประเทศยืนยันว่าน้ำผึ้งมีสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ได้ น้ำผึ้งที่มีสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีคล้ายกันนั้น มักเป็นน้ำผึ้งจากแหล่งที่มีภูมิประเทศใกล้เคียงกัน และยังพบว่าน้ำผึ้งที่ได้จากน้ำหวานของดอกไม้บางชนิดเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์ได้สูง (Bogdanov, 1997) น้ำผึ้งที่ได้จากแหล่งที่มาแตกต่างกันมีผลต่อการต้านจุลินทรีย์แตกต่างกัน และการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์โดยน้ำผึ้งก็ยังขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ด้วยเช่นกัน (ชลดา, 2547)

ปัจจัยที่มีผลต่อการต้านจุลินทรีย์ของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งมีสมบัติ 4 ประการ ในการเป็นสารต้านแบคทีเรีย

1. ความเป็นกรดด่าง เนื่องจากน้ำผึ้งมีความเป็นกรดด่าง เท่ากับ 3.2-4.5 ซึ่งส่งผลให้สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้หลายชนิด จุลิทรีย์ที่พบในบาดแผลส่วนใหญ่สามารถเจริญได้ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 7.2-7.4 ดังนั้นน้ำผึ้งที่ไม่ได้เจือจางจึงสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในบาดแผลเหล่านี้ได้ (Russell *et al.*, 1988)
2. ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงมาก (hyperosmosis) จึงสามารถดึงดูดน้ำออกจากเซลล์แบคทีเรียได้ น้ำผึ้งเป็นของเหลวที่อิ่มตัวด้วยน้ำตาลโดยมีองค์ประกอบของน้ำตาลสูงถึงร้อยละ 84 ซึ่งมีกลูโคสและฟรักโทสเป็นองค์ประกอบหลัก มีน้ำเป็นองค์ประกอบเพียงร้อยละ 15-21 โดยน้ำหนัก เป็นผลให้ค่าวอเทอร์แอกทิวิตีต่ำ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.56-0.62 ทำให้จุลินทรีย์โดยทั่วไปไม่สามารถเจริญในน้ำผึ้งที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 17.1 ได้ มีเพียงออสโมฟิลิคยีสต์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถทนแรงออสโมติคได้สูงเท่านั้น ที่สามารถเจริญได้ในน้ำผึ้งที่มีความชื้นค่อนข้างสูง (Molan, 1992)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. ความสามารถในการเกิดสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ซึ่งมีฤทธิ์ในการฆ่าแบคทีเรีย สารนี้เกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นสารที่ผลิตโดยเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสในน้ำผึ้ง โดยเอนไซม์ชนิดนี้หลั่งออกมาจากต่อม hypopharygneal ของผึ้ง ทำหน้าที่เปลี่ยนกลูโคสเป็นกลูโคโนแลกโตน และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อป้องกันการเน่าเสียของน้ำผึ้งในช่วงการสะสมน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่มีความเข้มข้นมากจะพบว่ามีปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์น้อย เนื่องจากสารดังกล่าวสลายตัวได้ง่าย (Molan, 1992)
4. โฟโตเคมิคัล เป็นสารที่มีสมบัติต้านจุลินทรีย์ที่พบอยู่ในน้ำผึ้ง สารฟีนอลิคที่พบอยู่ในน้ำผึ้ง ได้แก่ pinocembrin chrysin pinobanskin acacetin quercetin และ kaemferol เป็นต้น โดยสาร pinocembrin สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด (Bogdanov, 1997)

2.1.4 ประโยชน์ของน้ำผึ้งในด้านต่างๆ

น้ำผึ้งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอาหารมากมายหลายชนิด ซึ่งนอกจากจะให้คุณค่าทางโภชนาการแล้วยังมีสมบัติทางยาต่อผู้บริโภคอีกด้วย ในระดับครัวเรือนมักใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารอย่างแพร่หลาย ส่วนในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำผึ้งถูกใช้ในการผลิตขนมอบต่างๆ ผลิตภัณฑ์อาหารเช้า ลูกกวาด มาร์มาเลด แยม ขนมปัง เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์นม ไอศกรีม ดังแสดงในตารางที่ 2.7 รวมถึงการนำไปใช้ในด้านการถนอมอาหารด้วย

ตารางที่ 2.7 การใช้น้ำผึ้งในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์ของการใช้น้ำผึ้ง
1. อาหาร	ใช้เป็นอาหารโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแปรรูป
2. ส่วนผสมของอาหาร	เป็นสารเพิ่มความหวาน เนื่องจากเป็นสารให้ความหวานที่ได้จากธรรมชาติ
- ผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ	
- ผลิตภัณฑ์ขนมอบ	ใช้น้ำผึ้งเป็นส่วนประกอบจะให้ลักษณะของเนื้อสัมผัส สี และกลิ่นรสที่ดี และช่วยรักษาความชื้นให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้แห้งช้า
- ผลิตภัณฑ์ลูกกวาด ขนมหวาน	ใช้ในขบวนการผลิตคาราเมลที่มีลักษณะนุ่มที่ผิวนอก และทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
- ผลิตภัณฑ์ธัญพืช	ช่วยเพิ่มกลิ่นรสและลักษณะที่ดี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.7 การใช้น้ำผึ้งในผลิตภัณฑ์ต่างๆ (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	วัตถุประสงค์ของการใช้น้ำผึ้ง
3. เครื่องสำอางและยา	เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง และส่วนประกอบของยา
4. อุตสาหกรรมยาสูบ	รักษาความชื้นและกลิ่นหอมของผลิตภัณฑ์

ที่มา : Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1996)

2.2 การตกผลึกในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งตกผลึก (Crystallized honey) คือ น้ำผึ้งที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง หรือเป็นผลึก สาเหตุมาจากน้ำผึ้งชนิดนั้นมีกลูโคสมากจึงชักนำให้ก่อผลึก ซึ่งหมายความว่าหากน้ำผึ้งมีปริมาณกลูโคสมาก แต่มีปริมาณน้ำหรือความชื้นในน้ำผึ้งน้อยก็จะตกผลึกได้ง่าย และการตกผลึกจะเร็วขึ้น เมื่อเก็บน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยปกติน้ำผึ้งทั่วไปไม่ค่อยตกผลึกเพราะมีฟรักโทสมากกว่ากลูโคส ซึ่งถ้ามีฟรักโทสมากกว่ากลูโคสถึง 1.5 เท่า น้ำผึ้งจะไม่ตกผลึก รูปร่างของผลึกกลูโคสในธรรมชาติจะอยู่ในรูป D-enantiomer และเป็นรูปที่พบได้โดยทั่วไปในผลึกน้ำผึ้งซึ่งมีสามแบบคือ α-Monohydrate, α-Anhydrous และβ-Anhydrous (Yong, 2003) การตกผลึกของน้ำผึ้งอาจจะตกผลึกเป็นบางส่วน ตกเพียงหนึ่งในสี่หรือสองในสาม หรือตกทั้งขวด แล้วแต่สัดส่วนระหว่างกลูโคสกับน้ำในน้ำผึ้ง การเกิดผลึกและขนาดของผลึกนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของฟรักโทสต่อกลูโคส ความชื้น ลักษณะของผลึกเริ่มต้น ระยะเวลาในการเก็บรักษา อุณหภูมิในการเก็บรักษา และการผ่านความร้อนมาก่อนของน้ำผึ้ง (Bogdanov, 1993)

Comforti *et al.* (2006) รายงานว่าการตกผลึกในน้ำผึ้งมีสาเหตุมาจากการเกิดสภาวะอิ่มตัวของกลูโคสซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าฟรักโทสมาก ผลึกของน้ำตาลที่เกิดขึ้นในน้ำผึ้งจึงเป็นผลึกของกลูโคสมอนอไฮเดรต ซึ่งการตกผลึกของน้ำตาลจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่าจุดอิ่มตัว (equilibrium saturation) ความสามารถในการละลายของกลูโคสและฟรักโทส ณ สภาวะอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 103.3 กรัม/100 กรัมน้ำ และ 405.1 กรัม/ 100 กรัมน้ำ (Pancoast and Junk, 1980; Bubnik *et al*., 1995) ตามลำดับ โดยน้ำผึ้งที่ตกผลึกง่าย คือ น้ำผึ้งดอกลิ้นจี่ น้ำผึ้งดอกทานตะวัน และน้ำผึ้งดอกยางพารา สำหรับวิธีแก้น้ำผึ้งตกผลึกให้เป็นของเหลวนั้นทำได้โดยการนึ่งหรือจุ่มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส จนละลายหมด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550) ซึ่งน้ำผึ้งที่ตกผลึกไม่ได้เป็นน้ำผึ้งเสีย หรือบูดแต่อย่างใด เพียงแต่เปลี่ยนสถานะไป และมีผลให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Tosi *et al.*, 2004) นอกจากนั้นเมื่อเกิดการตกผลึกในส่วนของของเหลวจะมีความชื้นสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเจริญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของยีสต์ และเป็นสาเหตุให้เกิดการหมัก (Lazaridou *et al*., 2004) การหมักที่เกิดขึ้นเกิดจากการเผาผลาญน้ำตาลของยีสต์ เป็นผลให้เกิดเอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อแอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดกรดอะซีติกและน้ำ เป็นผลให้น้ำผึ้งเกิดรสเปรี้ยวและมีกลิ่นผิดปกติได้ ยีสต์ที่ทำให้เกิดการหมักในน้ำผึ้งตามธรรมชาติคือ *Saccharomyces spp.* ในอุตสาหกรรมน้ำผึ้งปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำผึ้งได้ นอกจากนั้นค่าวอเทอร์แอกทิวิตี (a_w) ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ได้ โดยค่า a_w ปกติของน้ำผึ้งนั้นต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นระดับค่าวอเทอร์แอกทิวิตี ที่สามารถยังยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่ม osmophilic yest ได้ (Zamora and Chirife, 2006) ความแตกต่างของค่าวอเทอร์แอกทิวิตีในน้ำผึ้งที่ตกผลึกและไม่ตกผลึก พบว่าน้ำผึ้งที่ตกผลึกจะมีค่าวอเทอร์แอกทิวิตี สูงกว่าน้ำผึ้งที่ยังไม่ตกผลึก (Gleiter *et al*., 2006) กรมส่งเสริมการเกษตร (2550) รายงานว่าน้ำผึ้งที่ตกผลึกแล้วหากนำมาละลายในน้ำอุ่นอุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้สูญเสียคุณภาพของน้ำผึ้งน้อย แต่ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินกว่านี้ หรือการได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้สารอินฮิบินและสารอื่นๆที่สำคัญซึ่งอยู่ในน้ำผึ้งสูญเสียไป

2.2.1 ปัจจัยการตกผลึกของน้ำผึ้ง

สาเหตุของการตกผลึกในน้ำผึ้ง เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย ดังนี้

1.) องค์ประกอบของน้ำผึ้ง

องค์ประกอบหลักในน้ำผึ้งได้แก่ กลูโคส และฟรักโทส น้ำผึ้งที่มีกลูโคสปริมาณมากจะเกิดการตกผลึกได้เร็ว เนื่องจากกลูโคสมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าฟรักโทส (Zamora and Chirife, 2006) อัตราส่วนระหว่างฟรักโทสต่อกลูโคส สัดส่วนกลูโคสต่อน้ำผึ้ง ปริมาณเดกซ์ทรินและผลึกของแข็งขนาดเล็กที่มีอยู่ในน้ำผึ้ง จากรายงานการวิจัยพบว่าน้ำผึ้งจะเกิดการตกผลึกได้ดีเมื่อมีปริมาณกลูโคสมากกว่า 280-300 กรัม/กิโลกรัม น้ำผึ้ง (Bogdanov, 1993) มีอัตราส่วนฟรักโทสต่อกลูโคส น้อยกว่า 1.14 และมีอัตราส่วนกลูโคสต่อน้ำ มากกว่าหรือเท่ากับ 2.1 (White *et al*., 1974) การตกผลึกนอกจากเกี่ยวข้องกับปริมาณกลูโคสแล้ว ปริมาณแร่ธาตุและโปรตีนยังมีอิทธิพลต่อการตกผลึก (Conforti *et al*., 2006)

ขนิษฐา (2550) ศึกษาผลของอุณหภูมิและชนิดของน้ำผึ้งที่มีต่อการตกผลึกของน้ำผึ้งดอกลำไย น้ำผึ้งดอกสาบเสือ และน้ำผึ้งดอกทานตะวัน พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันมีอัตราการตกผลึกเร็วกว่าน้ำผึ้งดอกลำไยและน้ำผึ้งดอกสาบเสือที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิเท่ากัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึกของน้ำผึ้งคืออัตราส่วนฟรักโทสต่อกลูโคส ดังนั้นน้ำผึ้งดอกทานตะวันซึ่งมีอัตราส่วนของฟรักโทส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ต่อกลูโคสต่ำที่สุด คือ 1.27 จึงเกิดผลึกได้เร็วกว่าน้ำผึ้งดอกลำไย และดอกสาบเสือที่มีอัตราส่วนฟรักโทสต่อกลูโคสที่ 1.30 และ 1.56 ตามลำดับ

2.) สภาวะการเก็บรักษา

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดผลึกของน้ำผึ้ง การเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำ จะเร่งให้เกิดการตกผลึกของกลูโคสและยังมีผลต่อความหนืด เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำตาลจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง (Yong, 2003)

ธนากรและจิตติธัน (2551) ได้ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำผึ้งไทย 5 ชนิด ได้แก่ น้ำผึ้งดอกทานตะวัน ดอกลิ้นจี่ ดอกลำไย ดอกสาบเสือ และดอกเงาะ โดยเก็บที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีเพียงน้ำผึ้งดอกทานตะวันเท่านั้นที่ตกผลึก ส่วนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำผึ้งทุกตัวอย่างตกผลึก โดยน้ำผึ้งดอกทานตะวันจะตกผลึกเร็วที่สุด

Lupano (1997) ได้ศึกษาสมบัติในการหลอมละลายของผลึกน้ำผึ้ง โดยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของผลึกน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก น้ำผึ้งที่มีลักษณะผลึกละเอียดจะมีอุณหภูมิในการหลอมละลายอยู่ระหว่าง 25-45 องศาเซลเซียส ส่วนผลึกน้ำผึ้งขนาดใหญ่จะหลอมละลายในระหว่าง 45-65 องศาเซลเซียส

ขนิษฐา (2550) ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำผึ้งดอกทานตะวันขณะเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 10 และ 25 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส น้ำผึ้งดอกทานตะวันจะเริ่มตกผลึกในวันที่ 15 และตกผลึกจนหมดขวดวันที่ 35 อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เริ่มตกผลึกวันที่ 21 และตกผลึกทั้งหมดวันที่ 42 และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเริ่มตกผลึกวันที่ 80 โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีรูปทรงเป็นเรขาคณิต

3.) สารชักนำอื่นๆที่อยู่ในน้ำผึ้ง

ละอองเกสร ฝุ่น ไขมัน พรอพโพลิสที่แขวนลอยอยู่ในน้ำผึ้ง การมีผลึก (nuclei) อนุภาคเล็กๆหรือฟองอากาศที่มีอยู่ในน้ำผึ้งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการตกผลึก (The National Honey Board, 2007) โดย Escobedo *et al.* (2006) ได้รายงานว่าน้ำผึ้ง tajonal สามารถเกิดการตกผลึกได้ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 27.8 องศาเซลเซียส โดยเริ่มตกผลึกในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งการตกผลึกเริ่มจากการเกิดขึ้นของผลึกใหม่หรือผลึกที่มีอยู่แต่เดิมแล้ว และหลังจากนั้นการตกผลึกจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว รูปร่างของผลึกที่พบในครั้งแรกมีลักษณะเป็นรูปวงรี หลังจากนั้นในสัปดาห์ที่ 8 ผลึกจะมีรูปร่าง 6 เหลี่ยม โดยการตกผลึกที่เกิดจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการอิ่มตัวของกลูโคส อุณหภูมิ และความเป็นกรดด่าง ซึ่งมีผลต่ออัตราการขยายขนาดและรูปร่างของผลึก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 กระบวนการตกผลึก

กระบวนการตกผลึกนั้นจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือ

1.) การเกิดผลึก (crystal formation) หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (Nucleation)

นิวคลีเอชันเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดผลึก โดยการเริ่มสร้างนิวคลีไอ (Nuclei) ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป โดยทั่วไปแล้วนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ โฮโมจีเนียส (homogeneous) และเฮทเทอร์โรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งแบบแรกนั้นจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย เกิดขึ้นเฉพาะในระบบที่น้ำถูกทำให้บริสุทธิ์อย่างมาก โดยนิวคลีไอจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำตาลที่รวมตัวกันอย่างสุ่ม ส่วนแบบเฮทเทอร์โรจีเนียสนั้น อนุภาคเล็กๆที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดเป็นนิวคลีไอแล้วเกิดเป็นผลึกขึ้น อนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้าง โดยอัตราการเกิดนิวคลีเอชันจะเร็วมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

2.) การเพิ่มขนาดของผลึก (crystal growth)

การเพิ่มขนาดของผลึก เป็นขั้นตอนที่สองของการเกิดผลึก โดยเกิดขึ้นหลังจากเกิดนิวคลีไอในจำนวนที่มากพอ อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- อัตราที่โมเลกุลน้ำตาลทำปฏิกิริยาที่ผิวของผลึก
- อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำตาลจากสารละลายที่ยังไม่แข็งตัวไปยังผิวผลึก
- อัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป (ความร้อนของการเกิดผลึก)

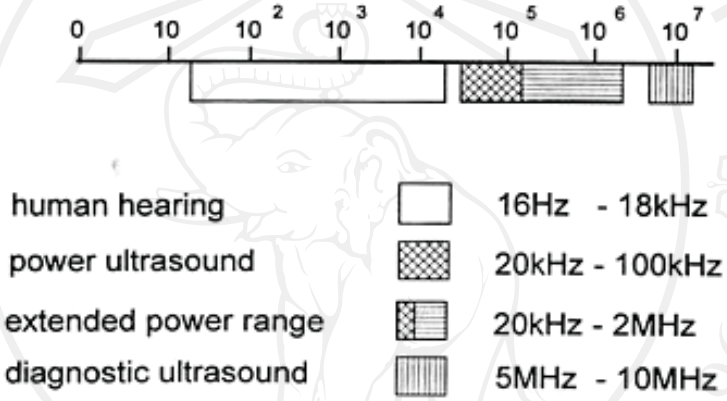
อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วล้วนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง (วสันต์, 2552)

2.3 คลื่นอัลตราซาวด์

คลื่นอัลตราซาวด์หรือคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic waves) หมายถึง พลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่า (Hoover, 2000) หรือหมายถึงคลื่นความดัน (pressure wave) ที่มีความถี่ (frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิรตซ์) ส่วนคำว่าอัลตราโซนิกส์ (ultrasonics) หรือโซนิเคชัน (sonications) หมายถึงการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียงหรือคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้น เกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่ยืดหยุ่น (elastic medium) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20-20,000 กิโลเฮิรตซ์ คลื่นเสียงผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่ยืดหยุ่นในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (longitudinal waves) แต่คลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปภายในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือขวาง (transverse waves) ก็ได้ การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราซาวด์ในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ประเภทแรกคือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังต่ำ ความถี่สูง (low power and high frequencies) ซึ่งใช้ในด้านการวิเคราะห์ (diagnostic ultrasound) เป็นส่วนใหญ่ และประเภทที่สองคือ การใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ต่ำ (high power and low frequencies) หรือที่เรียกว่าพาวเวอร์อัลตราซาวด์ ที่มักนำมาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร การใช้พาวเวอร์อัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Mason, 1998) ความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงต่างๆ
ที่มา : Mason (1998)

เทคโนโลยีอัลตราซาวด์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งยังมีแนวโน้มในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้นในอนาคต โดยการประยุกต์ใช้ระดับอุตสาหกรรมนั้นได้แก่ เพื่อใช้วัดเนื้อสัมผัส ความหนืด และความเข้มข้นของอาหารแข็งและอาหารเหลวหลายชนิด เช่นไข่ เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ ผลิตภัณฑ์นม และอื่นๆ รวมถึงใช้วัดความหนา อัตราการไหล อุณหภูมิ ใช้ตรวจติดตามและควบคุม โดยไม่ทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ และบรรจุภัณฑ์ (Floros and Liang, 1994; Mizrach, Galilli, and Rosenhouse, 1994; Shoh, 1988) นอกจากนี้ยังสามารถใช้คลื่นอัลตราซาวด์โดยตรงกับผลิตภัณฑ์ เช่น การทำความสะอาดพื้นผิว การขจัดน้ำ การทำแห้ง การกรอง การยับยั้งจุลินทรีย์และปฏิกิริยาของเอนไซม์ การแตกเซลล์ การขจัดฟองอากาศในของเหลว การเร่งอัตราการถ่ายเทความร้อน และการสกัด

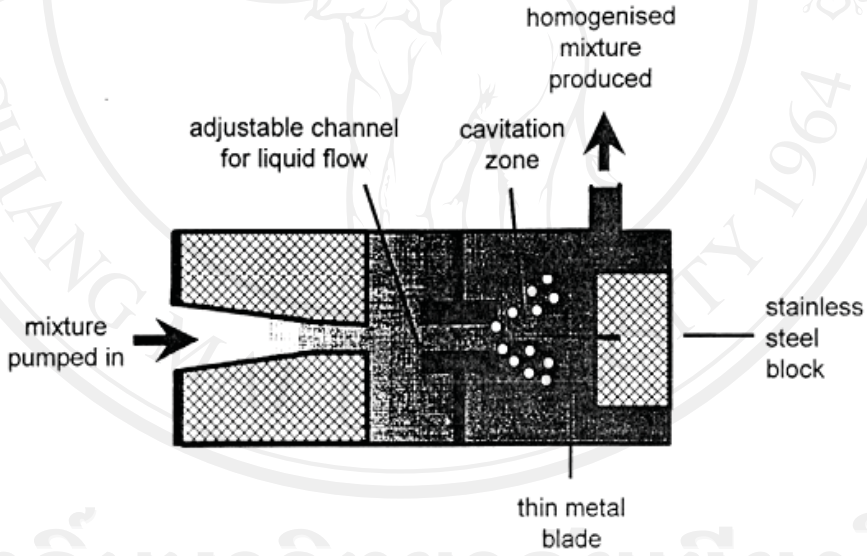
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.1 การสร้างคลื่นอัลตราซาวด์

ระบบการสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ประกอบด้วยอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นที่เรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ (transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียง โดยทั่วไปสามารถแบ่งทรานส์ดิวเซอร์เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

1.) Liquid driven transducer

ลักษณะการทำงานของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ คือทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและผ่านไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (thin blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโละดังกล่าวเกิดการสั่นไปมาในการสั่นแต่ละครั้งจะทำให้ผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันขึ้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปวิเทชันขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปวิเทชันเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมกันได้ดียิ่งขึ้น (Mason, 1998) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ แสดงในภาพที่ 2.2



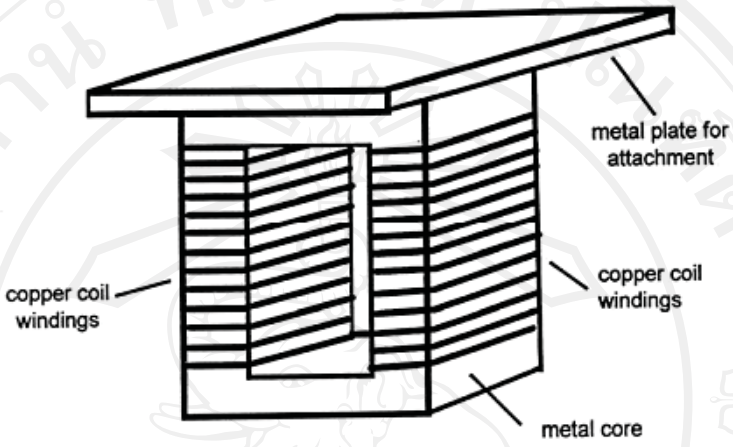
ภาพที่ 2.2 Liquid driven transducer
ที่มา : Mason (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.) Magnetostrictive transducer

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยใช้สมบัติแมกเนโตสตริกชัน (magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เช่น นิกเกิล หรือ เหล็ก เกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (magnetic fields) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลีนอยด์ (solenoid) ที่ใช้สาร

เฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอยด์ขนาดบางจำนวนหลายชั้น โดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้าม (Mason, 1998) ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 Magnetostrictive transducer
ที่มา : Mason (1998)

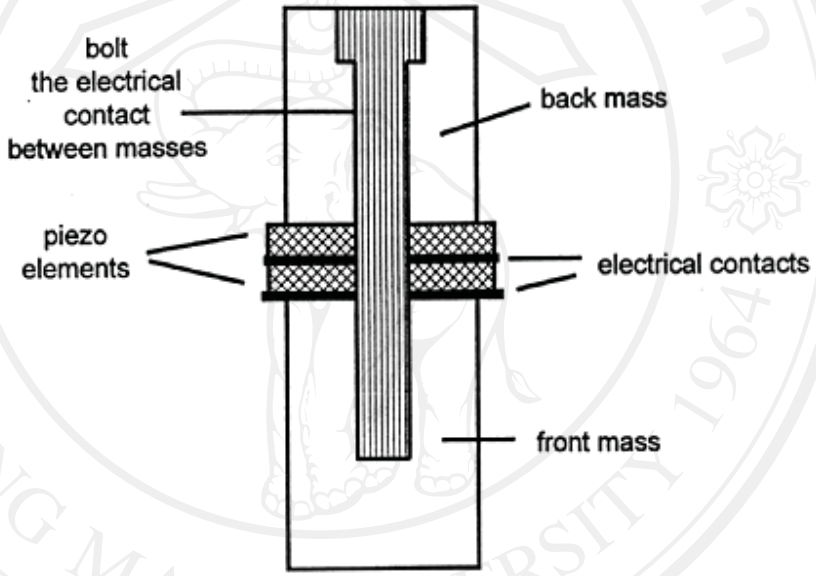
จากภาพที่ 2.3 เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด จะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนซึ่งผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก และทำให้ขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ลดลงไปด้วยและเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานส์ดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดกระแสไฟฟ้าแกตัวแกนจะทำให้แกนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดการสั่นที่ต้องการได้ ทั้งนี้ต้องออกแบบทรานส์ดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการสั่นตามความถี่ของคลื่นที่กำหนดไว้ แต่ข้อเสียของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คือสามารถสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ได้ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิรตซ์ และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าเพียงร้อยละ 60 โดยสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ระบบนี้มักต้องใช้การทำความเย็นภายนอกควบคู่ไปด้วย ส่วนข้อดีได้แก่การที่ระบบนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน (Mason, 1998)

3.) Piezoelectric transducer

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์โดยการใช้เซรามิกส์ที่มีส่วนผสมของสารพีโซอิเล็กทริก (piezoelectric materials) เช่น แบเรียมทาทาเนต (barium tatanate) หรือ เลดเมตาไนโอเบต (lead metaniobate) สารพีโซเซรามิกดังกล่าวนิยมใช้ในเครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้ชะสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ให้หลุดออกหรือเพื่อทำความสะอาด หรือใช้กับโพรบ (probe systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีรูตรงกลาง ทรานส์ดิวเซอร์นี้จะมีความ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เปราะบางแตกหักได้ง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการแตกหักแล้ว ยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นพีโซเซรามิกส์สองชนิด (เรียกกว่า sandwich construction) ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว ลักษณะของพีโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์แสดงดังภาพที่ 2.4 โดยทรานส์ดิวเซอร์นี้จะมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าร้อยละ 95 และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นอัลตราซาวด์ (Mason, 1998)



ภาพที่ 2.4 Piezoelectric transducer

ที่มา : Mason (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

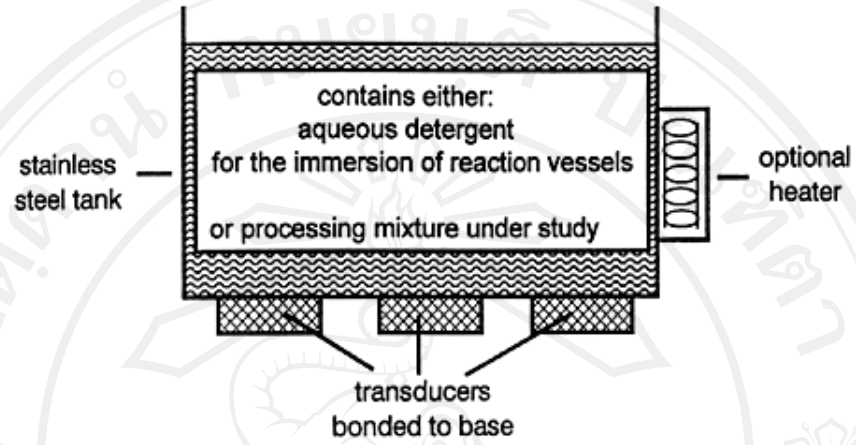
2.3.2 ประเภทของเครื่องอัลตราซาวด์ (ultrasonic reactor)

เครื่องอัลตราซาวด์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่น โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทและระบบต่างๆ ดังนี้

1.) อ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic baths)

อ่างอัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบ

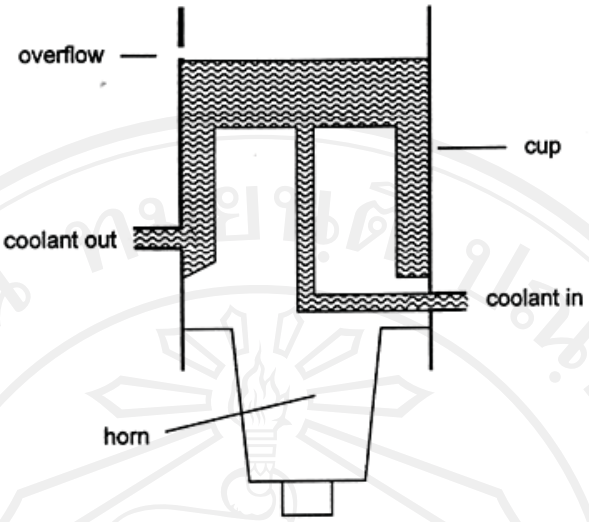
โดยทั่วไปทรานส์ดิวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างของอ่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 กิโลเฮิรตซ์ อ่างอัลตราโซนิก มีลักษณะดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 อ่างอัลตราโซนิก
ที่มา : Mason (1998)

สำหรับอ่างอัลตราโซนิกนั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่ตรงบริเวณระดับความสูงค่าหนึ่งตลอดความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อน (reflection) ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง (สำหรับน้ำ มีค่า λ = 37 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์) ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้ อ่างอัลตราโซนิกนั้นมีอุปกรณ์ เสริมประเภทต่างๆ ที่นำมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ อุปกรณ์กระจายคลื่น ที่ทำให้แคปวิเทชันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงาน สวิทซ์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตราโซนิกทั่วไป มักจะให้พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากการแคปวิเทชันที่เกิดขึ้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างหากมีปริมาณมากทำให้พลังงานมีค่าลดลง รูปแบบของอ่างอัลตราโซนิกอีกประเภทหนึ่งเรียกว่าคัพฮอร์น (cup horn) แสดงดังภาพที่ 2.6 โดยจัดว่าเป็นเป็นอ่างอัลตราโซนิกที่สร้างพลังงานได้สูงมากทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ซึ่งติดอยู่กับทรานส์ดิวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับขอบของเหลว และลักษณะการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวซึ่งมีความสำคัญมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

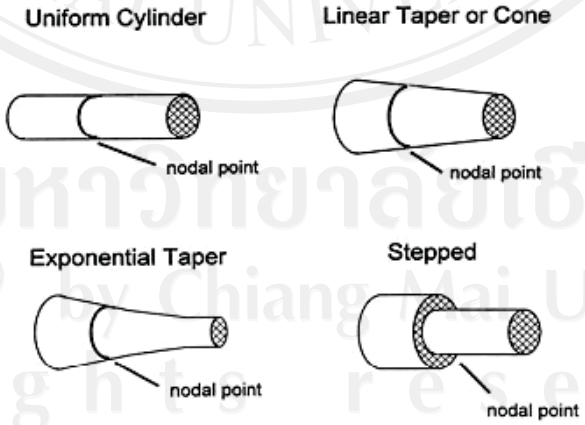


ภาพที่ 2.6 อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น

ที่มา : Mason (1998)

2.) Ultrasonic probe systems

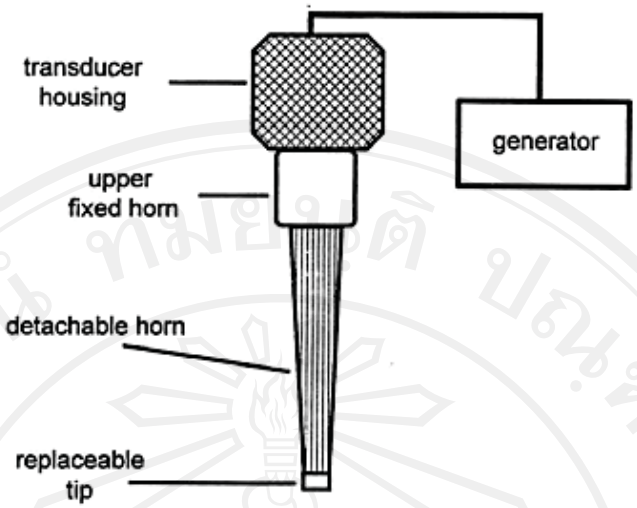
ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากทรานส์ดิวเซอร์นั้น โดยทั่วไปจะนำทรานส์ดิวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 2.7 โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิต ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 ลักษณะฮอร์นชนิดต่างๆ

ที่มา : Mason (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.8 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ
ที่มา : Mason (1998)

แอมพลิจูดที่สร้างขึ้นจากระบบนี้จะขึ้นกับรูปร่างลักษณะของฮอร์น สำหรับฮอร์นที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก (uniform cylinder) นั้น แอมพลิจูดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายหรือเพิ่มการส่งถ่ายพลังงานเสียง ขนาดความยาวคลื่นที่ได้จากตัวขยาย (amplifier) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวหน้าตัดในฮอร์นระหว่างสองพื้นที่คือ driven face (D) และ emitting face (d) ตัวอย่างเช่นในฮอร์นที่มีรูปร่างเป็น exponential หรือ linear tapered (cone) จะมีอัตราส่วนเท่ากับ D/d ในขณะที่ฮอร์นแบบ stepped จะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้สูงกว่าเสมอ แต่เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายจากความเค้นภายในตัววัตถุ (internal stress) อัตราส่วนระหว่าง D/d จะต้องมีค่าไม่สูงจนเกินไป ในทางปฏิบัติขนาดของพลังงานสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญสองส่วน ได้แก่ สมบัติของวัตถุที่ใช้ในการผลิตทรานส์ดิวเซอร์และพื้นที่ปลดปล่อยคลื่น (emitting surface) ในส่วนของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตทรานส์ดิวเซอร์นั้น นิยมใช้วัสดุที่สามารถยืดและคืนตัวกลับคืนได้ดี เช่น ไทเทเนียม หรือ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ (aluminium alloy) ซึ่งวัตถุทั้งสองชนิดมีความทนทานต่อการล้าเนื่องจากแรงกล แต่อะลูเนียมอัลลอยนั้นไม่เหมาะสมที่จะสัมผัสกับของเหลวที่เกิดปฏิกิริยาแคปวิเทชัน เนื่องจากถูกกัดกร่อนได้ง่าย จึงควรใช้วัตถุพวกไทเทเนียมอัลลอยแทน สำหรับพื้นผิวที่ปลดปล่อยคลื่นนั้น พบว่าพื้นที่ขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ที่แอมพลิจูดจะมีข้อจำกัดเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวหน้าจากปฏิกิริยาแคปวิเทชันจะรบกวนการส่งถ่ายของพลังงานไปยังของเหลว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.) อุปกรณ์ที่ใช้ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (equipment involving parallel vibrating plates)

ระบบนี้พบว่าเป็นทางเลือกที่ดีในการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้กับงานที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับคลื่นอัลตราซาวด์อย่างสม่ำเสมอในระหว่างทางที่ไปยังเครื่องอัลตราโซนิกซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่บริเวณผนังด้านในตัวเครื่อง เมื่อแผ่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้น จะมีผลทำให้การลดทอนพลังงาน (attenuation) ของคลื่นเสียงภายในของเหลวมีค่าต่ำสุดและไม่เกิดคลื่น ข้อดีของระบบแผ่นสั่นคู่ที่ติดตั้งในแต่ละด้านของของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบแผ่นสั่นแผ่นเดียวคือคลื่นพลังงานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งถ่ายไปยังของเหลวจะสะท้อนไปยังแผ่นที่สั่นอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้ผลที่เกิดจากแรงกลมีค่าสูงสุด

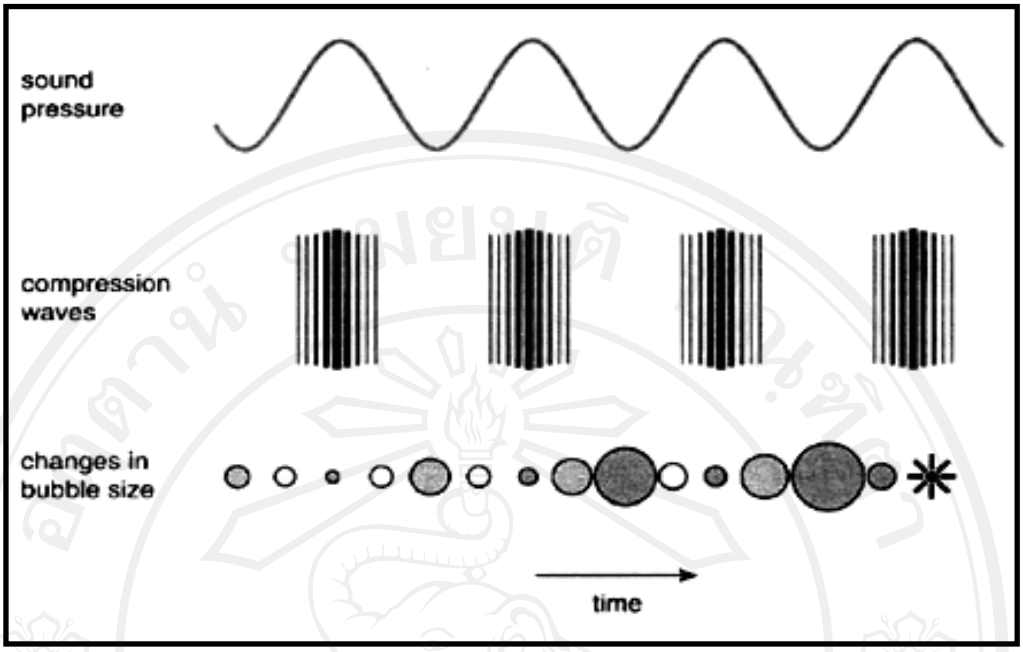
4.) ระบบการสั่นตามแนวรัศมี (radial vibrating systems)

ในการให้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์กับของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อนั้น วิธีที่ดีที่สุดคือการใช้การสั่นของท่อเพื่อทำให้เกิดคลื่นพลังงานขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นรวมทั้งใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดสูงได้ ลักษณะการตัดขวางของท่อดังกล่าวมีความสำคัญโดยท่อทรงกระบอกที่สั่นจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์สูงสุดตรงบริเวณกึ่งกลางของท่อเช่นเดียวกับท่อที่มีลักษณะหกเหลี่ยมและการเกิดพลังงานน้อยกว่าตรงบริเวณดังกล่าว การนำทรานส์ดิวเซอร์มาเชื่อมติดกับท่อโลหะโดยตรง ทำให้สามารถเกิดคลื่นในแนวรัศมีและเกิดบัพ (node) และปฏิบัพ (antinodes) เป็นช่วงระยะเท่ากับ $\lambda/2$ ตามความยาวของท่อ

2.4 ปรากฏการณ์แคปวิเทชัน (Cavitation)

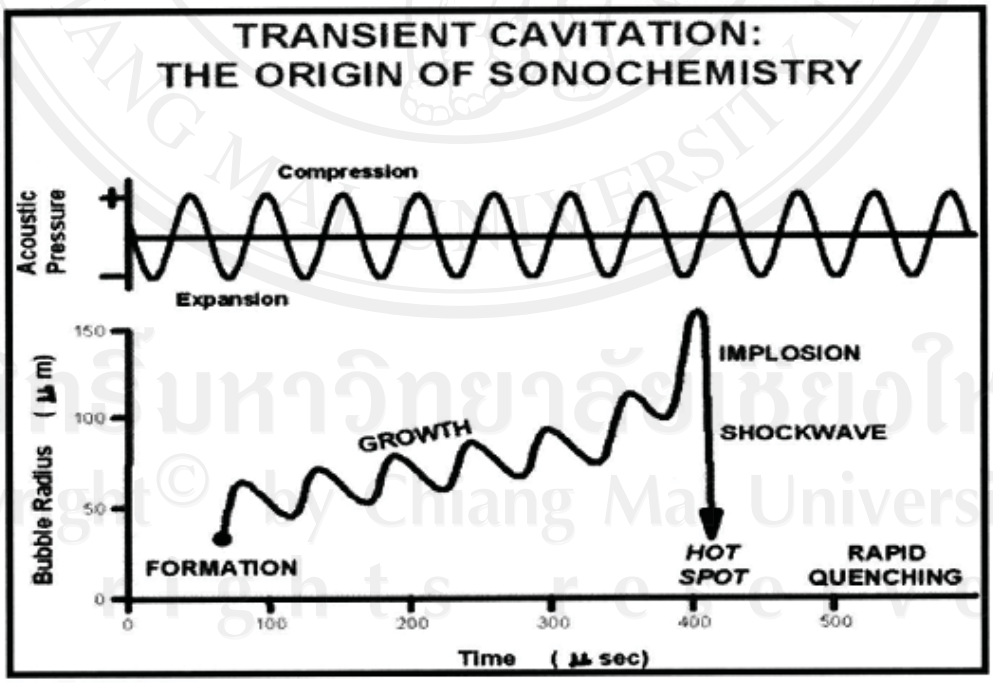
ปรากฏการณ์แคปวิเทชันหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ (จากแรงกล) เนื่องมาจากฟองอากาศ (bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์จะถูกบีบอัด (compress) และคลายตัว (stretch) ซ้ำไปซ้ำมาจำนวนหลายพันรอบต่อวินาที ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.9 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้ จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน (Atchley and Crum, 1998) เป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่งแตกออกในที่สุดแสดงดังภาพที่ 2.9

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 2.9 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์

ที่มา : Suslick (1994)



ภาพที่ 2.10 การเกิดแคปวิเทชัน

ที่มา : Suslick (1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

Frizzell (1988) รายงานว่าแคปวิเทชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แคปวิเทชันแบบถาวร (stable cavitation) และแคปวิเทชันแบบชั่วคราว (transient cavitation) ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลทำให้พฤติกรรมหรือลักษณะของฟองแก๊สที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์แตกต่างกันออกไป โดยแคปวิเทชันแบบถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศหรือฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่ง (oscillate) เมื่อได้รับคลื่นอัลตราซาวด์เป็นจำนวนหลายรอบของการสั่น แต่ไม่เกิดการแตกของฟองอากาศหรือฟองแก๊สดังกล่าว ซึ่งฟองอากาศหรือฟองแก๊สนี้อาจจะเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดเรโซแนนซ์ (resonance size) (เป็นขนาดของฟองแก๊สที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากันกับความถี่ในการสั่นแบบบังคับ) ส่วนแคปวิเทชันแบบชั่วคราวนั้น เกิดขึ้นในระยะการบีบอัดของฟองแก๊ส (compression phase) ในของเหลวที่ได้รับความเครียด (tension stress) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเกิดการขยายตัวของฟองแก๊ส ซึ่งมีผลทำให้การแตกของฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากฟองแก๊สเกิดการสั่นแกว่งและขยายขนาดเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง ก่อนที่จะแตกออกอย่างรวดเร็ว เมื่อฟองแก๊สนั้นขยายขนาดเพิ่มขึ้นถึงขนาดที่จำเพาะ

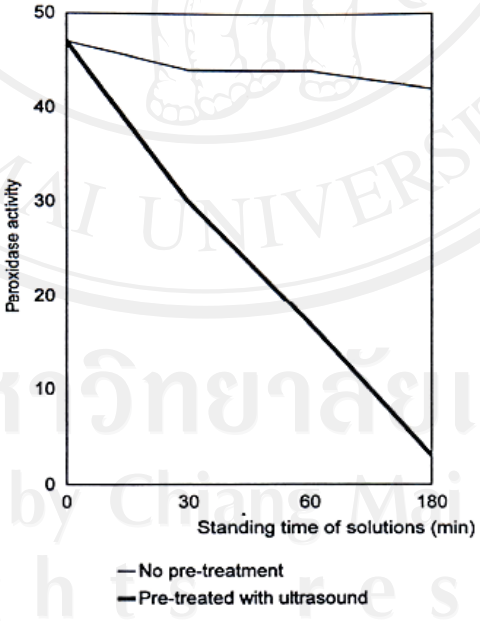
Sala *et al*. (1995) รายงานว่าในสภาวะที่ฟองอากาศแตกนั้น พบว่าทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000 เคลวิน และความดันสูงถึง 2,000 atm ในบริเวณที่เกิดคลื่นกระแทก (shock waves) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเกิดการขยายและหดตัวของฟองแก๊สนั้น จะเกิดสมดุลขึ้นระหว่างความดันไอภายในและภายนอกฟองแก๊ส และพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะขยายตัวจะมีมากกว่าพื้นที่ผิวของฟองแก๊สขณะหดตัว จึงเป็นผลให้การซึมผ่านของแก๊สในขณะที่ขยายตัวเกิดขึ้นได้มากกว่า และฟองแก๊สนี้จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบความถี่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะขยายตัวต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สในขณะถูกอัดจะเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบจนกระทั่งฟองแก๊สมีขนาดเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้ช่องว่างภายในฟองแก๊สมีขนาดโตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งรอบของการสั่น และเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากคลื่นอัลตราซาวด์ไม่เพียงพอในการคงสภาวะของแก๊สหรือไอจึงทำให้เกิดการควบแน่น (condensation) ขึ้นทันทีทันใด โดยโมเลกุลที่ควบแน่นนั้นจะชนซึ่งกันและกันอย่างรุนแรง ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นและเกิดจุดหรือบริเวณเล็กๆที่มีอุณหภูมิและความดันสูงมาก (Suslick, 1988) ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างที่ของเหลวได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งทันทีที่ฟองแก๊สหรือฟองอากาศแตกจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีหรือสร้างวิถีของปฏิกิริยา (reaction pathway) หรือทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แตกต่างไปจากปฏิกิริยาเดิมจากสภาวะปกติ Wiliams (1994) รายงานว่าในการสนทนาปกติกำลังของคลื่นเสียง (sound power levels) มีค่าประมาณ 10^{-7} วัตต์/ตารางเมตร และเครื่องขุดเจาะถนนที่มีความดังของเสียง 110 เดซิเบล จะมีค่ากำลังของเสียงที่ประมาณ 10^{-1} วัตต์/ตารางเมตร แต่ในส่วนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง (high power ultrasound) พบว่าค่าระดับกำลัง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของเสียงอยู่ในช่วง $10^3 – 10^6$ วัตต์/ตารางเมตร (ที่ 10^6 วัตต์/ตารางเมตร คลื่นอัลตราซาวด์จะสามารถเจาะทะลุแผ่นอะลูมิเนียมฟอล์ยได้ภายใน 30 วินาที) และความดันที่เกิดขึ้นจะสูงถึง 10^4 atm และมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 ถึง 1,500 เคลวิน

2.5 การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร

การนำคลื่นอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้น มีความหลากหลายและแตกต่างกันไปตามชนิดหรือประเภทของอาหารและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ โดยกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ จะถูกยับยั้งได้เนื่องจากการเกิดแคปวิเทชัน ตัวอย่างเช่น การศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ขนาด 20 กิโลเฮิรตซ์ ที่กำลัง 371 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แก่เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในผักและผลไม้สดและเป็นเอนไซม์ที่กระตุ้นให้เกิดรสชาติผิดปกติและทำให้เกิดสีน้ำตาล เมื่อให้คลื่นอัลตราซาวด์ขนาดดังกล่าวแก่เอนไซม์ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์นี้ลดลงร้อยละ 90 (Mason, 1998) แสดงดังภาพที่ 2.11

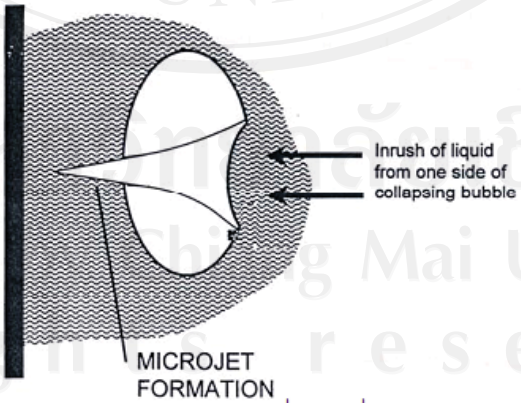


ภาพที่ 2.11 ผลของคลื่นอัลตราซาวด์ต่อกิจกรรมเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (เส้นหนาคือเอนไซม์ที่ให้คลื่นอัลตราซาวด์ขนาด 20 กิโลเฮิรตซ์ ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส)
ที่มา : Mason (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Sala *et al*. (1995) รายงานว่ามีการรวบรวมผลการศึกษาในเรื่องของคลื่นอัลตราซาวด์ต่อเอนไซม์และองค์ประกอบของอาหารอื่นๆนั้นมีมานานแล้ว โดยประมาณ 70 ปีที่ผ่านมา พบว่าคลื่นอัลตราซาวด์สามารถทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) ขึ้นได้ เช่น การทำให้ความหนืดของสารละลายสตาร์ช (starch) กัมอะราบิก (gum arabic) เจลาทิน (gelatin) และพวกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ชนิดอื่นๆ มีค่าลดลง หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ของสตาร์ชและเดกทริน (dextrins) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น รวมทั้งทำให้ DNA แตกสลายแต่ยังคงโครงสร้างขององค์ประกอบย่อยต่างๆไว้ได้ เป็นต้น และในภายหลังยังพบอีกว่าคลื่นอัลตราซาวด์นั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแก๊สที่ละลายอยู่ในตัวกลางที่สัมผัสกับคลื่นอัลตราซาวด์ เช่น ถ้าแทนที่แก๊สออกซิเจนด้วยไฮโดรเจนจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่หลายชนิดเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนั้นยังมีรายการศึกษาการทนต่อคลื่นอัลตราซาวด์ของเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ พบว่าสามารถเรียงลำดับความทนได้ดังนี้ ออกซิเดส (oxidase) < คะตะเลส (catalase) (ที่ความเข้มข้นต่ำ) < รีดักเตส (reductase) และอะมัยเลส (amylase) (Mason, 1998)

การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการสเตอริไลเซชัน (sterilization) เริ่มจากการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ในการทำความสะอาด เพื่อลดการปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิว (surface decontamination) เนื่องจากการเกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็ก (microjet) จากการที่ฟองอากาศเกิดการแตกและมีทิศทางพุ่งเข้าสู่พื้นผิวด้วยความเร็วสูง เป็นผลให้สิ่งสกปรกและแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่ที่บริเวณพื้นผิวหลุดออกแสดงดังภาพที่ 2.12

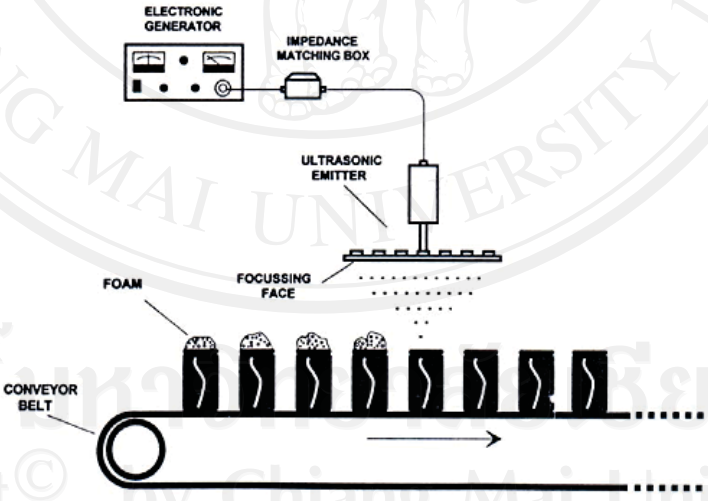


ภาพที่ 2.12 การแตกของฟองแก๊สในสารละลายที่ได้รับคลื่นอัลตร้าซาวน์ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขนาดเล็กพุ่งเข้าสู่พื้นผิว

ที่มา : Mason (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าจุลินทรีย์ด้วยสารเคมีเนื่องจากทำให้เซลล์แบคทีเรียที่เกาะกลุ่มกันอยู่เกิดการแตกกระจายเป็นผลให้สารเคมีสามารถสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น Bermúdez and Barbosa (2008) พบว่าเมื่อนำเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ถูกทำลายบางส่วนมาศึกษาจะพบรูขนาดเล็กเกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เซลล์แตกและทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลาย นอกจากนี้คลื่นอัลตราซาวด์ยังถูกทำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดฟองแก๊ส Gallego-Juarez (1998) รายงานว่าโฟมคือฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของแก๊สภายในของเหลวซึ่งมีระยะห่างฟองแก๊สแต่ละฟองน้อยมาก ซึ่งในระบบของโฟมนั้นพบว่าอัตราส่วนของปริมาตรอากาศหรือแก๊สและของเหลวมีค่าสูงมากและค่า bulk density ของโฟมมีค่าใกล้เคียงกับแก๊ส วิธีการดั้งเดิมในการกำจัดโฟมคือการใช้ความร้อน สารเคมี ใช้กระแสไฟฟ้า และใช้แรงกล ซึ่งมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปการบรรจุของเหลวที่มีโฟมล้นออกมาจากภาชนะบรรจุหลังจากเติมลงไปและนำไปปิดผนึกทันที จะทำให้ปริมาตรของของเหลวในภาชนะบรรจุลดลง การกำจัดโฟมที่ล้นเกินออกมาจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ในการใช้คลื่นอัลตราซาวด์เพื่อกำจัดโฟมที่ล้นออกมา แสดงดังภาพที่ 2.13 โดยพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการทำลายโฟมด้วยวิธีอื่น ๆ และสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 2.13 การกำจัดโฟมโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง
ที่มา : Gallego-Juarez (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยการกำจัดแก๊สออกจากของเหลว เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาแคปวิเทชัน ซึ่งแก๊สที่ละลายอยู่ (dissolved gases) หรือฟองอากาศ (gas bubbles) ขนาดเล็กภายในสารละลายจะเปรียบเสมือนนิวเคลียสสำหรับการเกิดฟองแก๊สที่จะขยายขนาดเพิ่มขึ้น และเกิดการแตกออกเมื่อได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ เป็นผลให้ฟองอากาศที่อยู่ภายในของเหลวรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่บริเวณพื้นผิวและหลุดออกไป เช่น การใช้คลื่นอัลตราซาวด์กับของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น ช็อกโกแลต ทำให้ลดการเกิดฟองอากาศภายในผลิตภัณฑ์ได้ รวมทั้งการควบคุมการตกผลึก (control of crystallization) คลื่นอัลตราซาวด์สามารถช่วยในการก่อตัวของผลึกขณะเริ่มต้น (initiation of seeding) และช่วยในการขยายขนาดผลึก (crystal growth) โดยมีรายงานว่าคลื่นอัลตราซาวด์ช่วยเร่งอัตราการเกิดนิวเคลียส (the nucleation rate) และเร่งอัตราการขยายขนาดผลึกในสารละลายอิ่มตัว (saturated solution) หรือในอาหารหรือตัวกลางที่เย็นยิ่งยวด (supercooled medium) ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากปรากฏการณ์แคปวิเทชัน ซึ่งนำมาใช้ในการผลิตยาและในผลไม้แช่เยือกแข็ง เช่น สตรอเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง โดยช่วยทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลึกของน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์ รวมทั้งทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดภายในเซลล์มีขนาดเล็กลงเป็นผลให้โอกาสในการทำลายเซลล์จากการเกิดผลึกน้ำแข็งลดลง จึงทำให้มีการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้ในการควบคุมขนาดและพัฒนาการเกิดผลึกของน้ำแข็งในอาหารแช่แข็ง (Chow *et al.*, 2003) โดยควบคุมให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กและมีความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษาหรือเมื่อนำมาละลาย (Zheng and Sun, 2006) นอกจากนั้นการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในผลิตภัณฑ์ สตรอเบอร์รี่แช่เยือกแข็ง โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังต่ำในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ สามารถลดการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึกของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ โดยทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์มีขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ให้สูงขึ้นจะทำให้ผลึกน้ำแข็งละลาย (Mason, 1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved