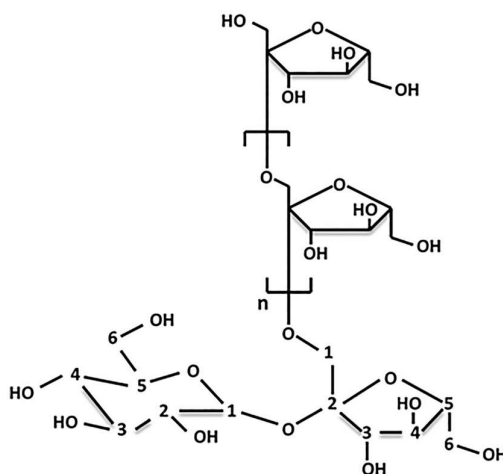


บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินนูลิน

ฟรุกแทน (Fructan) จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) และพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก ชนิด $\beta(2 \rightarrow 1)$ และ $\beta(2 \rightarrow 6)$ โดยฟรุกแทนที่สายพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) มีจำนวนโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตสระหว่าง 2 – 9 โมเลกุล จะเรียกว่า ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructooligosaccharide, FOS) หรือบางครั้งเรียกว่า โอลิโกฟรุกโตส (Oligofructose) ซึ่งมีความหวานเพียงประมาณ 30% เมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส และเมื่อสายพอลิเมอร์ประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตสมากกว่า 10 โมเลกุล (10 – 60 โมเลกุล) นั้นจะเรียกว่า อินนูลิน ซึ่งอาจมีน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อที่ปลายสายด้วย (Rubel et al., 2021; Bhanja et al., 2022) ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของอินนูลิน (ที่มา : Bhanja et al., (2022))

อินนูลินเป็นคาร์โบไฮเดรตจัดเป็นเส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำได้เกิดเป็นสารที่มีความหนืด (จารุพิชญา, 2563) โดยอินนูลินนั้นร่างกายไม่สามารถย่อยในระบบทางเดินอาหารและลำไส้เล็กของมนุษย์ได้เนื่องจากที่ตำแหน่ง Anomeric carbon มีโครงสร้างแบบบีต้า (β) ทำให้ทนต่อการ Hydrolysis โดยเอนไซม์เช่น แอลฟา-กลูโคซิเดส (α -glucosidase) ซูเครส (Sucrase) และ มอลเทส (Maltase) เป็นต้น ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบได้ในระบบทางเดินอาหาร (เอกภพ, 2555) จึงไม่ใหพลังงาน แต่แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ เช่น *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* สามารถย่อยอินนูลินเพื่อใช้เป็นอาหารได้ ในการทดลองนำอินนูลินให้ผู้บริโภคจำนวน 8 คน บริโภคอินนูลินวันละ 15 g เป็นระยะเวลา 15 วันพบว่าสามารถเพิ่มปริมาณ *Bifidobacterium* ได้ (สุพจน์, 2552) โดยแบคทีเรียเหล่านี้มีส่วนช่วยในการสร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย (Wang et al., 2020; ศิริพร และคณะ, 2555) อินนูลินจัดเป็นพรีไบโอติก (Prebiotics) ที่ช่วยเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่ดีต่อการทำงานในระบบทางเดินอาหารและส่งเสริมสุขภาพที่ดี อินนูลินนั้นสามารถพบได้ในพืชหลากหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 อีกทั้งการเลือกหัวแค้นตะวันสำหรับการสกัดอินนูลินนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พื้นที่เพาะปลูก ฤดูปลูกที่เหมาะสม สิ่งสำคัญคือหัวแค้นตะวันที่ใช้ในการทดลองมีแหล่งกำเนิดและระยะเวลาเดียวกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลการทดลองที่คลาดเคลื่อน เนื่องจากปริมาณอินนูลินที่มีอยู่ในหัวอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้ (Puangbut et al., 2012)

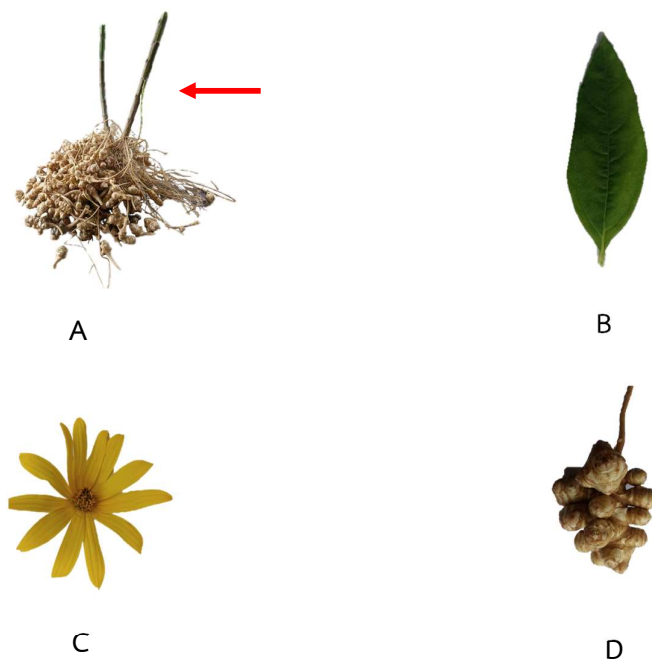
ตารางที่ 2.1 ปริมาณอินนูลินและโอลิโกฟรุคโตส (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสด) ของพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นอาหาร

ชนิดของพืช	ปริมาณ Inulin (%)	ปริมาณ Oligofructose (%)
หัวหอม (Onion)	2 – 6	2-6
แค้นตะวัน (Jerusalem artichoke)	16 – 20	16 – 20
ชิโครี (Chicory)	15 – 20	5 – 10
แอสปารากัส (Asparagus)	1 – 30	1 – 20
ต้นกระเทียม (Leek)	3 – 10	2 – 5
กระเทียม (Garlic)	9 – 16	3 – 6
อาร์ติโชค (Artichoke)	3 – 10	<1
กล้วย (Banana)	0.3 – 0.7	0.3 – 0.7
ข้าวสาลี (Wheat)	1 – 4	1 – 4
ข้าวไรซ์ (Rye)	0.5 – 1	0.5 – 1
ข้าวบาเลย์ (Barley)	0.5 – 1.5	0.5 – 1.5

ที่มา: เฉลิมขวัญและมัลลิกา (2548)

2.2 แค้นตะวัน

แค้นตะวันจัดเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์เดียวกับทานตะวัน ซึ่งมีแหล่งกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาเหนือ แค้นตะวันเป็นพืชที่ทนต่อสภาพอากาศที่หลากหลายและสามารถปลูกได้ในเกือบทุกพื้นที่ เนื่องจากเป็นพืชที่ทนทั้งอากาศร้อนและอากาศเย็น ปัจจุบันนิยมปลูกกันทั่วโลก แค้นตะวันยังจัดเป็นพืชสมุนไพรจัดเป็นพืชล้มลุกมีอายุการเก็บเกี่ยวที่สั้นโดยอยู่ที่ประมาณ 100 – 140 วัน ซึ่งส่วนประกอบของต้นแค้นตะวันมีทั้งลำต้น (Stem) ที่มีขนาดเล็กและมีขนทั่วลำต้น ใบ (Leave) มีลักษณะเป็นรูปวงรีบางพันธุ์ขอบใบหยัก ดอก (Flower) ดอกมีลักษณะเป็นช่อมีสีเหลือง และหัว (Tuber) มีลักษณะเป็นตะปุ่มตะป่ำ เนื้อสีขาวเปลือกสีน้ำตาลซึ่งมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (เอกภพ, 2555; อีระพัทธ์, 2557; Wang et al., 2020) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้หัวของแค้นตะวันยังมีปริมาณอินนูลิน (Inulin) อยู่ที่ 10 – 22% (wet basis) (Rubel et al., 2021) หรือ 45 – 75% (Dry basis) (Redondo-Cuenca et al., 2021)

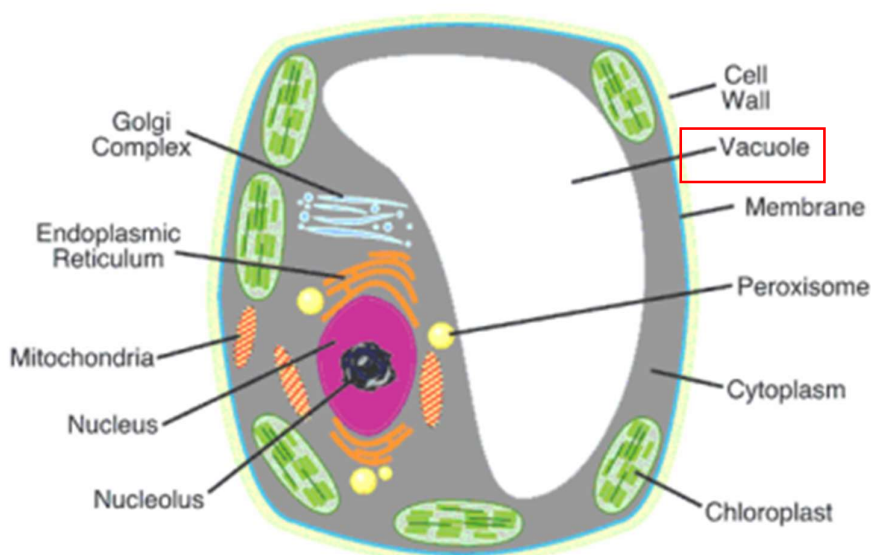


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของต้นแก่้นตะวัน (A) ลำต้น (Stem); (B) ใบ (Leave); (C) ดอก (Flower); (D) หัว (Tuber)

การเพาะปลูกต้นแก่้นตะวันสามารถปลูกได้ทุกฤดู โดยนำหัวของแก่้นตะวันมาตัดเป็นชิ้นประมาณ 3 – 5 cm หลังจากนั้นบ่มด้วยแกลบเพื่อให้เกิดต้นอ่อนโดยใช้เวลาประมาณ 1 สัปดาห์ ในการปลูกความนำต้นอ่อนปลูกที่ความลึก 1 – 2 cm ระยะห่างระหว่างต้นอยู่ที่ 50x50 cm ดินที่เหมาะสมกับการปลูกได้แก่ดินร่วนปนทรายเนื่องจากสามารถระบายน้ำได้ดี ออกดอกหลังจากการปลูกประมาณ 2 เดือน อายุการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 100 – 140 วันหรือสังเกตได้จากลำต้นเป็นสีน้ำตาลและต้นเริ่มแห้งซึ่งผลผลิตที่สามารถเก็บเกี่ยวได้อยู่ที่ 2 – 3 ต้นต่อไร่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งปลูกและการจัดการระหว่างการปลูก (ธีระพัทธ์, 2557) โดยหัวของแก่้นตะวันสามารถเก็บรักษาได้ประมาณ 10 สัปดาห์โดยปริมาณอินนูลินลดลงตามตลอดอายุการเก็บรักษา (มยุรฉัตรและคณะ, 2555)

พืชที่อุดมไปด้วยฟรักแทน เช่นแก่้นตะวัน ชิโครี มักพอบินนูลิน ฟรุคโตส และกลูโคสอยู่ในแวกคิวโอ (รูปที่ 2.3) และถูกห่อหุ้มด้วยเพคติน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสของผนังเซลล์พืช (Mavumengwana et al., 2004; Bhanja et al., 2022) การสะสมของฟรุคโตสพอลิเมอร์เกิดจากการสังเคราะห์แสงในคลอโรพลาสต์ ซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์ซูโครสที่เพิ่มขึ้นและส่งไปยังแวกคิวโอเพื่อ

ผลิตเป็นอินนูลินโดยเอนไซม์ฟรุกโตซิลทรานสเฟอเรส (Fructosyltransferases) ซูโครสบางส่วนถูก Hydrolysis เป็นกลูโคสและฟรุกโตสโดยเอนไซม์อินเวอร์เทส (Invertase) (Mavumengwana et al., 2004)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลล์พืช (ที่มา : Mavumengwana et al. (2004))

2.3 การสกัดอินนูลิน

2.3.1 วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อน

อินนูลินเป็นสารประกอบกลุ่มพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีสายยาว โดยคาร์โบไฮเดรตกลุ่มนี้ไม่มีเลกุลเป็นกลุ่มที่มีขั้ว (Polar) ดังนั้นในขั้นตอนของการสกัด อินนูลินจากหัวของแก่นตะวันต้องใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วในการสกัด โดยส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำ หรือสารละลายเอทานอล (Ethanol) เป็นต้น (ศุภลักษณ์และคณะ, 2567) กระบวนการสกัดเป็นปฏิกิริยาถ่ายเทมวลโดยของแข็งถูกนำมาละลายในเฟสของเหลว (ตัวทำละลาย) โดยสารสำคัญที่อยู่ภายในเซลล์พืชจะแพร่ออกจากเฟสที่เป็นของแข็งเข้าสู่เฟสที่เป็นของเหลว (สุพจน์, 2552) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ โดยใช้ความร้อนมีผลทำให้ผนังเซลล์ทำลาย ในขณะที่เดียวกันการใช้การกระแทกหรือการเขย่าจะมีส่วนช่วยทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการเตรียมการดังกล่าวต้องใช้พลังงานสูง เนื่องจากต้องใช้ความร้อนซึ่งอาจทำให้เกิดการ

สูญเสียอินนูลินได้ อินนูลินบางส่วนอาจถูกทำลายหรือสูญเสียในขั้นตอนการเตรียมการหรือกระบวนการสกัด ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากความร้อนที่ใช้มีผลกับโครงสร้างเซลล์ดังนั้นการควบคุมพลังงานและการเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมจะเป็นสิ่งสำคัญในการสกัดเพื่อลดการสูญเสียของอินนูลินให้น้อยที่สุด (Flórez-Fernández et al., 2017)

การสกัดโดยใช้น้ำร้อนมีตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดและผลผลิตโดยมีตัวแปรดังต่อไปนี้ (Reinoso et al., 2017; สุพจน์, 2552)

1. ขนาดของอนุภาค (Particle size) การลดขนาดของอนุภาคทำให้พื้นผิวการสัมผัสเพิ่มขึ้นและลดความต้านทานในการถ่ายเทมวล ทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการสกัดได้เนื่องจากตัวทำละลายสามารถแพร่เข้าสู่ตัวทำละลายได้ดีขึ้น
2. ตัวทำละลาย (Solvent) เนื่องจากอินนูลินมีโมเลกุลเป็นกลุ่มที่มีขั้ว (Polar) ดังนั้นตัวทำละลายที่ใช้ควรมีความเป็นขั้ว (Polarity) และมีความหนืดที่ต่ำเพื่อให้ตัวทำละลายไหลเวียนได้ดี ตัวทำละลายที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญ การกำหนดเกณฑ์การละลายสูงสุดและการถ่ายโอนมวลและรวมถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย ความเสถียรทางเคมี ต้นทุน ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมความเป็นพิษต่ำ
3. อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการสกัดเมื่ออุณหภูมิในการสกัดสูงขึ้นมีผลทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายเพิ่มขึ้นทำให้การแพร่ทำได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการสกัดที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสามารถทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสารที่อ่อนไหวต่อความร้อนได้
4. ระยะเวลา (Time) ระยะเวลาในการสกัดยังมีผลต่อการสกัดหากใช้ระยะเวลาที่สั้นอาจมีผลทำให้ปริมาณสารสกัดที่ต้องการออกมาได้ไม่เต็มที่ เพื่อให้ได้สารสกัดที่ต้องการมากที่สุดควรคำนึงถึงระยะเวลาที่ใหในการสกัดที่เหมาะสม
5. การกวน (Agitation) มีผลทำให้อัตราการสกัดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากในสภาวะที่ปั่นป่วนทำให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น
6. อัตราส่วนของตัวถูกละลายต่อตัวทำละลายในการสกัด ควรให้ความเข้มข้นที่สมดุลต่ำกว่าความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย ส่วนนี้ยังสำคัญในการลดอุปสรรคใน

กระบวนการถ่ายโอนมวลขณะสกัดสารละลายและควรมีค่าที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายมากเกินไปโดยการสกัดที่เจือจางมากทำให้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเข้มข้น

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อน

จากงานวิจัยของ Redondo-Cuenca et al. (2021) ได้ศึกษาการสกัดอินูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากหัวชิโครี (Chicory) และหัวแก่นตะวันที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยสภาวะที่ใช้ในการสกัดคือ อุณหภูมิระหว่าง 60 – 80°C นาน 20 – 60 min และอัตราส่วนระหว่างของเหลว (น้ำ) และของแข็งอยู่ระหว่าง 10 – 40 mL/g ซึ่งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดจากหัวแก่นตะวันคือ 62.4°C เป็นเวลา 21.7 min โดยมีอัตราส่วนน้ำและผงแก่นตะวันเท่ากับ 32.3 mL/g ทำให้ได้อินูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เท่ากับ 81.12%

จากงานวิจัยของ Esmaili et al. (2021) ได้ศึกษาการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดอินูลินจากหญ้าเจ้าชู้ โดยตัวทำละลายได้แก่ เอทานอล เมทานอล น้ำ และน้ำกับเอทานอล (50:50, V/V) โดยอัตราส่วนในการสกัดของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ 1:10 g/mL จากนั้นสารสกัดจะถูกนำมาทำระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลายและทำให้สารสกัดเข้มข้นและถูกนำไปทำแห้งในชั้นต่อไปจากการทดลองนี้พบว่าการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดอินูลินสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10.32% เมทานอลเป็นตัวทำละลายที่ได้ประสิทธิภาพการสกัดอินูลินต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 2.55%

จากงานวิจัยของ Escobar-Ledesma et al. (2020) ได้ศึกษาการสกัดอินูลินจากมันแกวโดยมีการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 40 – 80°C เป็นเวลา 0 – 60 min ความเร็วรอบในการกวนอยู่ที่ 0-300 rpm และอัตราส่วนในการสกัดของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ 1:2 – 1:5 g/mL ผลการวิจัยพบว่าสภาวะการสกัดที่ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 25 min โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนอยู่ที่ 130 rpm และอัตราส่วนในการสกัดของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ 1:5 g/mL ซึ่งทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของอินูลินเท่ากับ 5799.9 g/mol

จากงานวิจัยของ Srinameb et al. (2015) ได้ศึกษาการสกัดอินูลินจากหัวแก่นตะวันที่ทำแห้งโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 h สภาวะในการสกัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 70 – 100°C ระยะเวลา 10 – 30 min และใช้ตัวทำละลายแบบแรง (ASE) ในการสกัด โดยประสิทธิภาพการสกัดสูงสุดที่อุณหภูมิการสกัดที่ 80°C เป็นเวลา 20 min โดยสีของสารสกัด

อินนูลินถูกกำจัดโดยใช้เรซิน DEAE และทำแห้งสารสกัดโดยใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้ได้อินนูลินอยู่ที่ 92.5%

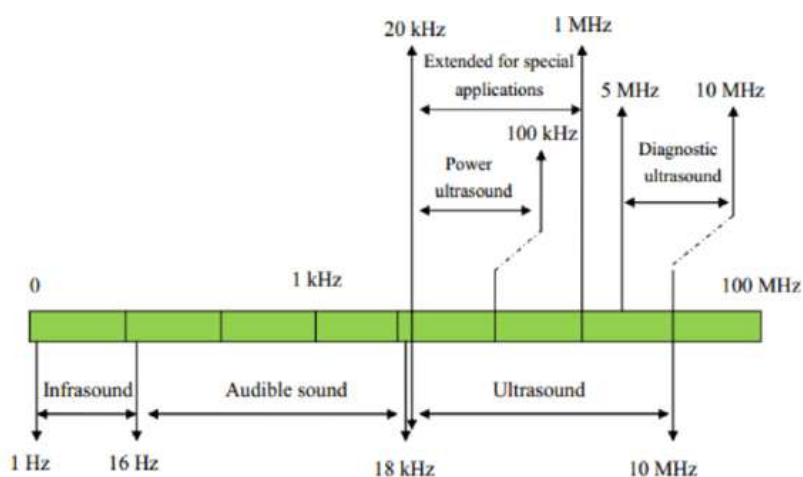
จากงานวิจัยของ Dobre et al. (2008) ได้ศึกษาวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวซีโครี และการเคลือบผงอินนูลินระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่า การใช้น้ำ และน้ำผสมเอทานอล ช่วยในการสกัดที่ 70°C และเขย่านาน 4 h พบว่า การสกัดด้วยน้ำให้ปริมาณผลผลิตอินนูลินสูงกว่า การสกัดด้วยน้ำผสมเอทานอล และการเคลือบผงอินนูลินด้วย Agar ช่วยทำให้ผิวของอนุภาคอินนูลิน มีลักษณะเรียบมากขึ้น

2.3.3 การสกัดอินนูลินโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) จัดเป็นเทคโนโลยีสะอาด ซึ่งมีความถี่ระหว่าง 20 kHz ถึง 10 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2.4

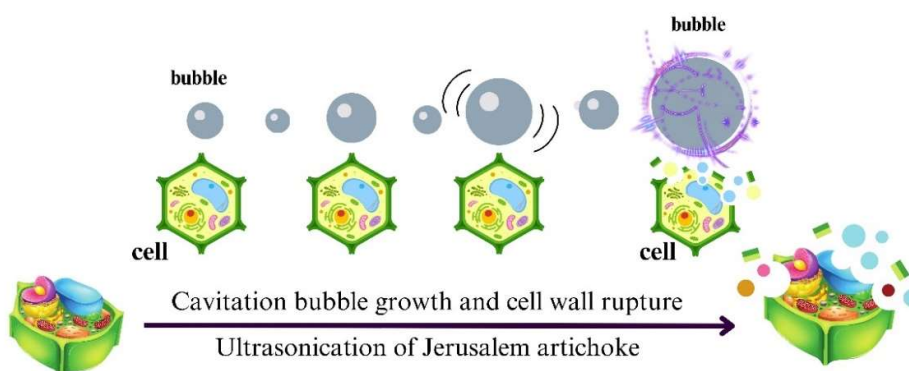
ภายในช่วงคลื่นเสียงความถี่สูง สามารถพบได้ 2 ประเภท (Cheng et al., 2015) ได้แก่

1. พาวเวอร์อัลตราซาวด์ (Power ultrasound) ความถี่ระหว่าง 20 – 100 kHz มีความเข้มสูง ซึ่งใช้สำหรับการสกัดและการประมวลผล
2. สัญญาณหรืออัลตราซาวด์สำหรับการวินิจฉัย (Diagnostic ultrasound) ความถี่ระหว่าง 100 kHz–10 MHz ซึ่งใช้เป็นเทคนิคการวินิจฉัยทางคลินิก และสำหรับการควบคุมและการประเมินคุณภาพ

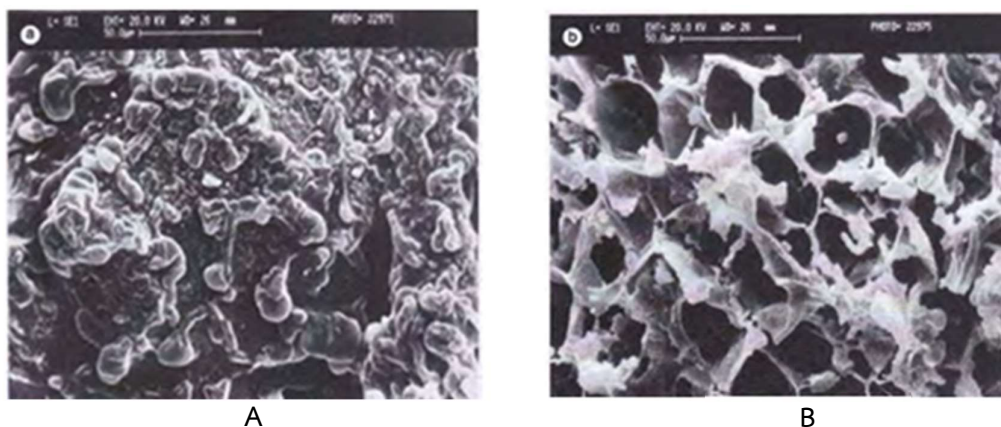


รูปที่ 2.4 สเปกตรัมเสียง (ที่มา : Cheng et al. (2015))

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการแปรรูปอาหารมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและเคมีของอาหาร โดยเฉพาะในกระบวนการแคปวิเตชัน (Cavitation) (รูปที่ 2.5) ที่เกิดขึ้นในตัวทำลายที่ได้รับคลื่นเสียงความถี่สูง การแคปวิเตชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อ คลื่นเสียงความถี่สูงสร้างความกดดันในตัว ของสารละลายโดยคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลทำให้เกิดการบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Stretch) ส่งผลทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น และฟองที่เกิดขึ้นสัมผัสกับแรงสั่นเป็นระยะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการ แลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกันและเป็นผลทำให้ฟองอากาศมีการขนาดใหญ่ขึ้นจนเกิดการระเบิดออกและ เกิดการทำลายโครงสร้างที่ทำหน้าที่เก็บกักอินนูลิน ซึ่งกระบวนการแคปวิเตชันเกิดขึ้นในเฟสที่เป็นตัว ทำละลาย โดยบริเวณผิวสัมผัสของตัวถูกละลายเป็นจุดกำเนิด (Nuclei) ของกระบวนการแคปวิเตชัน ทำให้เกิดรูพรุนหรือรอยแตกบนพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อดังแสดงในรูปที่ 2.6 และทำให้ กระบวนการสกัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Johansson et al., 2017; Mushtaq et al., 2020; สุพิชญ์ชญา, 2562; ชุตินา, 2555) โดยเป็นผลจากอุณหภูมิสูงมีส่วนช่วยเพิ่มค่าการละลายและอัตรา การแพร่ของอินนูลินไปยังเฟสของตัวทำละลายได้มากขึ้นซึ่งมีผลทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



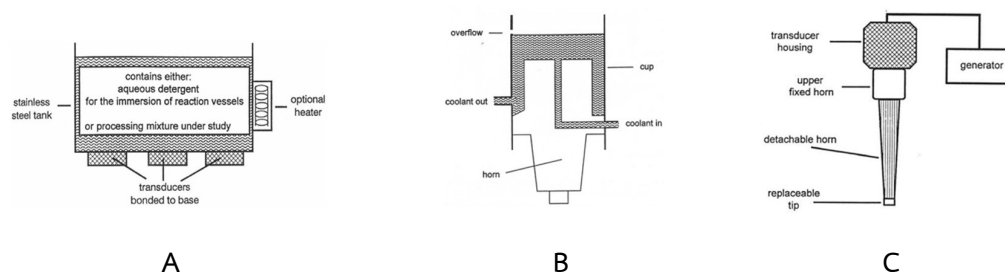
รูปที่ 2.5 กระบวนการแคปวิเตชัน (Cavitation)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัด (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ที่มา : Sharma and Gupta (2006))

เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงมักถูกนิยมนำมาใช้ในการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยในปัจจุบัน (รูปที่ 2.7) สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ (สุพิชญ์ชญา, 2562)

1. อ่างคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic baths) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเป็นการสกัดด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง
2. เสียงความถี่สูงแบบคัพฮอร์น (Cup horn) เป็นอ่างที่สามารถกำเนิดพลังงานได้สูงเนื่องจากผิวหน้าที่เกิดคลื่นเสียงความถี่สูงอยู่ติดกับทรานส์ดิวเซอร์และสัมผัสกับตัวทำละลายโดยตรง
3. คลื่นเสียงความถี่สูงแบบโพรบ (Ultrasonic probe) โดยทรานส์ดิวเซอร์ถูกเชื่อมต่อเข้ากับฮอร์น (Horn) โดยแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นอยู่กับลักษณะของโพรบฮอร์นจะทำหน้าที่ขยายส่งถ่ายคลื่นเสียงความถี่สูง



รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (A) อ่างคลื่นเสียงความถี่สูง (B) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบคัพฮอร์น (C) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบโพรบ (ที่มา : Povey and Mason (1998))

2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการสกัดอินนูลิน

จากงานวิจัยของ Sarkar et al. (2021) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากหัวมันแกวโดยเปรียบเทียบการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟในการสกัดและการสกัดโดยใช้น้ำร้อน ในการศึกษาการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่ 20 kHz และใช้คลื่นไมโครเวฟที่ 300-900 W ระยะเวลาอยู่ในช่วง 2 – 3 min อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ 3.5 – 5.5 (v/w) และการสกัดโดยใช้น้ำร้อนอุณหภูมิอยู่ที่ 90°C เวลา 30 min พบว่าปริมาณอินนูลินของการสกัดจากหัวมันแกวโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง คลื่นไมโครเวฟ และสกัดด้วยน้ำอยู่ที่ 10.3 – 11.9% 10.2 – 11.2% และ 9.9% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟใช้พลังงานในการสกัดมากกว่าการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

จากงานวิจัยของ Hilman et al. (2018) ได้ศึกษาการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ช่วยในการสกัดอินนูลินจาก Gembili (*Dioscorea esculenta*) โดยใช้ Ultrasound bath ที่ 80°C ในการสกัดอินนูลินเป็นเวลา 5 min แล้วนำสารสกัดที่ได้จาก Gembili ไปตกตะกอนโดยใช้เอทานอล ความเข้มข้น 96% ที่ -20°C นาน 24 h เพื่อให้ได้ตะกอนอินนูลินแล้วนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งพบว่า ปริมาณผลผลิตและคุณภาพของอินนูลินที่ได้ (ความสามารถในการละลาย ค่าความสว่าง และค่าความเป็นกรดต่าง) ไม่แตกต่างจากการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมซึ่งใช้ระยะเวลาในการสกัดนาน 60 min โดยใช้น้ำร้อนที่ 80°C และการแช่ช่วยในการสกัด

จากงานวิจัยของ Castellino et al. (2020) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากรากอาร์ติโชค โดยใช้วิธีในการสกัดทั้งการสกัดโดยน้ำร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูง ช่วยโดยการสกัดด้วยน้ำ

ร้อนใช้รากอาร์ติโชค 10 g ต่อน้ำ 60 mL ปรับ pH โดยใช้ NaOH 0.1 M ให้อยู่ที่ 6.8 ใช้อุณหภูมิในการสกัด 80°C นาน 2 h และการสกัดด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วย รากอาร์ติโชค 10 g ต่อน้ำ 50 mL ถูกสกัดที่อุณหภูมิ 80°C นาน 5 min ปรับ pH ให้อยู่ที่ 6.8 พบว่าการสกัดโดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงกว่าการสกัดโดยใช้น้ำร้อนอยู่ที่ 6.5 และ 20.9 g 100 g⁻¹ ตามลำดับ

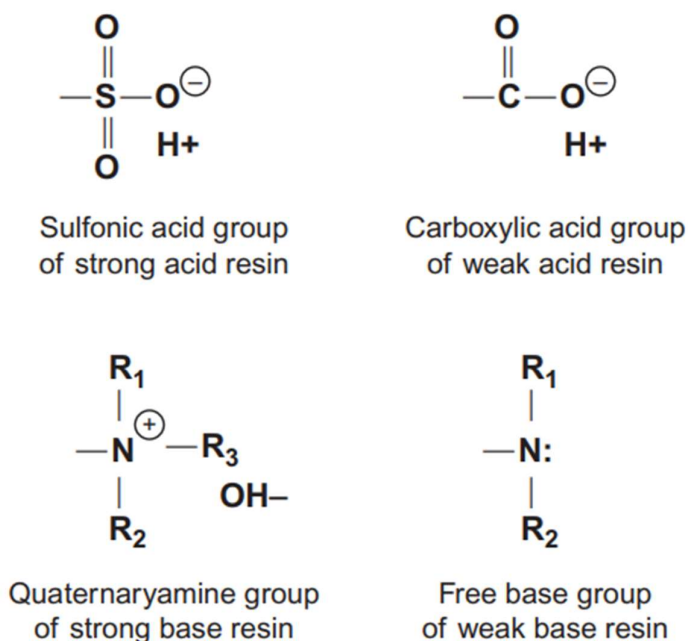
จากงานวิจัยของ Petkova et al. (2016) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากรากของต้นเอลแคมเพนโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้ตัวทำละลายเป็นเมทานอล น้ำ และเมทานอล 70% (v/v) จากการศึกษาพบว่าการสกัดอินนูลินจากรากของต้นเอลแคมเพนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ 45 kHz การใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำนั้นทำให้ได้ปริมาณผลผลิตมากที่สุดอยู่ที่ 38% มากกว่าการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ 700 W ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตอยู่ที่ 29.4%

จากงานวิจัยของ Lingyun et al. (2007) ได้ศึกษาการออกแบบการทดลองใช้การออกแบบแฟกทอเรียลแบบเศษส่วน (FFD) ทางขึ้นที่สูงชันที่สุด คอมโพสิตส่วนกลางการออกแบบ (CCD) และระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จากการวิเคราะห์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผลผลิตการสกัดอินนูลินสูงสุด (83.6%) อยู่ที่ pH ธรรมชาติเป็นเวลา 20 min ที่ 76.65°C และอัตราส่วนตัวทำละลาย:ของแข็ง 10.56:1 (v/w) นอกจากนี้ยังได้ศึกษากระบวนการสกัดด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงโดยตรงที่ 20 kHz และการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงทางอ้อมที่ 59 kHz เปรียบเทียบการสกัดแบบดั้งเดิมโดยใช้น้ำ พบว่าการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการสกัดมีส่วนช่วยให้การสกัดเร็วขึ้นจากวิธีการดั้งเดิม (ปริมาณอินนูลินเข้าสู่จุดสูงสุดอยู่ที่ 16 min) และประสิทธิภาพการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงทางตรงโดยใช้โพรบอร์นรวมกับการกวนเชิงกลมีประสิทธิภาพมากกว่าทางอ้อมโดยระยะเวลาที่สกัดและได้ปริมาณอินนูลินเข้าสู่จุดสูงสุดอยู่ที่ 8 และ 10 min ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นเสียงทางอ้อมร่วมกับอ่างน้ำจะช่วยลดการสูญเสียของสารสกัด ดังนั้นการใช้คลื่นเสียงทางอ้อมร่วมกับอ่างน้ำอาจจะสะดวกและมีประสิทธิภาพมากกว่าในการสกัดอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน

2.4 การทำบริสุทธิ์สารสกัดอินนูลิน

2.4.1 การทำบริสุทธิ์สารสกัดโดยใช้เรซิน

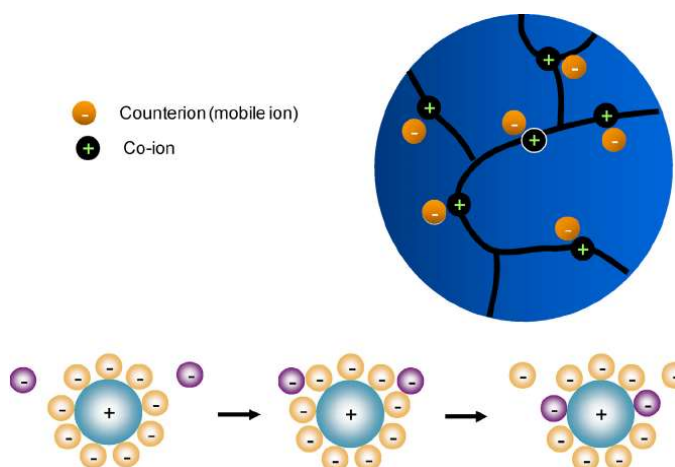
แก่นตะวันมีแร่ธาตุอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ แร่ธาตุหลัก ได้แก่ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม คลอไรด์ โซเดียม โพแทสเซียม และธาตุรอง ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ซีลีเนียม ไอโอดีน โครเมียม ทองแดง ฟลูออรีน และตะกั่ว (Harmankaya et al., 2012) จึงจำเป็นต้องทำบริสุทธิ์สารสกัดที่สกัดได้เพื่อให้ได้อินนูลินที่บริสุทธิ์ โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins) มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมและการใช้งานต่างๆ คุณสมบัติและการใช้งานที่หลากหลาย การใช้งานเช่น การทำน้ำให้บริสุทธิ์ การกู้คืนและการแยกโลหะ เรซินถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร เครื่องดื่ม เป็นต้น โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนส่วนใหญ่ประกอบด้วยครอสลิงค์โพลิสไตรีน ไดไวนิลเบนซีนโคพอลิเมอร์ (Cross-linked polystyrene-Divinylbenzene copolymers) โดยมีหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนติดอยู่ โดยกลุ่มการทำงานเหล่านี้แสดงถึงพฤติกรรมแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ตามประเภทหลัก ได้แก่ ตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchanger) และตัวแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchanger) (Guo et al., 2009) และแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันในเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ที่มา : Bhandari et al. (2016))

รูปที่ 2.8 แสดงฟังก์ชันในเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยดังนี้ (1) เรซินแลกเปลี่ยนกรดแก่ (Strong acid exchange) ที่มีกลุ่มกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) ดำเนินการในลักษณะเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยการแยกตัวของกรด (H^+ species) (2) เรซินแลกเปลี่ยนกรดอ่อน (Weak acid exchange) ที่มีกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) (3) การแลกเปลี่ยนเบสแก่ (Strong base exchange) ที่มีกลุ่มควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium) มักใช้ในปฏิกิริยา เช่น เอสเทอร์ฟิเคชันและอัลคิเลชัน (4) การแลกเปลี่ยนเบสอ่อน (Weak base exchange) ที่มีกลุ่มแอมโมเนียม (Ammonium) มีการทำงานของเอมีนกับไนโตรเจนโดยมีอิเล็กตรอนคู่เดียวทำหน้าที่เป็นหมู่เบสอิสระ (Victor-Ortega et al., 2016; Bhandari et al., 2016) นอกจากนี้ยังมีวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนประเภทอื่นๆ อีกด้วย โพลิเมอร์โฮโมโพลีสไตรีน (Homopolystyrene) และอะคริลิกเรซิน (Acrylic based resins) ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออน Nafion ซึ่งเป็นโพลิเมอร์เพอร์ฟลูออรีเนต (Perfluorinated polymer) ที่มีกลุ่มกรดซัลโฟนิก (Barbaro et al., 2009)

การแลกเปลี่ยนไอออนนั้นจัดเป็นกระบวนการทางเคมีพื้นฐาน ที่ไอออนในสารละลายถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งและไม่ละลายน้ำที่เรียกว่าตัวแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการไล่ระดับทางเคมีระหว่างสารละลายกับตัวแลกเปลี่ยนไอออน ดังแสดงตามรูปที่ 2.9 เมื่อไอออนจากสารละลายกระจายเข้าสู่ตัวแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนจะแทนที่ไอออนเคลื่อนที่ภายในเรซิน ไอออนที่ถูกแทนที่จะถูกเก็บไว้โดยตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Alvarado and Chen, 2014)



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบซึ่งมีประจุบวกในเมทริกซ์ (ที่มา : Alvarado and Chen., (2014))

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำสารสกัดอินนูลินให้บริสุทธิ์

จากงานวิจัยของ Zhang et al. (2022) ได้ศึกษาวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแค้นตะวันและทำให้สารสกัดบริสุทธิ์ด้วยการใช้ Ion exchange resin เพื่อช่วยกำจัดสารสี (Decolorization) และกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ 74°C เป็นเวลา 65 min อัตราส่วนน้ำและผงแค้นตะวันเท่ากับ 4 mL/g ทำให้ได้อินนูลินเท่ากับ 85.4% การใช้ Ion exchange resin ชนิด Strongly alkaline anion resin ตามด้วย Strongly acidic cation resin และ Weakly alkaline resin ทำให้การกำจัดสารสีได้สูงถึง 99.76% และกำจัดแร่ธาตุได้ถึง 93.68%

จากงานวิจัยของ Zhang et al. (2018) ศึกษาวิธีการลดสีของอินนูลินจากแค้นตะวัน โดยใช้เรซิน 6 ชนิด (ถ่านกัมมันต์, D113, 201×7, D301, 001×7, DA201-C และ 001×7) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางชนิดเดียวกัน ถ่านกัมมันต์ เรซิน DA201-C และเรซินผสม (D301-D113, 201×7-D113, 001×7-D30, 001×7-201×7) ถูกนำมาผสมกับตัวอย่างในอัตราส่วน 2:1, 10:1, 20:1 (v/v) เขย่าโดยใช้ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 40 min (เรซินละ 20 min) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแยกเรซินออกจากตัวอย่างโดยการกรองด้วยสุญญากาศด้วยกระดาดกรองขนาด 70 mm ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติที่มีขั้วและคุณสมบัติการแตกตัวเป็นไอออนส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนสีอย่างมีนัยสำคัญ เรซินชนิด 001×7 (Cation resin)-201×7 (Anion resin) ซึ่งเป็นเรซินที่มีขั้วสูงและเมดสีส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกจากสารละลายอินนูลินได้ด้วยปริมาณเรซิน 10:1 โดยอัตราการเปลี่ยนสีและอัตราการสูญเสียอินนูลินอยู่ที่ 82.29% และ 12.67% ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Coca et al. (2008) ได้ศึกษาวิธีการกำจัดสีของน้ำปืทุการโดยใช้สไตรีนิกเรซิน (Styrenic resins) โดยก่อนนำไปใช้ เรซินจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยโซเดียมคลอไรด์และล้างด้วยน้ำกลั่น ซึ่งดำเนินการทดลองในคอลัมน์แบบหุ้มและบรรจุเรซิน 100 mL โดยใช้อุณหภูมิในการทดลองอยู่ที่ 70°C จากการทดลองพบว่าสามารถลดสีได้ถึง 75 – 80%

2.5 การทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

2.5.1 การทำแห้งแบบพ่นฝอย

การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเทคนิคการอบแห้งของเหลว สารละลาย และสารแขวนลอยของเหลวด้วยระบบพ่นแห้งเพื่อผลิตอาหารผงที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย (Dyvelkov and Sloth, 2014) การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะจากเหลวไปเป็นของแข็งโดยใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ดังนี้ (สำคัญ, 2551)

1. ขั้นตอนการทำให้เกิดละออง (Atomization) ในขั้นตอนนี้ เมื่อต้องการควบคุมการไหลของสารและขนาดของหยดที่ถูกฉีดออกไป เทคนิคในการใช้อะตอมไมเซอร์ (Atomizer) มีบทบาทสำคัญ โดย Atomizer จะทำให้ของเหลวถูกพ่นออกมาเป็นละอองหยดเล็กๆ ที่มีพื้นผิวจำนวนมาก ซึ่งลักษณะของ Atomizer มีดังนี้

1.1 Rotary Atomizer

ทำงานโดยของเหลวถูกส่งไปบนจานหมุน ซึ่งจานหมุนจะมีความเร็วรอบสูงและถูกเหวี่ยงออกด้านข้างของเหลวถึงกระจายเป็นละออง โดยขนาดจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด รวมทั้งความเร็วในการหมุนและขนาดของจานหมุน

1.2 Pressure Nozzles

ทำงานโดยของเหลวถูกส่งผ่าน orifice ด้วยความดันสูง ทำให้ของเหลวกลายเป็นละอองฝอยโดยไม่ใช้อากาศ ขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของเหลว ความหนืด และความดันที่ใช้

1.3 Pneumatic Nozzle

ทำงานโดยให้ของเหลวและอากาศไหลผ่าน nozzle ส่งผลทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองฝอยจากอากาศที่ไหลด้วยความเร็วสูง การปรับอัตราการไหลของอากาศมีผลทำให้ของเหลวถูกพ่นเป็นละอองและกระจายได้ดี ซึ่งเหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยมี 2 ชนิด คือ Two-fluid Nozzle และ Three-fluid Nozzle

1.4 Ultrasonic nozzle

ทำงานโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงซึ่งมีผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมีผลทำให้ของเหลวถูกพ่นเป็นละออง

2. การผสมละอองที่ได้จากการพ่นฝอยเข้ากับอากาศภายในห้องอบแห้ง (Droplet-Air mixing) หลังจากละอองถูกพ่นออกมา จะมีการกระทบกับลมร้อน โดยต้องให้ละอองผสมกับอากาศอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดการระเหยในขั้นตอนถัดไป โดนการผสมของละอองกับอากาศสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบดังนี้ (กลอยใจ, 2556)

2.1 ไหลทางเดียว (Co-current flow)

ของเหลวถูกพ่นในทิศทางเดียวกับอากาศร้อนดังนั้นจึง เหมาะสำหรับตัวอย่างที่ไม่ทนต่อความร้อนเนื่องจาก วิธีนี้ส่งผลทำให้น้ำระเหยอย่างรวดเร็วและผงที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ

2.2 ไหลสวนทางกัน (Counter-current flow)

ของเหลวถูกพ่นทิศทางตรงข้ามกับอากาศร้อน อนุภาคของของเหลวได้รับความร้อนจนอุณหภูมิของอนุภาคมีค่าเท่ากับอากาศร้อนภายในห้องอบ การถ่ายโอนความร้อนที่มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับตัวอย่างที่ทนต่อความร้อนสูง

2.3 ไหลแบบผสมกัน (Mixed-flow)

ของเหลวถูกพ่นทิศทางเดียวกันและตรงข้ามกับอากาศร้อนพร้อม ๆ กัน

3. ขั้นตอนการระเหยน้ำออก (Evaporation) เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นระหว่างละอองกับอากาศร้อนภายในห้องอบซึ่งส่งผลทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากตัวอย่าง

4. ปริมาณผลผลิตที่ได้จากการทำแห้งของเหลวด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Recovery of dried product) ขั้นตอนสุดท้ายคือการเก็บรวบรวมผลผลิตที่ได้จากการทำแห้งโดยการแยกผงที่ได้ออกจากอากาศมักใช้ Cyclone ในการแยก

การทำแห้งแบบพ่นฝอยมีข้อดีต่างๆ เช่น ช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษา ลดเวลาในการทำแห้ง ช่วยลดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์เนื่องจากตัวอย่างโดนความร้อนที่ระยะเวลาสั้น เพิ่มความสะดวกในการจัดเก็บและง่ายต่อการขนส่งเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ซึ่งส่งผลในการไหลและการยึดติดกันของผง อย่างไรก็ตามการทำแห้งแบบพ่นฝอยยังมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น การสูญเสียความชื้นของสารตั้งต้น ค่า a_w ที่ต่ำ และปัญหาเกี่ยวกับการไหลของผงรวมทั้งการยึดติดกันอีกด้วย (ศิริพร และคณะ, 2555)

2.5.2 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) เป็นการทำแห้งและเป็นการกระบวนกรถนอมอาหารอย่างหนึ่งโดยการลดปริมาณน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยการลดอุณหภูมิและความดันเพื่อเปลี่ยนน้ำแข็งให้เป็นก๊าซ (การระเหิด) โดยตรง (Jangam et al., 2016) โดยทำการลดอุณหภูมิของตัวอย่างให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ในระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งผิวหน้าของตัวอย่างมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอากาศภายในห้องอบทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากตัวอย่างสู่อากาศภายในห้องอบ (วันชนก, 2564) กระบวนการการเปลี่ยนสภาวะของสารจากของแข็งไปเป็นก๊าซโดยตรง (Sublimation) เกิดขึ้นเมื่อความดันไอระเหยและอุณหภูมิของน้ำแข็งต่ำกว่าค่าที่จุดกลาง (Triple point) จุดกลางของน้ำอยู่ที่ 0.01°C และ 0.006 atm ดังแสดงตามรูปที่ 2.10a โดยเริ่มต้นจากการแช่เยือกแข็งน้ำในผลิตภัณฑ์ (จุด A ไปจุด C) เพื่อให้ น้ำในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวโดยสมบูรณ์ จากนั้นลดความดันลง (จุด D) เพื่อให้

น้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการระเหิดแล้วจึงให้ความร้อนแฝงของการระเหิด เพื่อให้เกิดการระเหิดได้อย่างสมบูรณ์ โดยอุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแสดงดังรูปที่ 2.10b

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักได้แก่

1. การแช่เยือกแข็ง (Freezing) วัตถุประสงค์เพื่อลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในตัวอย่างและลดการเกิดปฏิกิริยาเคมีและทำการแยกประมาณน้ำอิสระออกจากสารละลาย (โอริโนโค, 2551) ปัจจุบันการแช่เยือกแข็งนั้นใช้อากาศเป็นตัวกลาง (วันชนก, 2564) เช่น การแช่เยือกแข็งแบบลมเป่า การแช่เยือกแข็งในช่องเหลว การแช่ตัวอย่างให้ตู้แช่เยือกแข็ง เป็นต้นโดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

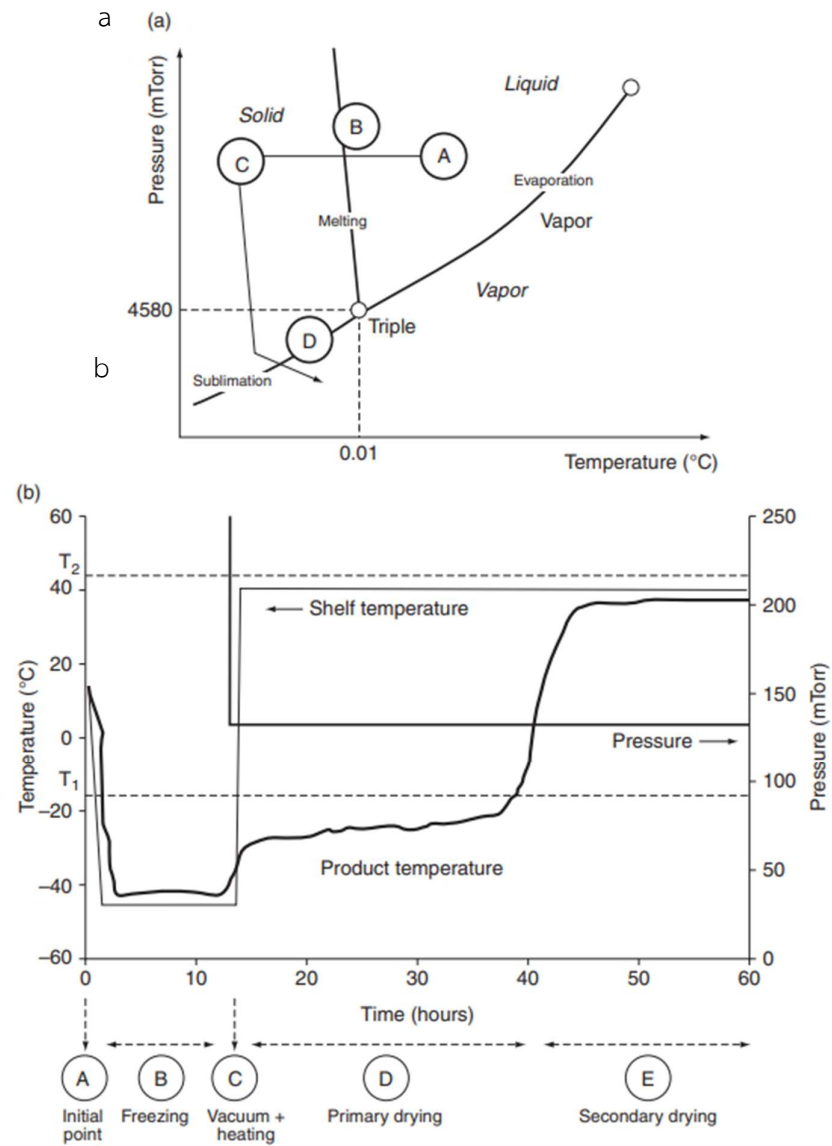
- 1.1 การแช่แข็งแบบช้า (Slow freezing) โดยตัวอย่างถูกนำเข้าตู้หรือห้องแช่เยือกแข็งอากาศภายในค่อนข้างคงที่ ตัวอย่างต้องใช้ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งนานอาจใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่าง การแช่แข็งแบบช้าส่งผลทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ เนื่องมาจากการดึงความร้อนออกได้ช้าทำให้เกิดการขยายตัวของผลึก การขยายตัวของผลึกส่งผลกระทบทำให้เซลล์ของตัวอย่างเกิดความเสียหาย เกิดการหดตัวของตัวอย่าง

- 1.2 การแช่แข็งแบบรวดเร็ว (Fast Freezing) อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว มีการเกิดขึ้นของผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กจำนวนมากและสม่ำเสมอ กระจายทั่วตัวอย่างทั้งภายในเซลล์และภายนอกไม่เกิดการหดตัว ส่งผลให้คุณภาพของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย เมื่อโครงสร้างของตัวอย่างหลังจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีสภาพใกล้เคียงกับตัวอย่างสด

2. การทำแห้งระยะที่ 1 (Primary drying) ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งถูกนำมากำจัดน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์โดยการระเหิดด้วยการลดความดันบรรยากาศภายในห้องห้องให้อยู่ในระดับสุญญากาศ (Vacuum) ความดันต่ำกว่า 132 Pa และ 132 mPa ตามลำดับ มีผลทำให้ผลึกน้ำแข็งเกิดการระเหิดอย่างสมบูรณ์ (นริศรา และคณะ, 2562) ซึ่งขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็งมีผลกระทบอย่างมากต่อขั้นตอนการทำแห้งระยะที่ 1 ปริมาณน้ำ 90% ถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการทำแห้งระยะที่ 1 โดยส่วนใหญ่ผ่านการระเหิดน้ำที่ระเหิดประกอบด้วยน้ำอิสระและน้ำบางส่วนที่อยู่ในอาหาร (Garcia-Amezquita et al., 2022) การระเหิดของชั้นน้ำแข็งเริ่มที่ผิวหน้าของตัวอย่างที่สัมผัสกับอากาศก่อนและเกิดการระเหิดจากภายในสู่ภายนอกระยะเวลาการระเหิดขึ้นอยู่กับขนาด รวมไปถึงโครงสร้างของตัวอย่าง (นริศรา และคณะ, 2562)

3. การทำแห้งระยะที่ 2 (Secondary drying) ขั้นตอนในการกำจัดน้ำที่มีพันธะกับสารอื่น (Bound water) ภายในผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ โดยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นสูงและลดความดัน (Severo et al., 2017) มีผลทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากจากแหล่งความร้อนจึงถ่ายเทสู่ ผลิตภัณฑ์โดยตรงจึงเป็นการอบเพื่อลดความชื้นโดยการระเหย

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้เกิดการลดความเสียหายจากความร้อนและสารอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อน เช่นวิตามิน อีกทั้งยังสามารถรักษาคูณสมบัติทางกลิ่น รสชาติ และโครงสร้างบางอย่างของอาหารได้ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากใช้เวลานานและต้องใช้พลังงานมาก กระบวนการนี้ประกอบด้วยการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ รักษาความดัน อุณหภูมิที่ต่ำของผลิตภัณฑ์แช่แข็งเพื่อให้น้ำแข็งเป็นก๊าซ อย่างไรก็ตามการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งถูกนำมาใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงหรือในกรณีที่คุณภาพอาหารสูงจนสามารถพิจารณาใช้ค่าใช้จ่ายได้ (Garcia-Amezquita et al., 2022)



รูปที่ 2.10 (a) แผนภาพเฟสความดัน-อุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์ในระบบปิดและ (b) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ที่มา : Ratti et al., (2013))

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

จากงานวิจัยของ Zhu et al. (2019) ได้ศึกษาการทำแห้งอินนูลินจากแก่นตะวันโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 110 – 120°C ความเร็วคืบ 18 – 22 rpm และความดันในช่วง 0.02 – 0.04 MPa ออกแบบการทดลองด้วย Box-Behnken โดยหาสภาวะที่เหมาะสมอุณหภูมิในการทำแห้งอยู่ที่ 114.6°C ความเร็วคืบ 20.02 rpm และความดัน 0.03 MPa เทียบกับการทำแห้งอินนูลินจากแก่นตะวันกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -50°C เป็นเวลา 72 h เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตอินนูลิน และขนาดอนุภาคของอินนูลินของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งกับวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ผลผลิตอินนูลินอยู่ที่ 7.02% และ 8.65% ปริมาณน้ำ 4.34% และ 3.49% และขนาดอนุภาคของอินนูลิน 790.9 nm และ 567.7 nm ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ รวีพร และคณะ (2558) ได้ศึกษาการทำแห้งอินนูลินจากแก่นตะวันโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 150 – 190°C และศึกษาการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน 10 – 30°Brix จากการศึกษาพบว่า การนำสารสกัดอินนูลิน 30°Brix ไปทำแห้งด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ได้ปริมาณอินนูลินสูงสุดและการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 190°C มีความเหมาะสมมากกว่า 150 และ 170°C เนื่องจากทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงสุด ความชื้นต่ำ ความสามารถในการละลายและค่าการดูดซับดี และมีความคงตัวมากกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C ทั้งการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 150 และ 170°C มีรูปทรงที่กลมและมีการเกาะติดกันของอนุภาคมากกว่าการใช้อุณหภูมิ 190°C

จากงานวิจัยของ Ronkart et al. (2007) ได้ศึกษาการทำแห้งอินนูลินจากรากชิโครี โดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยใช้หัวฉีดแบบไหลสองทางโดยใช้ลมอัดการไหลของของเหลวป้อนอยู่ที่ 2 L/h การไหลของอากาศความดัน 2 bar ซึ่งศึกษาอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 120, 170 และ 230°C สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศขาออกที่ 65 – 67, 88 – 92 และ 120 – 125°C ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิป้อนเพิ่มขึ้นถึง 80°C ระดับเฉลี่ยของการเกิดพอลิเมอร์เซชันของส่วนที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงขึ้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C และอุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่ 230°C ช่วยให้ปริมาณผลผลิตสูงกว่าที่ 120 – 170°C แต่ทำให้เกิดการระเบิดของอนุภาค

จากงานวิจัยของ Michalska-Ciechanowska et al., (2020) ได้ศึกษาการทำแห้งน้ำแครนเบอร์รี่โดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ผลจากการศึกษาพบว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณความชื้นสูงกว่าทำแห้งแบบพ่นฝอยประมาณ 8 เท่าและความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์สูงกว่า 11% เมื่อคำนึงถึงความเข้มข้นของตัวพา แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวพาที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ และค่าสีระบบ CIE L*a*b* ลดลง

จากงานวิจัยของ Barbosa et al. (2015) ได้ศึกษาการทำแห้งน้ำส้มโดยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำให้แห้งด้วยลมร้อนแบบพาความร้อน โดยในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งตัวอย่าง 50 mL ถูกแช่แข็งในชั้นตันที่อุณหภูมิ -80°C จากนั้นทำแห้งภายใต้สุญญากาศ 0.067 mbar เป็นเวลา 7 วันในเครื่องทำแห้งแช่แข็งห้องอุณหภูมิและคอนเดนเซอร์ถูกทำให้เย็นลงที่ -55°C วิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยตัวอย่างถูกป้อนที่อัตราการไหลคงที่ 25 mL/min อุณหภูมิขาเข้า 150°C อุณหภูมิขาออก 70°C และการทำให้แห้งด้วยลมร้อนแบบพาความร้อนอุณหภูมิและความเร็วของอากาศไว้ที่ 40°C และ 1.5 m/s ตามลำดับที่ระยะเวลา 48 h การทดลองพบว่าเมื่อพิจารณาจากจำนวนเซลล์เริ่มต้นที่ได้รับหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการทำแห้งแบบพ่นฝอยช่วยให้เซลล์สามารถอยู่รอดได้ หลังจากระยะเวลาการเก็บรักษาทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าสีที่ดีที่สุดโดยไม่มีมอลโทเดกซ์ทริน และมีการกักเก็บวิตามินซีรวมที่สูงกว่าในผงบวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำให้แห้งด้วยลมร้อนแบบพาความร้อน