บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กาแฟ

กาแฟ (coffee) เป็นเครื่องดื่มที่ทำจากเมล็ดกาแฟคั่วซึ่งได้จากต้นกาแฟ นิยมดื่มร้อน ๆ แต่สามารถดื่มแบบเย็นได้ด้วย บางครั้งนิยมใส่นมหรือครีมลงในกาแฟด้วย กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมมากชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับชาและน้ำ นอกจากนี้ กาแฟยังเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่มีการส่งออกมากเป็นอันดับที่หกของโลก (กาญจน์มุนี และคณะ, 2546)

กาแฟ ซึ่งเป็นชื่อที่ชาวอาระเบียนใช้ แปลมาจากคำว่า แคฟฟา (caffa) ซึ่งเป็นตำบลหนึ่งในภาคใต้ของอะบิสซิเนียที่ได้ค้นพบเมื่อศตวรรษที่ 5 ในประเทศอาระเบีย กาแฟเป็นพืชที่เกิดในถิ่นร้อน ถิ่นธรรมชาติเดิมของต้นกาแฟขึ้นอยู่ตามไหล่เขาในป่าดงดิบที่มีต้นไม้ใหญ่เป็นร่มเงาและเป็นเครื่องกำบังลม ต้นกาแฟเป็นพืชที่ต้องการความชุ่มชื้น ไม่ชอบลมโกรกจัด จัดอยู่ในจำพวกไม้พุ่ม เป็นพันธุ์ไม้ขนาดกลาง รูปทรงต้นคล้ายรูปปิระมิด คือส่วนล่างกว้างและเรียวขึ้นไปถึงยอด ลักษณะใบคล้ายต้นกระดังงา ดอกคล้ายดอกมะลิ มีสีขาวปนครีมมีกลิ่นหอม เมื่อดอกแก่กลีบร่วงจะปรากฏผล ผลกาแฟมีลักษณะค่อนข้างแบน ภายในผลแบ่งเป็น 2 ซีก เมื่อสุกเต็มที่จะมีสีแดง หรือแดงปนน้ำตาล มีขนาดต่าง ๆ กัน กาแฟมีมากกว่า 6,000 สายพันธุ์ แต่พันธุ์หลัก ๆ ที่ได้รับความนิยมได้แก่ อาราบิก้าซึ่งเป็นกาแฟแบบดั้งเดิมและมีรสชาติดี และโรบัสต้าซึ่งมีปริมาณกาเฟอีนสูงและสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ เนื่องจากมีความทนทานมากกว่าอาราบิก้า แต่ผู้คนนิยมดื่มไม่มากนักเนื่องจากมีรสขมและเปรี้ยว (กาญจน์มุนี และคณะ, 2546)

2.1.1 การแปรรูปกาแฟเบื้องต้น

การแปรรูปกาแฟเบื้องต้นประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 4 ขั้นตอน (Business Development Service, 2550)

(1) การบ่ม (Aging)

การบ่มมี 2 วิธีด้วยกันคือ กระบวนการผลิตแบบแห้ง (dry aging) และแบบเปียก (wet aging)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(1.1) การผลิตแบบแห้ง (Dry aging) เริ่มต้นจากการคัดเลือกผลกาแฟ โดยเทลงในภาชนะบรรจุน้ำ คัดผลกาแฟที่ลอยน้ำทิ้ง เพราะเป็นผลที่สุกเกินไป ผลแห้งหรือผลที่ถูกแมลงทำลาย จากนั้นนำผลกาแฟที่จมน้ำไปตากบนลานซีเมนต์หรือในถาด โดยการตากไม่ควรให้ความหนาของชั้นผลกาแฟหนาเกิน 3 เซนติเมตร และกลับเป็นระยะ ๆ เพื่อป้องกันการหมักและสีของผลกาแฟไม่สม่ำเสมอ

- การกะเทาะเปลือก (Hulling) ผลกาแฟที่แห้งจะถูกกะเทาะเปลือกเพื่อเอาส่วนที่เรียกว่า pericarp ออกซึ่งสามารถใช้มือหรือใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายครกกับสากหรือใช้เครื่องกะเทาะเปลือก โดยเครื่องกะเทาะเปลือกจะใช้สกรูเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้เปลือกส่วน pericarp หลุดออก

- การทำความสะอาด (Cleaning) เมล็ดกาแฟที่ถูกกะเทาะเปลือกเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาทำความสะอาดโดยการใช้ลมเป่า

(1.2) กระบวนการแบบเปียก (Wet aging) วิธีการนี้ผลกาแฟจะถูกบีบ คั้นหรือโม่โดย pulping Machine หรือ อุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายครกกับสาก เพื่อทำให้ผิวนอกของผลกาแฟเปื่อยยุ่ย (ชั้น mesocrap และชั้น exocrap) ทำให้เมล็ดเกิดเป็นเมือกลื่น โดยเมือกลื่นนี้จะทำให้เกิดกระบวนการหมักและการย่อยสลายเมล็ดกาแฟจะถูกล้างและทำแห้งต่อไป

- การเอาเนื้อออกจากผล (Pulping) การเอาเนื้อออกจากผลหรือ การโม่จะเป็นการทำให้ผิวภายนอกสีแดง (exocrap) และส่วนเนื้อยุ่ยสีขาว (mesocrap) หลุดออก จึงสามารถทำให้แยกเมล็ดออกจากผลได้ กระบวนการนี้หากผลกาแฟไม่เจริญเติบโตเต็มที่และยังเขียวอยู่จะทำให้ยากต่อการทำให้เนื้อเปื่อยยุ่ย ดังนั้นการเก็บเกี่ยวผลที่เหมาะสมสำหรับแปรรูปจึงมีความสำคัญมาก ในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ผลกาแฟจะถูกทำให้เปื่อยยุ่ยโดยใช้อุปกรณ์ที่คล้ายครกกับสาก หรือเครื่องมือที่ใช้ระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่เหมาะสมคือ drum pulper, disc pulper

- การเอาเยื่อเมือกออก เยื่อเมือกที่หุ้มเมล็ดกาแฟหลังจากการโม่เมล็ดแล้วจะมีส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส สารประกอบเพคติน น้ำตาล และสารที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ สามารถกำจัดออกด้วยวิธีการทางเคมี น้ำร้อน หรือใช้ agua pulper อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมขนาดเล็กนิยมใช้วิธี การหมัก โดยการนำเมล็ดกาแฟใส่ถังพลาสติกหรือแทงค์และทิ้งไว้จนกระทั่งเมือกนั้นหลุดออกไป โดยเมือกที่หลุดออกไปเกิดจากการทำงานของเอนไซน์และแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ในระหว่างการหมักควรทำการกวนเป็นครั้งคราว และหมั่นตรวจสอบอยู่เสมอว่าเมือกลื่นถูกทำลายไปหรือยัง โดยการนำเมล็ดมาล้างน้ำ หากสัมผัสแล้วรู้สึกถึงความแข็งหยาบไม่ลื่นแสดงว่าเมือกลื่นได้ถูกทำลายไปแล้ว จะต้องรีบล้างเมล็ดทั้งหมดทันทีเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงปรารถนา จากนั้นจึงนำเมล็ดมาทำแห้งต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- การทำแห้ง (Drying) เพื่อป้องกันการแตกของเมล็ดกาแฟ การทำแห้งควรเป็นไปอย่างช้าๆ จนเมล็ดมีปริมาณความชื้นเหลือร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และควรทำแห้งทันทีเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นรสที่ไม่พึงปรารถนา

- การกะเทาะเปลือก (Hulling) หลังการทำแห้งควรพักเมล็ดไว้ประมาณ 8 ชั่วโมง ในสถานที่ที่มีการระบายอากาศที่ดี นำเมล็ดที่ได้มาแยกแผ่นบางๆ ที่หุ้มเมล็ดออกโดยใช้มือลอกหรือใช้เครื่องกะเทาะเปลือกหรือใช้อุปกรณ์ที่คล้ายครกกับสากในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

- การทำความสะอาด (Cleaning) เมล็ดกาแฟที่ถูกกะเทาะเปลือกเรียบร้อยแล้วจะนำมาทำความสะอาดโดยใช้ลมเป่า

(2) การคั่ว (Roasting)

การคั่วเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการผลิตกาแฟ โดยกลิ่นรสสุดท้ายของกาแฟจะขึ้นกับวิธีการตลอดจนสภาวะที่ใช้คั่ว โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคั่วอยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส เมล็ดกาแฟเมื่อถูกคั่วจะพองออกจนมีขนาดเป็นสองเท่า ความหนาแน่นจะเปลี่ยนไป และสีจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าจะหยุดคั่ว ในการคั่วแบบอ่อนๆ กาแฟจะเก็บรสชาติแบบดั้งเดิมไว้ได้ดีกว่า ซึ่งเมล็ดกาแฟจะถูกขายโดยใช้ระดับของการคั่วเป็นหลัก รสกาแฟจะเกิดขึ้นเมื่อคั่วเมล็ดกาแฟดิบเท่านั้น โดยการคั่วจะไล่ความชื้นออกจากเมล็ดกาแฟและนำสารหอมระเหยที่เรียกว่า caffeol ออกมาที่ผิวเมล็ด ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ ถ้าขาดสารนี้จะไม่มีรสกาแฟ แต่จะมีเฉพาะน้ำสีน้ำตาลที่มีคาแฟอีน สารนี้จะมีอยู่เพียงร้อยละ 2 ของน้ำหนักเมล็ดกาแฟเท่านั้น (กาญจน์มุนี และคณะ, 2547) ซึ่งระดับการคั่วกาแฟโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้ (Joseph, 2546; บริษัทสยามกาแฟ จำกัด, 2550)

(2.1) การคั่วระดับอ่อน (Light roasting) การคั่วระดับอ่อนให้กาแฟเป็นสีน้ำตาลอ่อน ไม่มีความมันที่ผิวเมล็ด ใช้อุณหภูมิความร้อนที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 15-20 นาที การคั่วแบบนี้จะทำให้กลิ่นน้อย และทำให้มีรสชาดอ่อนได้ผลผลิตในการสกัดประมาณร้อยละ 18-20 น้ำหนักที่หายไปร้อยละ 12-14 จึงทำให้กาแฟมีน้ำหนักมาก และให้สีไม่ค่อยดีเท่าที่ควร กาแฟดิบที่นิยมคั่วแบบนี้คือกาแฟอาราบิก้าที่คุณภาพดี เหมาะสำหรับชงดื่ม มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป เช่น Half city roast, Cinnamon หรือ New England roast

(2.2) การคั่วระดับปานกลาง (Medium roasting) กาแฟที่มีความเข้มปานกลาง เมล็ดกาแฟเป็นสีน้ำตาล และมีความมันจากน้ำมันในเมล็ดเคลือบเจือจาง คั่วที่อุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 15-25 นาที การคั่วแบบนี้จะทำให้เกิดกลิ่นที่ดีที่สุด ให้เครื่องดื่มที่มีรสชาติดี ให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลผลิตในการสกัดประมาณร้อยละ 22-25 น้ำหนักที่สูญเสียไปร้อยละ 15 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Full City, Viennese หรือ Light French

(2.3) การคั่วระดับน้ำตาลเข้ม (Dark Brown Roasting) หมายถึง กาแฟคั่วที่มีน้ำมันเคลือบติดที่ผิวเมล็ดกาแฟ สังเกตได้ง่าย บางทีเรียกว่า French Roast, Deep Brown หรือ Cuban Roast

(2.4) การคั่วระดับน้ำตาลไหม้ คือการคั่วที่เมล็ดกาแฟมีสีใกล้เคียงกับสีช็อกโกแลตดำ หรือเรียกว่า Double Roast, High Roast หรือ Dark French Roast

(2.5) การคั่วระดับเอสเปรสโซ่ (Espresso) เมล็ดกาแฟเป็นสีน้ำตาลแก่เกือบไหม้คั่วในอุณหภูมิ 220-240 องศาเซลเซียส ระยะเวลาประมาณ 15-25 นาที เมล็ดกาแฟจะปล่อยน้ำออกมามาก ในขณะคั่วทำให้สูญเสียปริมาณของกรดในเมล็ดกาแฟจึงทำให้เครื่องดื่มกาแฟมีรสขมมากกว่าเมื่อบดจะให้อนุภาคที่ละเอียดได้ผลผลิตอย่างน้อยร้อยละ 25 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Italian Roast

(3) การบด (Grinding)

กาแฟที่มีรสชาติอ่อนและรสเข้มนั้น เกิดจากการคั่วและวิธีการบดหยาบหรือละเอียด กาแฟที่บดหยาบรสชาติจะอ่อนกว่ากาแฟที่บดละเอียด การบดเมล็ดกาแฟให้เหมาะกับเครื่องชงมีส่วนสำคัญมาก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการชงมีหลายชนิด แต่ละชนิดต้องการการบดเมล็ดกาแฟที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องบดให้มีความสัมพันธ์กับการชง ในอดีตการบดใช้วิธีการตำในครกต่อมาได้มีการประดิษฐ์เครื่องบดด้วยมือ ปัจจุบันมีเครื่องบดกาแฟไฟฟ้าที่สามารถปรับความหยาบและความละเอียดของการบดได้ ซึ่งการบดเมล็ดกาแฟมี 4 แบบ คือ แบบหยาบ หยาบปานกลาง ละเอียด และละเอียดมาก ซึ่งขนาดของอนุภาคกาแฟบดจะมีความเหมาะสมสำหรับวิธีการชงและเวลาในการชงที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2.1 ความสัมพันธ์ของชนิดการบดกาแฟ ระยะเวลาที่ใช้บด ปริมาณน้ำกาแฟ และเวลาที่ใช้ในการชงกาแฟ

	แบบกด	แบบต้ม	แบบกรอง	เครื่อง Espesso	เวลาที่ใช้ในการบด
บดหยาบ	*				8-10 วินาที
บดหยาบปานกลาง		*			12-15 วินาที
บดละเอียด			*		20-25 วินาที
บดละเอียดมาก				*	25-30 วินาที
เวลาใช้ในการชง	4-6 นาที	4-6 นาที	1-4 นาที	10-25 วินาที	
ปริมาณน้ำกาแฟ/ถ้วย	120 มิลลิลิตร	60 มิลลิลิตร	60 มิลลิลิตร	60 มิลลิลิตร	

* ความสัมพันธ์ระหว่างระดับที่บดเมล็ดกาแฟกับประเภทของการชงกาแฟ โดยปริมาณกาแฟที่ใช้ 8 – 10 กรัม

ที่มา : Joseph (2546)

(4) การชงหรือการสกัด (Extraction)

การชงกาแฟมีหลากหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามการให้น้ำกับกากกาแฟ ได้เป็น 4 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้ (นงนภา, 2548)

(4.1) การต้มเดือด

เป็นวิธีการดั้งเดิมในการชงกาแฟซึ่งยังคงใช้อยู่ในตะวันออกกลาง แอฟริกาเหนือ ตุรกี และกรีซ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า ibrik โดยวิธีการต้มผงกาแฟละเอียดเข้ากับน้ำในหม้อคอคอด และปล่อยให้เดือดเล็กน้อย บางครั้งจะเติมน้ำตาลเข้าไปในหม้อด้วยเพื่อเพิ่มรสหวาน บางครั้งจะเติมเครื่องเทศบางชนิด เช่น กระวาน กานพลู ชินนามอน เพื่อเพิ่มความหอมและให้รสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้ได้กาแฟเข้มข้นที่มีฟองอยู่ข้างบนและกากกาแฟหนาเหมือนโคลนอยู่ที่ก้น

(4.2) การใช้ความดัน

(4.2.1) เอสเพรสโซ (Espresso) เป็นการชงด้วยน้ำเดือดอัดความดัน และมักเป็นพื้นฐานนำไปผสมกาแฟหลาย ๆ ชนิด หรือไม่ก็เสิร์ฟเปล่า ๆ กาแฟชนิดนี้เป็นหนึ่งในประเภทที่รุนแรงที่สุดที่ดื่มกันโดยทั่วไป และมีรสชาติและความมันที่เป็นเอกลักษณ์

(4.2.2) เครื่องชงกาแฟแบบใช้น้ำร้อนซึม (Percolator extraction) มีลักษณะเป็นกาน้ำหรือหม้อทรงสูง แบ่งออกเป็นสามส่วน โดยส่วนล่างใช้สำหรับต้มน้ำเพื่อให้ไอน้ำลอยขึ้นไปยังกากกาแฟที่อยู่ในส่วนกลางและหมุนวนขึ้นลงจนกาแฟเข้มถึงระดับที่ต้องการ น้ำกาแฟที่ได้จะถูกเก็บอยู่ในส่วนบนสุด หากเป็นขนาดใหญ่จะต้องใช้เวลาต้มนานถึงประมาณ 30-40 นาที

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(4.3) การใช้แรงโน้มถ่วง

(4.3.1) การชงแบบหยดหรือแบบกรอง (Deep extraction) เป็นการหยดน้ำร้อนผ่านกากกาแฟที่วางอยู่ในเครื่องกรอง อาจเป็นกระดาษกรองหรือโลหะเจาะรู ความเข้มข้นของกาแฟขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างน้ำกับกาแฟ แต่โดยปกติแล้วจะไม่เข้มข้นเท่าเอสเพรสโซ

(4.3.2) เครื่องชงกาแฟแบบใช้น้ำร้อนซึมประเภทที่สอง (Syphon extraction) มีลักษณะคล้าย percolator แต่ใช้เวลาในการต้มน้อยกว่า คือ ไม่เกิน 3 นาที ลักษณะคล้ายถ้วยแก้วสำหรับใช้ทดลองทางวิทยาศาสตร์ คือ มีแท่งกระบอกแก้วสำหรับบรรจุผงกาแฟอยู่ด้านบน มีถ้วยแก้วสำหรับใส่น้ำอยู่ด้านล่าง และมีตะเกียงไฟอยู่ใต้ถ้วยแก้วเพื่อต้มน้ำให้เดือด เมื่อน้ำเดือดจะไหลย้อนขึ้นไปยังแท่งกระบอกแก้วที่มีผงกาแฟบรรจุอยู่ เมื่อดับตะเกียงน้ำกาแฟจะไหลกลับลงสู่ถ้วยแก้วด้านล่างอีกครั้ง

(4.4) การจุ่ม

(4.4.1) เฟรนช์เพรส (French press) ลักษณะเป็นแก้วใสมีแท่งกดเป็นก้านโลหะอยู่ตรงกลาง ส่วนปลายด้านล่างจะมีแผ่นกรองกากกาแฟ เป็นเครื่องมือที่เหมาะกับกาแฟที่บดค่อนข้างหยาบ การชงจะใช้วิธีแช่ผงกาแฟบดในน้ำร้อนประมาณ 4 นาที เพื่อสกัดรสชาติของกาแฟออกมาแล้วจึงกดแผ่นกรองเพื่อดันกากกาแฟลงสู่ด้านล่าง ในขณะที่น้ำกาแฟจะอยู่ด้านบน มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น plunger หรือ cafetiere

(4.4.2) ถุงกาแฟ ลักษณะเช่นเดียวกับถุงชาแต่เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมน้อยกว่าการใช้ถุงชามาก เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าถุงชา

2.2 การใช้กาแฟอาราบิก้าภายในประเทศไทย

ปัจจุบันโรงงานคั่วกาแฟหลายแห่งภายในประเทศไทยได้นำกาแฟอาราบิก้าไปใช้เป็นส่วนผสมอย่างหนึ่งร่วมกับกาแฟโรบัสต้าในการแปรรูปเป็นกาแฟคั่วบดและกาแฟผงสำเร็จรูป ทั้งนี้เพื่อให้ได้กลิ่นหอมและรสชาติที่ดีของผลิตภัณฑ์กาแฟ แต่โดยทั่วไปแล้วโรงงานจะใช้กาแฟอาราบิก้าในสัดส่วนที่น้อยกว่ากาแฟโรบัสต้าเพราะเมล็ดกาแฟดิบอาราบิก้ามีราคาแพงกว่า แม้ว่าปริมาณการใช้กาแฟอาราบิก้ายังคงน้อยอยู่ แต่ผู้บริโภคมีความนิยมในรสชาติของกาแฟพันธุ์นี้กันมากขึ้นแล้ว ปริมาณการใช้กาแฟเพื่อการแปรรูปก็จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

ความต้องการใช้เมล็ดกาแฟดิบเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์กาแฟชนิดต่าง ๆ สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ (พงศักดิ์ และคณะ, 2542) เป็น 3 ประเภท คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(1) กาแฟคั่วบด (Roast and Ground Coffee) หมายถึง การนำเมล็ดกาแฟมาคั่วให้สุก ได้สีน้ำตาล กลิ่นหอม และรสชาติที่ต้องการเพื่อนำออกจำหน่าย

(2) กาแฟสำเร็จรูป (Instant Coffee) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดน้ำกาแฟแล้วนำไประเหยน้ำออกจนแห้งด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม มีลักษณะเป็นผงหรือเกร็ด และสามารถละลายน้ำได้หมดทันที กาแฟผงสำเร็จรูปที่ผลิตในประเทศไทยมักทำจากกาแฟโรบัสต้าเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีเนื้อกาแฟ (body) มากกว่าและมีราคาถูกกว่าอาราบิก้า

(3) กาแฟพร้อมดื่ม (Ready to Drink Coffee) ผลิตภัณฑ์กาแฟพร้อมดื่มบรรจุกระป๋องนั้นสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในด้านความสะดวกในการหาซื้อ และวิธีดื่มได้เป็นอย่างดี ทำให้ตลาดของกาแฟประเภทนี้มีการเติบโตที่สูงมาก มีมูลค่าการจำหน่ายถึงปีละ 4,000 ล้านบาท อีกทั้งการแข่งขันในตลาดกาแฟประเภทนี้ค่อนข้างสูง ทำให้ผู้บริโภคสามารถเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรสชาติตามรสนิยมส่วนบุคคล

2.3 กระบวนการแปรรูปน้ำกาแฟสกัดเข้มข้น

การแปรรูปน้ำกาแฟเข้มข้นมีวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเตรียมสำหรับการทำแห้งเป็นกาแฟกึ่งสำเร็จรูปที่สามารถชงละลายง่าย (instant coffee) หรือผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กาแฟพร้อมดื่มที่เห็นตามท้องตลาดทั่วไป ซึ่งมีวิธีการทำให้กาแฟเข้มข้นได้หลายวิธีดังนี้ (Niro A/S Company, 2007)

(1) Falling film and plate evaporation เป็นวิธีการระเหยเอาน้ำออกจากน้ำกาแฟที่สกัดได้ โดยการให้ความร้อนผ่านฟิล์มและเพลท ซึ่งอาจจะทำให้กาแฟเสียกลิ่นและรสในระหว่างการระเหยได้

(2) Freeze concentration เป็นวิธีการแช่เยือกแข็งของเหลวบางส่วนที่อยู่ในกาแฟแล้วทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากของเหลว ดังนั้นจึงทำให้ของเหลวมีองค์ประกอบหลักเป็นของแข็งถูกละลายรวมกับปริมาณน้ำที่เหลือน้อยลง ซึ่งวิธีนี้ใช้อุณหภูมิต่ำจึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นและรสของกาแฟ

(3) Membrane filtration เป็นวิธีการกรองน้ำออกจากกาแฟ โดยใช้แผ่นเยื่อ (membrane) ที่มีรูขนาดเล็ก วิธีนี้มีข้อดีคือใช้อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการใช้งานค่อนข้างสูงเนื่องจากค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อได้เป็นน้ำกาแฟสกัดเข้มข้นแล้ว การทำแห้ง (drying) เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่ทำให้ได้กาแฟชนิดกึ่งสำเร็จรูป (instant coffee) ซึ่งทำให้มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดเล็ก ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้แก่ผู้บริโภค ซึ่งวิธีการทำแห้งนั้นมีหลากหลายวิธี (Gene, 1998) ได้แก่

(1) การทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เป็นการทำให้น้ำกาแฟเข้มข้นเกิดเป็นละอองเล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100-200 ไมโครเมตร ในกระแสลมร้อน 150-300 องศาเซลเซียส ที่ไหลในทิศเดียวกัน ในถังทำแห้งขนาดใหญ่ กาแฟแห้งที่ได้จะถูกแยกออกไปโดยการใช้ Centrifugal atomizer ส่วนของเหลวจะถูกส่งไปยังภาชนะหมุนเพื่อสร้างขนาดของหยดสารละลายใหม่ในการเสปร์ย ผงกาแฟที่แห้งแล้วจะนำออกโดยการใช้สายพานลำเลียงแบบสกรูเกลียวหรือระบบนิวเมติก

(2) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นการทำแห้งโดยการทำให้ของแข็งกลายเป็นไอโดยไม่ละลายหรือเรียกว่า การระเหิด โดยน้ำกาแฟจะถูกทำให้แข็งอย่างช้า ๆ ในอุปกรณ์แช่แข็งทั่วไป จากนั้นจึงทำการระเหิดภายใต้ความดัน 610 Pa และความร้อน โดยไอที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลับไปควบแน่นในคอยล์เย็น การทำแห้งขั้นสุดท้ายจะรวมถึงการทำแห้งแบบระเหยด้วย กาแฟจำเป็นที่จะต้องอยู่ในสภาพที่คล้ายโฟมเพื่อป้องกันการเกิดผลึกคล้ายแก้วของวัตถุดิบที่แช่แข็ง และเนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าใช้จากในการดำเนินงานที่สูง จึงทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์ที่ได้สูงตามไปด้วย

(3) การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum drying) การทำแห้งด้วยวิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมนักในขณะนี้เนื่องจากการทำแห้งจะทำให้น้ำกาแฟต้องสัมผัสกับลูกกลิ้งรูปทรงกระบอกที่ร้อนจัด ทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรส และปริมาณไปในระหว่างกระบวนการ

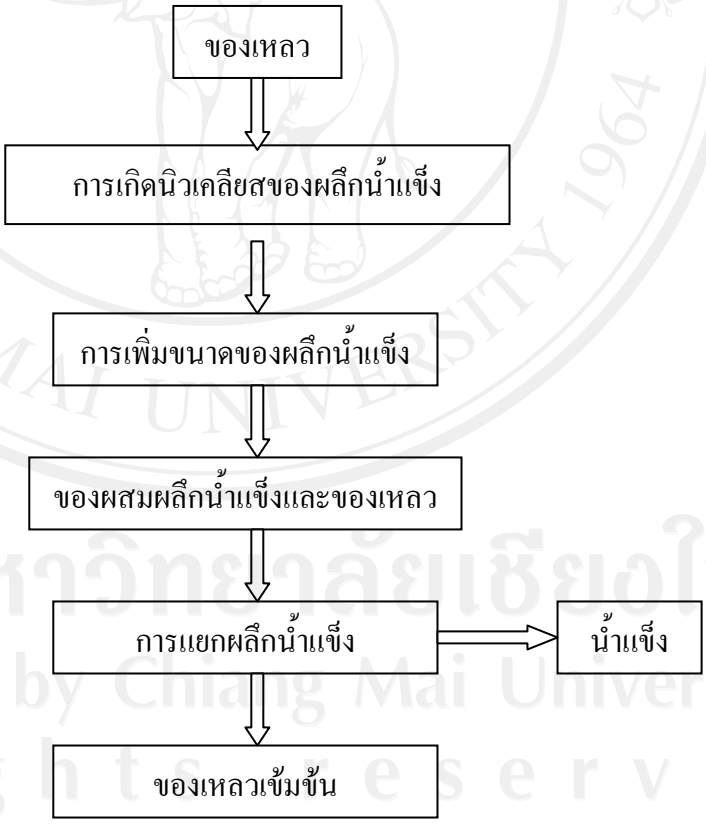
2.4 การทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง (Freeze concentration)

การทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งเป็นการทำให้อาหารที่เป็นของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งมีหลักการคือการลดอุณหภูมิของอาหารเหลวให้ต่ำลงจนกระทั่งอาหารบางส่วนแข็งตัว อาหารในช่วงนี้มีลักษณะเป็นกึ่งของเหลวกึ่งของแข็ง (slurry) เพราะในอาหารเหลวประกอบด้วยผลึกน้ำแข็ง (ice crystal) อยู่รวมกับส่วนที่เป็นของเหลว ทำให้อาหารมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากน้ำในอาหารเหลว บางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็ง ถ้าผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสม ผลึกน้ำแข็งที่ได้จะมีความบริสุทธิ์มาก แทบจะไม่มีองค์ประกอบอื่น ๆ ของอาหารเข้าไปอยู่ในผลึกน้ำแข็ง เมื่ออาหารเหลวมีลักษณะเป็น slurry แล้วผลึกน้ำแข็งจะถูกแยกออกจากของเหลว โดยมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของเหลวติดไปกับผลึกน้ำแข็งน้อยที่สุด ดังนั้นผลิตภัณฑ์ ที่ได้คืออาหารเหลวที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2-1 ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง (ice crystal nucleation) ในอาหาร และต่อด้วยขั้นตอนการเพิ่มขนาดของนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง (crystal growth) เพื่อให้ได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเหมาะสม จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการแยกผลึกน้ำแข็ง (separation) ออกจากอาหารเหลวที่เข้มข้นเพิ่มขึ้น

การทำให้อาหารเข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งกระทำในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ไม่มีการใช้ความร้อน จึงมีข้อดีกว่าการระเหย และ reverse osmosis ดังนั้นคุณภาพของอาหารจึงไม่ถูกทำลาย เหมาะกับอาหารที่ไม่ควรให้ความร้อน ไม่มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสของอาหาร สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ได้โดยไม่มีการสูญเสียแอลกอฮอล์แต่อย่างใด อาหารเข้มข้นที่ได้มีอุณหภูมิต่ำจึงสะดวกในการนำไปผ่านกระบวนการอื่น ๆ ที่ต้องกระทำที่อุณหภูมิต่ำต่อไปได้ทันที เช่น นำเข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (วสันต์, 2550ก)



ภาพ 2.1 กระบวนการพื้นฐานของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง

ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550ก)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการ 2 หน่วย ได้แก่ หน่วยของการเกิดผลึก (crystallization) และหน่วยสำหรับแยกผลึกน้ำแข็ง (separation unit) ดังนี้

2.4.1. หน่วยของการเกิดผลึก

การเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารเหลว มี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง ในหน่วยนี้ต้องมีการควบคุมให้เกิดผลึกน้ำแข็งอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งอาหารเหลว และเป็นผลึกน้ำแข็งที่เหมาะสมแก่ขั้นตอนการแยก นั่นคือ ผลึกน้ำแข็งควรมีรูปร่างกลม มีขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวเข้มข้นได้ง่าย และลดปริมาณอาหารเหลวเข้มข้นที่ติดไปกับผลึกน้ำแข็ง (รุ่งนภา, 2535)

การเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal formation)

การศึกษาลักษณะผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นภายในอาหารระหว่างกระบวนการแช่แข็งนั้นเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากขนาดและรูปร่าง (configuration) ของผลึกน้ำแข็งล้วนมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการเกิดผลึกจะเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอนคือ

(1) การเกิดผลึก (Crystal formation) หรือที่เรียกว่า นิวคลีเอชัน (Nucleation)

นิวคลีเอชันเป็นจุดเริ่มต้นของการแช่แข็ง ที่ก่อให้เกิดนิวคลีไอ (nuclei) ขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์กลางของผลึกต่อไป ในทางวิชาการอาจกล่าวได้ว่า นิวคลีเอชัน เป็นการกำเนิดอนุภาคที่เล็กที่สุดในสถานะเสถียรแปลกปลอม (a foreign stable phase) ที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง โดยทั่วไปแล้วนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ โฮโมจีเนียส (homogeneous) และเฮทเทอร์โรจีเนียส (heterogeneous) ซึ่งแบบแรกนั้นจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยเฉพาะในระบบที่น้ำถูกทำให้บริสุทธิ์อย่างมาก โดยนิวคลีไอจะเป็นกลุ่มของโมเลกุลน้ำที่รวมตัวกันอย่างสุ่ม ส่วนการเกิดแบบเฮทเทอร์โรจีเนียสนั้นอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีอยู่ในสารละลายจะกระทำตัวเป็นนิวคลีไอแล้วเกิดเป็นผลึกขึ้น อนุภาคเหล่านี้ต้องมีโครงสร้างผลึกคล้ายกับที่เกิดจากน้ำแข็ง นอกจากนี้ ผลจากการกระทำเชิงกล (mechanical impact) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายล้วนมีผลต่อการเกิดนิวคลีเอชันแบบหลังทั้งสิ้น

เนื่องจากนิวคลีเอชันเป็นสิ่งสำคัญมากในการหาอัตราเร็วของการแช่แข็ง และโครงสร้างผลึกที่เกิดในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้มีผู้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดนิวคลีเอชั่น ซึ่งแสดงให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เห็นว่าหลังจากการทำให้เย็นยิ่งยวด (supercooling) ที่มีลักษณะเฉพาะหนึ่ง ๆ จะเกิดนิวคลีเอชัน และอัตราการเกิดจะเร็วมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

(2) การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Crystal growth)

การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งเป็นขั้นตอนที่สองของการเกิดผลึกน้ำแข็ง เกิดขึ้นหลังจากเกิดนิวคลีไอขึ้นในจำนวนที่มากพอค่าหนึ่ง อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะขึ้นกับปัจจัยดังนี้

- อัตราที่โมเลกุลน้ำทำปฏิกิริยาที่ผิวของผลึก
- อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำจากสารละลายที่ยังไม่แข็งตัวไปยังผิวผลึก
- อัตราความร้อนที่ถูกกำจัดออกไป (ความร้อนของการเกิดผลึก)

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วล้วนขึ้นกับอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ การเพิ่มขนาดของผลึกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิใกล้กับจุดหลอมเหลวและอัตราการเติบโตจะเพิ่มขึ้นปานกลาง เมื่ออัตราการกำจัดความร้อนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ นั้นจะก่อให้เกิดความหนืดสูง อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกจะลดลง

ขนาดของผลึกน้ำแข็งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการแช่เยือกแข็ง จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ขนาดของผลึกน้ำแข็งนี้จะขึ้นกับจำนวนของนิวคลีไอที่เกิดขึ้น ระหว่างการแช่แข็งคือ ถ้าเกิดนิวคลีไอจำนวนเล็กน้อยจะได้ผลึกขนาดใหญ่ แต่ถ้าเกิดนิวคลีไอจำนวนมาก ก็จะได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมากด้วย เนื่องจากการเกิดนิวคลีไอจะขึ้นกับระดับการทำให้เย็นยิ่งยวด (super cooling) ดังนั้นขนาดของผลึกที่ได้จึงขึ้นกับอัตราการแช่แข็งด้วย ถ้าอัตราการกำจัดความร้อนช้า (อัตราการแช่แข็งช้า) นิวคลีไอที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ถ้าความร้อนถูกกำจัดออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จะเกิดนิวคลีไอจำนวนมากและมีการเพิ่มขนาดที่จำกัดสำหรับแต่ละผลึก สรุปได้ว่าขนาดเฉลี่ยของผลึกภายในผลิตภัณฑ์จะเป็นปฏิภาคกลับกับจำนวนนิวคลีไอและอัตราการกำจัดความร้อนออกไปจะเป็นตัวควบคุมจำนวนนิวคลีไอ ขนาดของผลึกน้ำแข็งจะขึ้นอยู่กับเครื่องแช่เยือกแข็ง ซึ่งมีอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตาราง 2.2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2.2 ชนิดของเครื่องแช่เยือกแข็ง

เครื่องแช่เยือกแข็งที่สารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารโดยตรง	เครื่องแช่เยือกแข็งที่สารให้ความความเย็นไม่สัมผัสกับอาหาร	
	การเย็นลงของอาหารและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นบริเวณเดียวกัน	การเย็นตัวของอาหารและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นคนละบริเวณ
1. Expanding refrigerant 2. Vacuum vaporization of solvent	1. Progressive crystallizers 2. Suspension crystallizers	1. Supercooled feed 2. Suspension recirculation 3. Liquid recirculation

ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550ก)

2.4.1.1 เครื่องแช่เยือกแข็งที่สารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารโดยตรง

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบนี้สารให้ความเย็นจะสัมผัสกับอาหารเหลวโดยตรง สารให้ความเย็นที่ใช้กันได้แก่ ฟรีออนและบิวเทน เป็นต้น ที่ความดันสูงสารให้ความเย็นจะมีสถานะเป็นของเหลวส่วนที่ความดันต่ำสารให้ความเย็นจะมีสถานะเป็นก๊าซ สารให้ความเย็นจะถูกฉีดออกมาด้วยความดันสูง สารให้ความเย็นจึงมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อสารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารเหลวความดันจะต่ำลง สารจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ในขณะเดียวกันก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอาหารเหลว ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้นในอาหารเหลว เรียกเครื่องแช่เยือกแข็งแบบนี้ว่า bubbling of expanding refrigerant อีกรูปแบบหนึ่งคือแบบ vacuum vaporization of solvent วิธีนี้นิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีและในการเปลี่ยนน้ำทะเลให้กลายเป็นน้ำจืด แต่ไม่นิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นอาหารเหลว โดนเป็นเครื่องแช่เยือกแข็งที่ภายในเป็นสุญญากาศสูงมากจนน้ำในสารละลายกลายเป็นไอ ไอน้ำจะสัมผัสกับสารให้ความเย็นแล้วไอน้ำจะควบแน่นเป็นผลึกน้ำแข็ง เนื่องจากในเครื่องแช่เยือกแข็งแบบนี้จะมีไอน้ำอยู่รวมกับน้ำที่มีสถานะเป็นของเหลว หากใช้วิธีนี้กับอาหารเหลวจะทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสที่ระเหยได้ของอาหารเหลวไปกับไอน้ำ ทำให้คุณภาพของอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ไม่ดีไปกว่าการทำให้เข้มข้นโดยการระเหย เป็นเหตุผลสำคัญที่ไม่นิยมใช้วิธีนี้ในการทำให้อาหารเหลวเข้มข้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.1.2 เครื่องแช่เยือกแข็งที่สารให้ความเย็นไม่สัมผัสกับอาหารโดยตรง

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากกว่าแบบที่สารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารเหลวโดยตรง เพราะแบบที่สารให้ความเย็นสัมผัสกับอาหารโดยตรงนั้นจะมีไอและของเหลวอยู่ด้วยกันซึ่งจะทำให้กลิ่นรสของอาหารสูญเสียไปได้ สำหรับแบบที่สารให้ความเย็นไม่สัมผัสกับอาหารโดยตรงจะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารให้ความเย็นกับอาหารเหลวผ่านผนังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบนี้แบ่งออกเป็น เครื่องที่การเย็นลงของอาหารเหลวและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกัน (internally cooled crystallizers) และเครื่องที่การเย็นตัวลงของอาหารเหลวและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นที่คนละบริเวณ (externally cooled crystallizers)

เครื่องแช่เยือกแข็งที่การเย็นลงของอาหารเหลวและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกัน แบ่งย่อยได้เป็น

(1) Layer / Progressive crystallizers มีหลักการคือ ผลึกน้ำแข็งจะเกิดชั้นบาง ๆ บนผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จนกระทั่งได้ความหนาที่เหมาะสมของชั้นน้ำแข็ง จึงปาดเอาชั้นน้ำแข็งส่วนนี้ออกแล้วนำ crystal slurry ไปเข้าเครื่องแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวที่เข้มข้นขึ้น เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ rotating drum freezer จัดเป็นตัวอย่างหนึ่งของ progressive crystallizers โดยส่วนหนึ่งของถังจะจุ่มอยู่ในอาหารเหลวเริ่มต้น แล้วเกิดผลึกน้ำแข็งบนผิวของถังเมื่อหมุนขึ้นจากอาหารเหลวจนมาถึงตำแหน่งที่มีใบมีด ใบมีดจะขูดเอาชั้นน้ำแข็งออกจากผิวของถัง

(2) Suspension crystallizers อาหารเหลวจะถูกกวนอยู่ในภาชนะทรงกระบอก (vessel) ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของ vessel ภาชนะทรงกระบอกนี้อาจจะเป็น scraped-surface heat exchanger หรือ jacketed kettle vessel ก็ได้ ผลึกน้ำแข็งจะเกิดภายใน vessel โดยแขวนลอยอยู่ในอาหารเหลวที่เข้มข้น จากนั้นจึงนำ crystal slurry ไปเข้าเครื่องแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวต่อไป

เครื่องแช่เยือกแข็งที่การเย็นลงของอาหารเหลวและการเกิดผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นที่คนละบริเวณแบ่งย่อยได้ดังนี้

(1) Supercooled feed มีวิธีการคือ ให้อาหารเหลวเริ่มต้นผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำให้อาหารเหลวเย็นลงแต่ต้องไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็ง จากนั้นนำอาหารเหลวที่เย็นนี้ไปข้า main crystallization vessel ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ ที่ main vessel นี้เป็นบริเวณที่จะทำให้เกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง และการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง จากนั้นก็นำ crystal slurry ไปเข้าเครื่องแยกผลึกน้ำแข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(2) Suspension recirculation เป็นการปรับปรุงการแช่แข็งให้ดียิ่งขึ้น โดยนำอาหารเหลวเริ่มต้นมาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ scraped surface เพื่อให้เกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็ง และเข้าสู่ main vessel ซึ่งที่ส่วนนี้จะมีการเพิ่มขนาดของน้ำแข็ง จากนั้นนำ crystal slurry ทั้งหมดมาหมุนเวียน (recycle) เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ scraped surface และ main vessel อีกจนกว่าจะได้ผลึกน้ำแข็งตามที่ต้องการ จากนั้นนำ crystal slurry ไปเข้าเครื่องแยกผลึกน้ำแข็งและของเหลวเข้มข้นออกจากกัน

(3) Liquid recirculation มีลักษณะคล้ายกับ suspension recirculation ตรงที่การนำของเหลวเริ่มต้นมาผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ scraped surface เพื่อให้เกิดนิวเคลียสของผลึกน้ำแข็งและเข้าสู่ main vessel จะมีเครื่องกรองเพื่อแยกเอาผลึกน้ำแข็งไว้ใน main vessel แต่ส่วนของของเหลวเข้มข้นจะไหลผ่านออกมา แล้วถูกปั๊มหมุนเวียนกลับไปเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ main vessel ตามลำดับอีก เมื่อหมุนเวียนจนกระทั่งได้ผลึกตามที่ต้องการก็จะนำ crystal slurry ไปเข้าเครื่องแยกผลึก วิธี liquid recirculation เป็นวิธีที่ทำให้ได้ผลึกขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.4.2. หน่วยสำหรับแยกผลึกน้ำแข็ง

เครื่องแยกผลึกน้ำแข็งกับส่วนของเหลวเข้มข้นออกจากกันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบดังแสดงในภาพ 2.2

ภาพ 2.2 เครื่องแยกผลึกน้ำแข็ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(1) เครื่องแยกผลึกน้ำแข็งแบบกด (Hydraulic piston) จะใช้กับเครื่องแช่เยือกแข็งแบบ progressive crystallizers โดยใช้แรงกดในการแยกส่วนของเหลวเข้มข้นออกจากผลึกน้ำแข็ง อุปกรณ์ที่ใช้กดอาจจะเป็นลูกสูบไฮโดรลิกหรือสกรู การใช้เครื่องกดเป็นวิธีที่ค่าใช้จ่ายไม่สูง แต่ไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพาะส่วนของเหลวเข้มข้นที่จะติดไปกับผลึกน้ำแข็งค่อนข้างมาก ในปัจจุบันจะใช้เครื่องกดร่วมกับเครื่องแยกแบบอื่นซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป ทั้งนี้เพื่อให้ต้นทุนของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งไม่สูงจนเกินไป

(2) เครื่องแยกผลึกน้ำแข็งแบบหมุนเหวี่ยง (Filtering centrifuges) ซึ่งจะสามารถกรองผลึกน้ำแข็งได้ในตัว โดยอาศัยหลักการที่ว่า ความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งกับส่วนของเหลวเข้มข้นมีค่าไม่เท่ากัน ส่วนของเหลวเข้มข้นมีความหนาแน่นมากกว่าผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นจะถูกหมุนเหวี่ยงไปได้ไกลกว่า ส่วนของเหลวเข้มข้นจึงเป็นส่วนที่อยู่ติดผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งที่ผนังของเครื่องหมุนเหวี่ยงจะเป็นตัวกรองโดยรอบ ของเหลวเข้มข้นสามารถไหลผ่านตัวกรองออกไปได้ แต่ผลึกน้ำแข็งจะติดอยู่ภายในเครื่องหมุนเหวี่ยง ในช่วงท้าย ๆ ของการหมุนเหวี่ยงจะมีการเติมน้ำลงในเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อให้แน่ใจว่าของเหลวเข้มข้นถูกแยกออกไปได้หมดไม่มีหลงเหลืออยู่กับผลึกน้ำแข็ง ดังนั้นจึงมีน้ำส่วนหนึ่งถูกเหวี่ยงออกไปกับของเหลวเข้มข้นด้วย จึงทำให้ความเข้มข้นของของเหลวเข้มข้นลดลงเล็กน้อย นอกจากนั้นยังพบว่ามีการสูญเสียกลิ่นรสของอาหารไปบางส่วน ทั้งนี้เพราะในระหว่างการหมุนเหวี่ยงจะเกิดช่องว่างอากาศบริเวณตรงกลางของเครื่องเหวี่ยง ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการแยกของเครื่องหมุนเหวี่ยง ได้แก่ความเร็วรอบในการหมุน ขนาดของผลึก การกระจายขนาดของผลึก รูปร่างของผลึก และความข้นหนืดของของเหลวเข้มข้น

(3) เครื่องแยกผลึกน้ำแข็งแบบคอลัมน์ (Wash column) เป็นเครื่องที่นิยมใช้กันมากในโรงงานที่ผลิตอาหารเหลวเข้มข้น เพราะได้มีการพัฒนาเครื่องให้มีประสิทธิภาพในการแยกสูง wash column มีลักษณะเป็นคอลัมน์แนวตั้ง เครื่องจะแยกให้ผลึกน้ำแข็งเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ในขณะที่ของเหลวเข้มข้นจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ที่บริเวณล่างสุดของคอลัมน์จะมีตัวกรองทำให้เฉพาะส่วนของเหลวเข้มข้นเท่านั้นที่ไหลผ่านไปได้ wash column ถูกแบ่งออกเป็นสามชนิด โดยจำแนกตามลักษณะของแรงที่ใช้ในการแยก ดังนี้

Buoyancy bed column ใช้หลักการความแตกต่างของความหนาแน่นของผลึกน้ำแข็งกับของเหลวเข้มข้นเพียงอย่างเดียว วิธีนี้ประสิทธิภาพในการแยกจะต่ำ

Screw conveyer หรือ Spiral column จะมี screw หรือ spiral mixer ช่วยพาผลึกน้ำแข็งเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนขอคอลัมน์แล้วถูกแยกออกไป ส่วนของเหลวเข้มข้นจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างของคอลัมน์แล้วผ่านตัวกรองออกไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

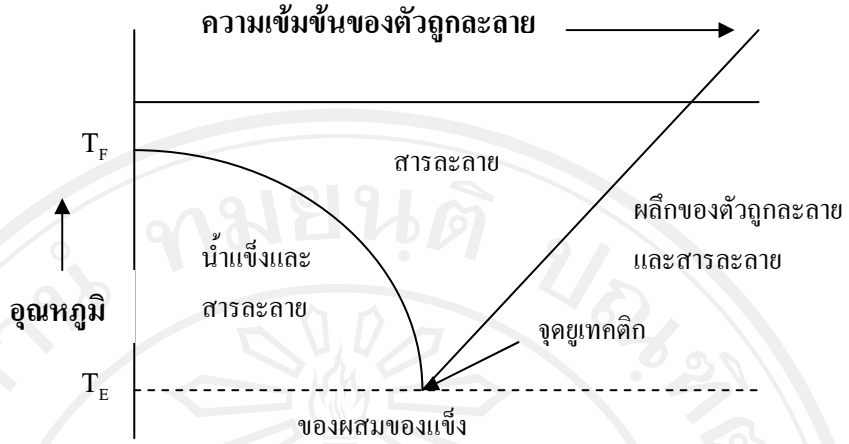
Piston bed column ภายในคอลัมน์จะมีลูกสูบอยู่ ด้านล่างของลูกสูบจะมีรูเปิดเล็ก ๆ (porous) เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นก็จะเกิดแรงผลักดันให้ผลึกน้ำแข็งเคลื่อนที่ขึ้นไป ส่วนของเหลวเข้มข้นจะเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ทำให้ด้านบนของลูกสูบมีลักษณะเป็น packed bed ของผลึกน้ำแข็ง ต่อมาเมื่อน้ำแข็งทางด้านบนของ pack bed หลอมเหลวเป็นน้ำก็จะไหลชะเอาของเหลวเข้มข้นลงมาด้วย

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกน้ำแข็ง

(1) การลดลงของจุดเยือกแข็งและการเกิดจุดยูเทคติก (Eutectic)

ในระหว่างการแช่เยือกแข็งอาหารเหลว ถ้าอาหารนั้นมีตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เกลือ น้ำตาล ตัวถูกละลายเหล่านี้ทำให้อาหารเหลวไม่แข็งตัวที่ 0 องศาเซลเซียส แต่จะแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส และจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของตัวถูกละลาย ยิ่งมีปริมาณตัวถูกละลายอยู่มากยิ่งทำให้จุดเยือกแข็งของอาหารเหลวต่ำลงยิ่งขึ้น และระหว่างการแช่แข็งจุดเยือกแข็งของอาหารเหลวจะยิ่งลดลง ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของส่วนที่เป็นของเหลวยิ่งเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมาถึงจุดยูเทคติก ของตัวถูกละลายแต่ละชนิด ก็จะเริ่มเกิดผลึกของแข็งของตัวถูกละลายชนิดนั้น ๆ ขึ้นด้วย กล่าวคือ ถ้าแช่แข็งอาหารเหลวให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดยูเทคติก ความเข้มข้นอาหารเหลวเพิ่มมากจนตัวถูกละลายตกผลึกได้ ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่ผลึกน้ำแข็งบริสุทธิ์แต่จะเป็นผลึกน้ำแข็งที่มีผลึกของตัวถูกละลายปนอยู่ในนั้นด้วย เรียกว่า solid mixture เมื่อเกิดลักษณะนี้ขึ้นจะทำให้ส่วนที่มีสถานะเป็นผลึกของแข็ง (solid phase) และส่วนที่มีสถานะเป็นของเหลว (liquid phase) มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่สามารถแยกสองส่วนนี้ออกจากกันได้ phase diagram จะแสดงสภาวะที่เป็นไปได้ในการทำให้อาหารเหลวชนิดเข้มข้นโดยการแช่แข็ง กล่าวคือ phase diagram ทำให้ทราบถึงช่วงของอุณหภูมิและช่วงของความเข้มข้นของอาหารเหลวที่เป็นไปได้ในการทำแห้งโดยการแช่แข็ง ดังเช่นตัวอย่าง phase diagram ของสารละลายน้ำตาลในภาพ 2.3 (วสันต์, 2550ก)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2.3 Phase diagram แสดงจุดยูเทคติกของสารละลายน้ำตาล
ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550ก)

(2) วิธีการเตรียมอาหารเหลวก่อนนำอาหารเหลวไปแช่แข็ง

ประสิทธิภาพของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะสูงขึ้นได้หากมีการเตรียมอาหารเหลวให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของอาหารเหลว เช่น ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ หรือโดยใช้วิธีการแยกทางกายภาพ เช่น การหมุนเหวี่ยงและการกรอง เพื่อแยกองค์ประกอบบางอย่างออกไปจากอาหารเหลว เช่น การแยกองค์ประกอบพวกเศษเนื้อ และเพคตินออกไป

การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในน้ำผลไม้ทำได้โดยนำน้ำผลไม้ไปให้ความร้อน ซึ่งจะเป็นการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้และทำลายเอนไซม์เพคติเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำให้น้ำผลไม้ขุ่น การใช้ความร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านจุลชีววิทยาและมีความใส โดยไม่ทำให้คุณภาพด้านอื่น ๆ ของผลิตภัณฑ์สูญเสียไป ตัวอย่างเช่น น้ำองุ่น pH 3.0 3.5 และ 3.8 ถ้าถูกทำให้ความร้อน 0.8 วินาที ที่อุณหภูมิ 88 93 และ 96 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เพคติเนสได้อย่างสมบูรณ์ การแยกเศษเนื้อออกไปแล้วมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการแยกจะสูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียตัวถูกละลายไปในขั้นตอนการแยกด้วยเครื่องแยกแบบคอลัมน์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(3) ความหนืดของอาหารเหลว

โดยทั่วไปแล้วเมื่อความเข้มข้นของอาหารเหลวเพิ่มขึ้น ความหนืดของอาหารเหลวจะเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่น น้ำเชื่อมที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถ้ามีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ และ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีความหนืด 3.8 และ 93.9 เซนติพอยส์ ตามลำดับ ความหนืดที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของอาหารเหลวสูงที่จะทำได้ เพราะประสิทธิภาพในการแยกผลึกน้ำแข็งออกจากอาหารเหลวเข้มข้นจะลดลงหากความหนืดของอาหารเหลวสูงขึ้น ในบางระบบได้แก้ไขปัญหานี้โดยทำการอยกผลึกน้ำแข็งหลาย ๆ ครั้ง ความหนืดยังมีผลต่อขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งด้วย โดยอัตราการเพิ่มขนาดผลึกน้ำแข็งจะช้าลงหากความหนืดของอาหารเหลวสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น ในสารละลายที่มีองค์ประกอบพวกน้ำตาล โปรตีน และสตาร์ช (starch) ซึ่งองค์ประกอบพวกนี้ทำให้สารละลายมีความหนืดมากกว่าน้ำ พบว่าสารละลายที่มีองค์ประกอบเหล่านี้จะมีอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งช้ากว่าอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งในน้ำบริสุทธิ์ ความหนืดที่เพิ่มขึ้นในอาหารเหลวบางชนิดจะสามารถป้องกันการเกิดนิวเคลียสของผลึกของตัวถูกละลายได้ ซึ่งก็จะช่วยให้การแช่เยือกแข็งดำเนินต่อไปได้แม้ว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่าจุดยูเทคติก แล้วก็ตาม ทั้ง ๆ ที่การเพิ่มของความหนืดจะยับยั้งอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งก็ตาม

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน ดังนี้

(1) ความเข้มข้นของอาหารที่ได้ต่ำกว่าอาหารที่ได้จากวิธีการระเหย ถ้าใช้วิธีการระเหยจะทำให้ได้อาหารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70-90 แต่ถ้าใช้การทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็งจะได้อาหารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40-50 เนื่องมาจากความหนืดของส่วนเหลวเพิ่มขึ้นนั่นเอง

(2) ค่าใช้จ่ายสูงกว่าวิธีระเหยและวิธีการระเหยและวิธีการ reverse osmosis ค่าใช้จ่ายสูงมากทั้งการลงทุน (capital cost) ค่าใช้จ่ายระหว่างการปฏิบัติงาน และค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียส่วนของเหลวเข้มข้นไปกับผลึกน้ำแข็งในระหว่างกระบวนการแยกผลึกน้ำแข็ง

(3) ถ้าอาหารเหลวเริ่มต้นมีคุณภาพต่ำจะมีกลิ่นรสที่ไม่ดี หากนำมาทำให้เข้มข้นโดยการแช่เยือกแข็ง กลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์จะยังคงมีในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ เช่น ถ้านำน้ำผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปมาทำให้เข้มข้นโดนการแช่เยือกแข็ง จะมีกลิ่นผลไม้ที่สุกเกินไปหลงเหลืออยู่ในอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ ซึ่งถ้าหากนำน้ำผลไม้จากผลไม้ที่สุกเกินไปไปทำให้เข้มข้นโดนการระเหยกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์นี้จะหายไป

อย่างไรก็ตามเมื่อคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้ววิธีนี้ยังเหมาะกับการผลิตอาหารคุณภาพดีเลิศที่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่สูงกว่าอาหารเกรดปกติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 การแช่เยือกแข็ง (Freezing)

การแช่เยือกแข็งเป็นกรรมวิธีการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำลงกว่าจุดเยือกแข็งโดยส่วนของน้ำจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกน้ำแข็ง การตรึงน้ำกับน้ำแข็งและผลจากการเข้มข้นขึ้นของตัวถูกละลายในน้ำที่ยังไม่แข็งตัวจะทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (water activity; a_w) ของอาหารลดลง (วิไล, 2547)

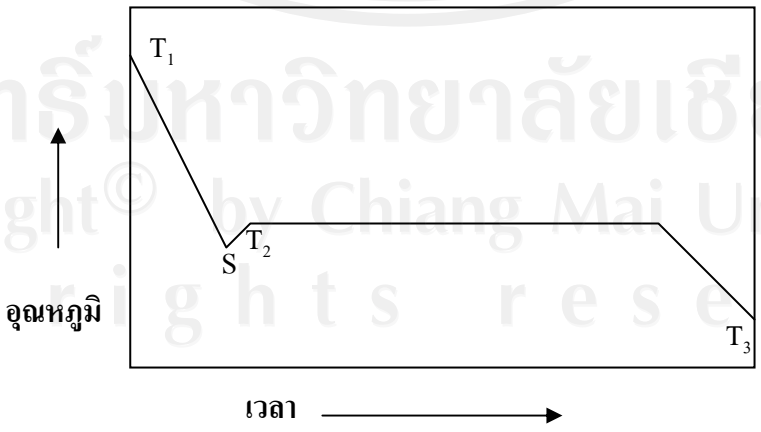
2.5.1 ทฤษฎี

เป็นการกำจัดความร้อนสัมผัสออกในระหว่างการแช่เยือกแข็งทำให้อุณหภูมิของอาหารลดลงสู่จุดเยือกแข็ง ความร้อนแฝงในการตกผลึกจะถูกกำจัดออกไปและทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขึ้น ความร้อนแฝงของอาหารส่วนอื่น ๆ เช่น ไขมัน จะต้องถูกกำจัดออกไปเช่นกันก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว อย่างไรก็ตามอาหารส่วนใหญ่จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนสูง ส่วนประกอบอื่น ๆ ต้องการความร้อนสำหรับการตกผลึกเพียงเล็กน้อย น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะ (4,200 จูลล์/กิโลกรัม เคลวิน) และค่าความร้อนแฝงสำหรับการหลอมเหลวสูง (335 จูลล์/กิลกรัม เคลวิน) จึงต้องใช้พลังงานในการแช่เยือกแข็งอาหารสูงด้วย

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์และอาหาร

(1) การแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์

สามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง ดังแสดงในรูป 2.3 อธิบายได้ดังนี้ (วสันต์, 2550 ข)



ภาพ 2.4 กราฟการแช่เยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์
ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550 ข)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ช่วงที่ 1 (T_1-S) เมื่อแช่แข็งน้ำซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้น T_1 อุณหภูมิของน้ำจะลดลงต่ำลง เนื่องจากมีการคายความร้อนสัมผัส (sensible heat) ของน้ำ (ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 5.6 แคลลอรี่ / กรัม) จนถึงจุดทำให้เย็นยิ่งยวด (supercooling; S) ณ จุดนี้อุณหภูมิของน้ำลดต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียส แต่ยังไม่เกิดผลึกน้ำแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นเสมอก่อนที่จะเกิดผลึกน้ำแข็ง

ช่วงที่ 2 (S-T_2) เมื่อเริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งจะมีการคายความร้อนของการเกิดผลึกหรือความร้อนแฝง (latent heat) ออกมา (ความร้อนแฝงของการหลอมละลายของน้ำแข็งเท่ากับ 80 แคลลอรี่ / กรัม) ทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเยือกแข็งของน้ำหรือ T_2

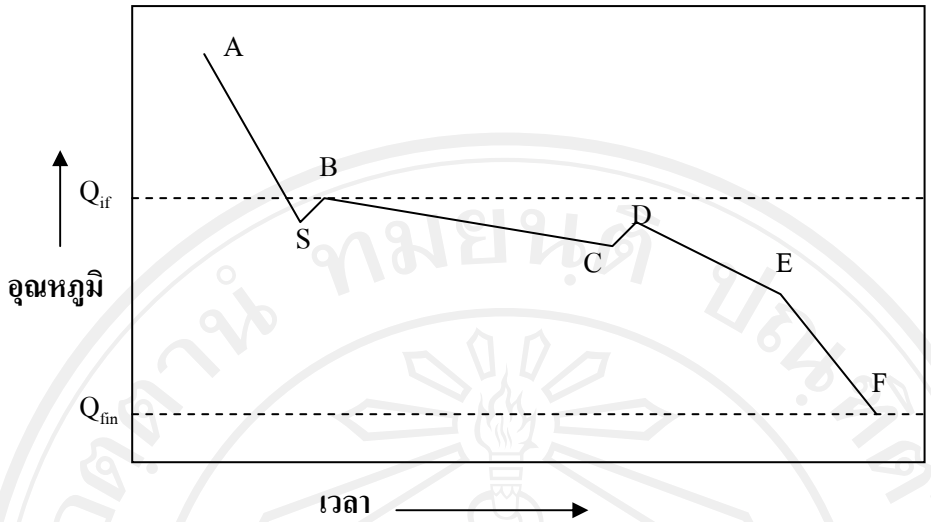
ช่วงที่ 3 (คงที่ที่ T_2) เป็นการเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นน้ำแข็งโดยอุณหภูมิจะคงที่ที่ 0 องศาเซลเซียส ในระหว่างนี้ยังคงมีการคายความร้อนแฝงออกมาจนกระทั่งน้ำกลายเป็นน้ำแข็งหมด

ช่วงที่ 4 เมื่อน้ำกลายเป็นน้ำแข็งจนหมดแล้ว หากยังคงทำการแช่แข็งต่อไป อุณหภูมิน้ำแข็งจะลดลงไปจนกว่าจะเท่ากับอุณหภูมิของเครื่องแช่เยือกแข็ง (T_3) ในช่วงนี้จะมีการคายความร้อนสัมผัสของน้ำแข็ง (ความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งเท่ากับ 0.267 แคลลอรี่ / กรัม)

(2) การแช่แข็งของน้ำบริสุทธิ์และอาหาร

การแช่แข็งอาหารหรือสารละลายใด ๆ นั้นมีความแตกต่างจากการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์ เพราะน้ำในอาหารไม่ใช่น้ำบริสุทธิ์ แต่อาหารเป็นระบบของน้ำที่มีตัวถูกละลาย สารแขวนลอย และเซลล์อาหารอยู่ด้วย ทำให้จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของอาหาร หรืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดผลึกน้ำแข็งต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ และระหว่างที่เกิดผลึกน้ำแข็งในอาหาร อุณหภูมิของอาหารจะไม่คงที่ และอุณหภูมิจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ เรียกว่า จุดเยือกแข็งลดต่ำลง (freezing point depression) เพราะความเข้มข้นของอาหารจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำบางส่วนได้เปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็ง พิจารณาการแช่แข็งสารละลายชนิดหนึ่งที่มีตัวถูกละลายหนึ่งชนิด จะได้กราฟการแช่เยือกแข็งดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 6 ช่วง (วสันต์, 2550 ข) คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 2.5 ความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิในขณะการแช่เยือกแข็งสารละลาย
ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550 ข)

ช่วงที่ 1 (A-S) เมื่อแช่แข็งสารละลายที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่จุด A อุณหภูมิของสารละลายจะลดลงในช่วงนี้มีการคายความร้อนสัมผัส (sensible heat) ออกมา อุณหภูมิของสารละลายจะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (0 องศาเซลเซียส) และต่ำกว่าจุดเยือกแข็งเริ่มต้นของสารละลายนี้ (B) จนกระทั่งถึงจุดทำให้เย็นยิ่งยวด (S) ณ จุดนี้น้ำในสารละลายยังคงเป็นของเหลว

ช่วงที่ 2 (S-B) เมื่อน้ำในสารละลายเริ่มกลายเป็นน้ำผลึกน้ำแข็งจะมีการคายความร้อนแฝงในการเกิดผลึกน้ำแข็งทำให้อุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเยือกแข็งเริ่มต้นของสารละลาย (B)

ช่วงที่ 3 (B-C) เป็นช่วงที่น้ำในสารละลายกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง มีการคายความร้อนแฝงเช่นเดียวกับช่วงที่ 2 ในช่วงนี้อุณหภูมิของสารละลายจะลดต่ำลง ไม่คงที่เหมือนการแช่แข็งน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากว่าเมื่อน้ำบางส่วนกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง ตัวถูกละลายในน้ำที่ไม่แข็งตัว (unfrozen water) จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้จุดเยือกแข็งของส่วนที่ยังไม่แข็งตัวลดต่ำลงไปอีก

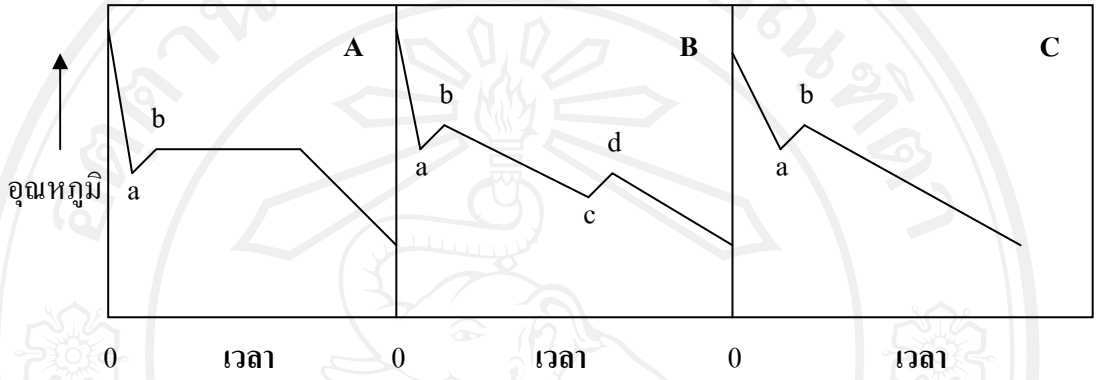
ช่วงที่ 4 (C-D) เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (supersaturated) และตกผลึกจะมีการคายความร้อนแฝงในการเกิดผลึกของตัวถูกละลายนั้น ทำให้อุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ความร้อนส่วนนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนแฝงของน้ำแข็ง

ช่วงที่ 5 (D-E) ในช่วงนี้มีการเกิดผลึกทั้งผลึกของน้ำแข็งและผลึกของตัวถูกละลาย จุดเยือกแข็งยังคงลดต่ำลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ช่วงที่ 6 (E-F) เมื่อสารละลายแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว แต่ยังทำการแช่แข็งต่อไป อุณหภูมิของสารละลายที่แข็งตัวแล้วจะลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการ

สำหรับการแช่เยือกแข็งสารละลายที่มีตัวถูกละลายมากกว่าหนึ่งชนิด และการแช่เยือกแข็งอาหารมีโอกาสเกิดผลึกของตัวถูกละลายได้หลายครั้ง แต่ถ้าตัวถูกละลายมีปริมาณน้อย ๆ ก็จะเห็นช่วง C-D ไม่ชัด ดังแสดงในรูป 2.5



ภาพ 2.6 กราฟการแช่เยือกแข็งของสารชนิดต่าง ๆ A: สารละลาย A, B: สารละลาย B, C: อาหาร
ดัดแปลงจาก: วสันต์ (2550 ข)

Pardo (2002) ได้ศึกษาจุดเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งของน้ำกาแฟสกัดด้วยวิธี Differential scanning calorimeter (DSC) ได้สมการหาจุดเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งของน้ำกาแฟสกัดดังนี้

$$T_m = 4.18x_s^2 - 21.03x_s + 273.15 \qquad (2.1)$$

เมื่อ T_m = จุดเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งของน้ำกาแฟสกัด (องศาเคลวิน; K)
X_s = ปริมาณของแข็งในน้ำกาแฟ (กิโลกรัมของแข็ง / กิโลกรัมน้ำ)

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า จุดเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งของน้ำกาแฟสกัดขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งในน้ำกาแฟสกัด (solid content) แสดงว่าถ้าหากน้ำกาแฟสกัดมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น จุดเริ่มต้นการแช่เยือกแข็งก็จะลดลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.3 คุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่มีผลต่อการทำเข้มข้นแบบแช่เยือกแข็ง

สมบัติทางกายภาพและความร้อนของอาหารแช่แข็งแก่ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อนและความร้อนแฝง มีความจำเป็นต่อการคำนวณหาเวลาแช่แข็ง (freezing time) และปริมาณความร้อน (heat loads) ที่ต้องถ่ายเทออกในกระบวนการแช่แข็ง การคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารสามารถทำได้หากทราบชนิดและปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีในอาหาร

(1) ความหนาแน่น (Density)

นิยามความหนาแน่น คือ มวลหารด้วยปริมาตร ซึ่งมีหน่วยในระบบ SI เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg / m^3) ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกัน นับเป็นการยากที่จะสามารถวัดปริมาตรได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่น (Wang, 2006) ได้จากสมการ

$$\rho = \frac{m}{v_s} \qquad (2.2)$$

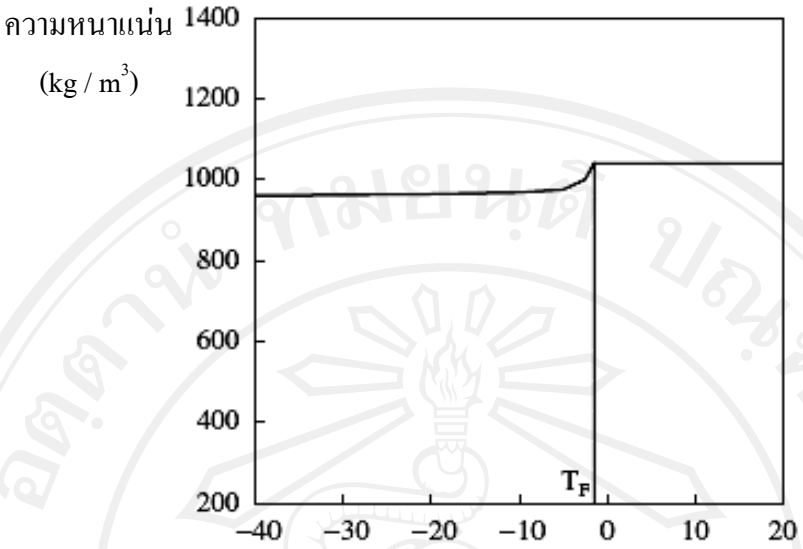
เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร)

m = มวล (กิโลกรัม)

v_s = ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

ในรูป 2.7 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในระหว่างการแช่แข็งของอาหารที่มีความชื้นสูง ซึ่งความหนาแน่นของส่วนที่ไม่ถูกแช่แข็ง (unfrozen) และส่วนที่ถูกแช่แข็งทั้งหมด (totally frozen foods) นั้นมีค่าคงที่ ในการแช่แข็งสตรอเบอร์รี่ในช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง -40 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 10 อย่างไรก็ตามในรูป 2.6 จะเห็นได้ว่ามีการลดลงของค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการแช่แข็ง (initial freezing) เนื่องมากจากสัดส่วนของปริมาตรน้ำแข็งเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.7 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในระหว่างการแช่แข็งของอาหารที่มีความชื้นสูง

ที่มา : Wang (2006)

(2) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นค่าที่บอกถึง อัตราความร้อนที่นำผ่านความหนาของวัตถุ 1 หน่วย เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างความหนานั้น 1 หน่วย ดังนั้นในระบบ SI หน่วยของค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนจะเป็น จูล / วินาที.เมตร องศาเคลวิน (J / s. m. K) หรือ วัตต์ / เมตร องศาเซลเซียส (W / m. ºC) (รุ่งนภา, 2535) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารบางชนิดได้แสดงไว้ในตาราง 2.2 ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารบางชนิด

ผลิตภัณฑ์	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ / เมตร องศาเซลเซียส)
แอปเปิ้ล	85.6	2-36	0.393
ซอสแอปเปิ้ล	78.8	2-36	0.516
น้ำแอปเปิ้ล	87.4	20	0.559
	87.4	80	0.632
	36.0	20	0.389
	36.0	80	0.436
นมสด	-	37	0.530
นมข้นหวาน	90	24	0.571
	-	78	0.641
	50	26	0.329
	-	78	0.364
น้ำส้ม	-	30	0.431
สตรอเบอร์รี่	-	14 to 25	0.675
น้ำตาล	-	29 – 62	0.087 – 0.22
น้ำแข็ง	-	0	2.25
น้ำ	-	0	0.57

ที่มา : รุ่งนภา (2535)

Sweat (1974) ได้สร้างสมการถดถอย เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารประเภทผักและผลไม้ที่มีปริมาณน้ำมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.148 + 0.493X_w \qquad (2.3)$$

เมื่อ X_w = สัดส่วนของน้ำในอาหาร (mass fraction of water in food)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(3) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความร้อนจำเพาะ เป็นปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือสูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเพื่อให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะ (รุ่งนภา, 2535)

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.4)$$

เมื่อ C_p = ความร้อนจำเพาะ (กิโลจูล / กิโลกรัม องศาเซลเซียส)

Q = ความร้อนที่รับหรือคายออก (กิโลจูล)

m = มวล (กิโลกรัม)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (องศาเซลเซียส)

ความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งขึ้นกับองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และความดัน ค่าความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น สมการหาค่านี้ในผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ดังนี้

$$C_p = 1.675 + 2.5X_w \quad (2.5)$$

เมื่อทราบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ สามารถใช้สมการต่อไปนี้

$$C_p = 1.424(C) + 1.549(P) + 1.675(F) + 0.837(A) + 4.187(mc)$$

เมื่อ C = สัดส่วนมวลของคาร์โบไฮเดรต

P = สัดส่วนมวลของโปรตีน

F = สัดส่วนมวลของไขมัน

A = สัดส่วนมวลของเถ้า

mc = สัดส่วนมวลของความชื้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในสภาวะ unsteady state ซึ่งเป็นสภาวะที่อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาไม่คงที่ เปลี่ยนไปตามเวลา จะมีปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิของตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของอาหาร และค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของอาหาร เมื่อนำเอาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหารด้วยความหนาแน่นและค่าความร้อนจำเพาะของอาหาร จะได้ค่า thermal diffusivity ดังแสดงในสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \qquad (2.6)$$

เมื่อ α = ค่าการแพร่ความร้อน (ตารางเมตร / วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำกาแฟ (กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร)

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะ (กิโลจูล / กิโลกรัม องศาเซลเซียส)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ / เมตร องศาเซลเซียส)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved