

การพัฒนากระบวนการผลิตอินนูลินจากหัวแก้งตะวัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

PROCESS DEVELOPMENT OF INULIN PRODUCTION FROM
JERUSALEM ARTICHOKE TUBER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การพัฒนากระบวนการผลิตอินนูลินจากหัวแก่งตะวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุแสน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พีรวัฒน์ แต่งโสภา : การพัฒนากระบวนการผลิตอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน (Process development of inulin production from Jerusalem artichoke tuber)

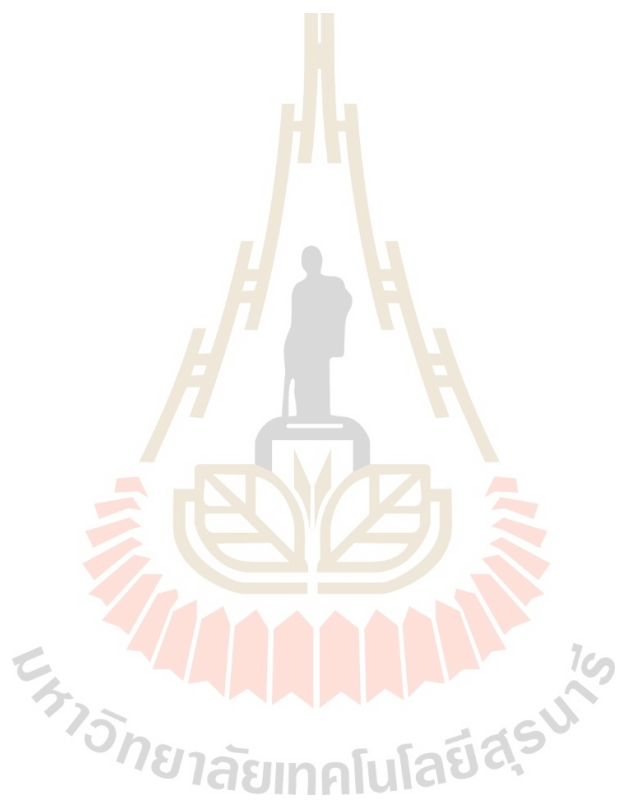
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุเสน, 117 หน้า.

คำสำคัญ : หัวแก่้นตะวัน/การสกัด/อินนูลิน/การสกัดด้วยน้ำร้อน/การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง/การทำบริสุทธิ์สารสกัด/การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง/การทำแห้งแบบพ่นฝอย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการสกัดอินนูลินจากหัวแก่้นตะวันโดยการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 20, 40 และ 60 min และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C นาน 5, 10 และ 15 min ต่อปริมาณอินนูลินในสารสกัด รวมถึงการทำบริสุทธิ์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการทำแห้งผงอินนูลินด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยต่อปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และคุณภาพของผงอินนูลิน จากผลการทดลอง พบว่า UAE-extraction ทำให้พื้นผิวของกากแก่้นตะวันมีลักษณะพองฟูและมีรูพรุนมากกว่าวิธี HW-extraction ที่อุณหภูมิเดียวกัน สภาวะเหมาะสมที่สุดในการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min โดยอุณหภูมิเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญในการสกัดอินนูลิน และ UAE-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัดนาน 15 min โดยระยะเวลาเป็นตัวแปรต้นสำคัญต่อปริมาณอินนูลินที่สกัดได้

การทำบริสุทธิ์ของสารสกัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดแร่ธาตุในสารสกัดได้ถึง 86.55 – 89.64% และกำจัดสีของสารสกัดได้ 50.96 – 62.39% ตามลำดับ ผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยมีความชื้นต่ำกว่า 10% และปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.3 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์ การสกัด UAE-extraction ทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงเล็กกว่าการสกัดด้วย HW-extraction แต่การกระจายขนาดอนุภาคกว้างกว่าการสกัด HW-extraction ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอในการละลาย การกระจายตัว และคุณภาพของผง การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย พบว่าผงที่ได้มีปริมาณอินนูลินระหว่าง 76.77 – 82.03% โดยการทำให้แห้งทั้งสองวิธีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลิน แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดและปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมดสูงกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การสกัดอินนูลินด้วยวิธีการใช้น้ำร้อนรวมกับการ

ทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนก่อนนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอย นั้นส่งผลให้ได้ผงอินนูลินที่มีคุณภาพสูงนอกจากนี้ การสกัดด้วยน้ำร้อนเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการสกัดสูงและเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม



สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....พิรวัฒน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อ.ท.

PEERAWAT TAENG SOPHA : PROCESS DEVELOPMENT OF INULIN PRODUCTION
FROM JERUSALEM ARTICHOKE TUBER.

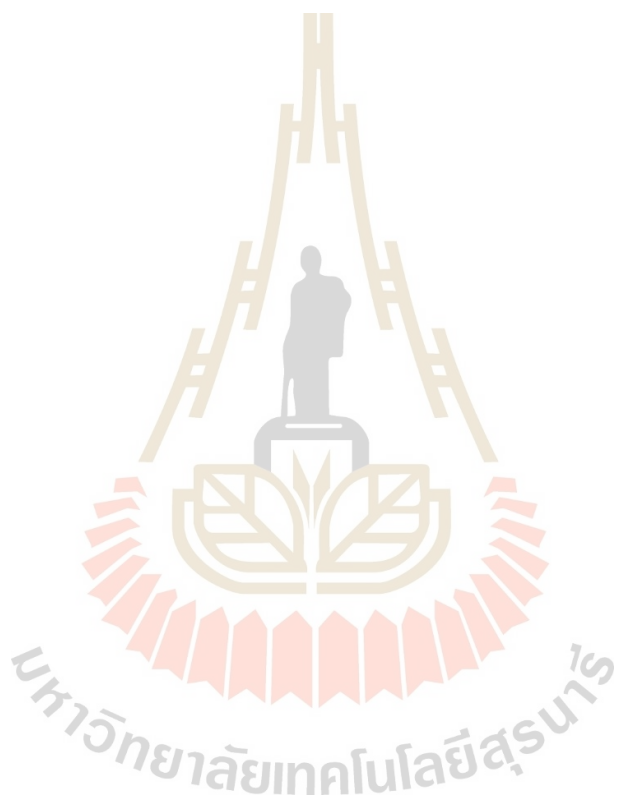
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TIRAPORN JUNYUSEN, Ph.D., 117 PP.

Keyword : Jerusalem artichoke tuber/Extraction/Inulin/Hot water extraction/
Ultrasound-assisted extraction/Purification/Freeze-drying/Spray-drying

The objectives of this study were to study the effects of inulin extraction from Jerusalem artichoke tuber using hot water extraction (HW-extraction) at temperatures of 60, 70 and 80°C for 20, 40 and 60 min, and ultrasound-assisted extraction (UAE-extraction) at temperatures of 60, 70 and 80°C for 5, 10 and 15 min on the inulin content of the extract, to investigate the purification process using ion exchange resin and the drying methods of inulin powder through freeze-drying and spray-drying methods to determine total yield, total inulin yield, and inulin powder quality. The results showed that UAE-extraction caused the Jerusalem artichoke residue to have a puffed and porous surface more than HW-extraction at the same temperature. The optimal condition for inulin extraction with HW-extraction was 60°C for 20 min, where temperature was the key factor, while the optimal condition for UAE-extraction was 60°C for 15 min, where extraction time was the key factor affecting inulin content in the extract.

The purification of the extract using ion exchange resin (strong acid cation and weak base anion) successfully removed 86.55 – 89.64% of the minerals and 50.96 – 62.39% of the color from the extract. The inulin powder obtained from both freeze-drying and spray-drying had moisture content below 10% and water activity below 0.3, indicating its safety against microbial growth. UAE-extraction produced powder with smaller average particle size compared to HW-extraction, but with a wider particle size distribution, which could affect solubility, dispersion, and powder quality. After purification and drying, the inulin content in the powder ranged from 76.77 – 82.03%

While the drying method did not affect the inulin content, freeze-drying resulted in higher total yield and total inulin yield compared to spray-drying. Therefore, the hot water extraction of inulin, followed by purification with ion exchange resin and spray drying, results in a high-quality inulin powder. Moreover, hot water extraction is a straightforward and highly efficient method, making it suitable for industrial applications.



School of Agricultural Engineering
Academic Year 2024

Student' Signature.....ศิริวัฒน์
Advisor' Signature.....DT

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปเนื่องจากได้รับความกรุณาและได้ช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทางในการศึกษาเป็นอย่างดีจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค กรรมการสอบโครงร่างและสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาวิเคราะห์และแนะนำความรู้ด้านวิชาการ พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (External Grants and Scholarships for Graduate Students, OROG) แก่ผู้วิจัยตลอดหลักสูตรและขอขอบคุณบุคลากรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งสถานที่ตลอดจนงานวิจัยนี้ได้สำเร็จด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พีรวัฒน์ แดงโสภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.5 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อินนูลิน.....	5
2.2 แก่นตะวัน.....	7
2.3 การสกัดอินนูลิน.....	9
2.3.1 วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อน	9
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อน	11
2.3.3 การสกัดอินนูลินโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง	12
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการสกัดอินนูลิน	15
2.4 การทำบริสุทธิ์สารสกัดอินนูลิน.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	การทำบริสุทธิ์สารสกัดโดยใช้เรซิน.....	17
2.4.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำสารสกัดอินนูลินให้บริสุทธิ์.....	19
2.5	การทำแห้งสารสกัดอินนูลิน	19
2.5.1	การทำแห้งแบบพ่นฝอย	19
2.5.2	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง.....	21
2.5.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน.....	25
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	27
3.1	วัตถุประสงค์และอุปกรณ์	27
3.2	การเตรียมผงแก่นตะวัน	27
3.3	การสกัดสารอินนูลินจากผงแก่นตะวัน.....	30
3.4	การทำสารสกัดอินนูลินให้บริสุทธิ์	33
3.5	การทำแห้งสารสกัดอินนูลิน	34
3.6	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงแก่นตะวันและผงอินนูลิน	36
3.6.1	สมบัติทางเคมี.....	36
3.6.1.1	การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น.....	36
3.6.1.2	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ.....	37
3.6.1.3	การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า.....	37
3.6.1.4	การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลิน.....	38
3.6.1.5	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงอินนูลินด้วยแสง ซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี.....	38
3.6.1.6	การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงอินนูลินด้วยแสง ซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์.....	39
3.6.2	สมบัติทางเคมี.....	40
3.6.2.1	การวิเคราะห์อัตราการจัดสี (Decolorization ratio) ของ	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารสกัด	40
3.6.2.2 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ความหนาแน่นปรากฏ Tapped density, Carr's index และ Hausner ratio	41
3.6.2.3 ความสามารถในการละลาย	42
3.6.2.4 ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ	42
3.6.2.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัว	43
3.6.2.6 การศึกษาโครงสร้างทางระดับจุลภาค	43
3.6.2.7 การวิเคราะห์ค่าสี	44
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	45
4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	46
4.1 การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวัน	46
4.1.1 สมบัติทางเคมีของสารสกัด	46
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดอินนูลินโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี.....	62
4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์	67
4.1.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของผงแก่นตะวันและกากแก่นตะวันหลังจากการสกัด.....	70
4.2 การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน.....	72
4.2.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าและเคมี	72
4.2.2 การวิเคราะห์ค่าสี.....	76
4.3 การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน.....	78
4.3.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงอินนูลิน	78
4.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลิน.....	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1	การศึกษามูลของวิธีการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวัน	91
5.2	การศึกษามูลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน.....	92
5.3	การศึกษามูลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน.....	92
5.4	ข้อเสนอแนะ	93
	รายการอ้างอิง.....	95
	ภาคผนวก.....	107
	ภาคผนวก ก	108
	ภาคผนวก ข.....	115
	ประวัติผู้เขียน	117

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณอินนูลินและโอลิโกฟรุคโตส (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสด) ของพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นอาหาร	7
3.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design สำหรับการสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า	31
3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design สำหรับการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction)	31
4.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก HW-extraction	47
4.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก UAE-extraction	49
4.3 ปริมาณเถ้าของสารสกัด (Extract) และความสามารถในการสกัดเถ้าจาก HW-extraction	52
4.4 ปริมาณเถ้าของสารสกัด (Extract) และความสามารถในการสกัดเถ้าจาก UAE-extraction	53
4.5 แสดงค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) pH ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ปริมาณของแข็ง (Solid content) และอัตราการจัดสี (Decolorization ratio) ของ HW-extract และ UAE-extract ก่อนและหลังผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	74
4.6 สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน H6020-SW และ U6015-SW	81
4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean size) และ Span value ของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กรอบแนวความคิดในการพัฒนาวิธีการผลิตผงอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน
2.1	โครงสร้างทางเคมีของอินนูลิน
2.2	ส่วนประกอบของต้นแก่้นตะวัน (A) ลำต้น (Stem) (B) ใบ (Leave) (C) ดอก (Flower) (D) หัว (Tuber)
2.3	โครงสร้างของเซลล์พืช
2.4	สเปกตรัมเสียง
2.5	กระบวนการแคปเวชัน (Cavitation)
2.6	โครงสร้างของผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัด (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง
2.7	เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (A) อ่างคลื่นเสียงความถี่สูง (B) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบคัพฮอร์นและ (C) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบโพรบ
2.8	ฟังก์ชันในเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
2.9	ตัวอย่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบซึ่งมีประจุบวกในเมทริกซ์
2.10	(a) แผนภาพเฟสความดัน-อุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์ในระบบปิดและ (b) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง
3.1	การเตรียมผงแก่้นตะวันสำหรับงานวิจัย
3.2	ภาพการดำเนินการทำให้แห้งหัวแก่้นตะวันด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง
3.3	ภาพการดำเนินการบดหัวแก่้นตะวันแห้งด้วยเครื่องบดละเอียดแบบหัวค้อน
3.4	ภาพการดำเนินการร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรงร่อน
3.5	แสดงขั้นตอนการสกัดสารอินนูลินจากผงแก่้นตะวัน
3.6	ภาพการดำเนินการสกัดสารอินนูลินด้วยน้ำควบคุมอุณหภูมิ
3.7	ภาพการดำเนินการสกัดสารอินนูลินด้วยเครื่องคลื่นเสียงความถี่สูง
3.8	ภาพการดำเนินการแยกสารสกัดอินนูลินออกจากกาก (Residue) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ภาพการดำเนินการทำบริสุทธิ์สารด้วย Ion exchange resin	34
3.10 ภาพการดำเนินการทำให้สารสกัดเข้มข้นเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน	35
3.11 การทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดอินูลิน	35
3.12 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดอินูลิน	36
3.13 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผงอินูลิน	36
3.14 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงอินูลิน	37
3.15 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าด้วยเตาเผา	37
3.16 ชุดทดสอบ Fructan Assay Kit	38
3.17 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงสารสกัดอินูลินด้วย SR-FTIR	39
3.18 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก (Crystallinity)	40
3.19 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)	41
3.20 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ	42
3.21 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัว	43
3.22 การศึกษาโครงสร้างทางระดับจุลภาคของผงแกล่นตะวันหลังจากการสกัด	44
3.23 การวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี	45
4.1 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อความสามารถในการสกัดของแข็ง (Solid extractability) ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)	55
4.2 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อปริมาณอินูลิน (Inulin content) ในสารสกัด ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)	58
4.3 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อปริมาณผลผลิตอินูลิน (Inulin yield) ในสารสกัด ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)	59
4.4 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อความสามารถในการสกัดอินูลิน (Inulin extractability) ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	สเปกตรัม SR-FTIR ของสารสกัดด้วย HW-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 20, 40 และ 60 min	64
4.6	สเปกตรัม SR-FTIR ของสารสกัดด้วย UAE-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min	65
4.7	สเปกตรัม SR-FTIR ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015)	66
4.8	การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของสารสกัดด้วย HW-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 20, 40 และ 60 min	68
4.9	การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของสารสกัดด้วย UAE-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min	69
4.10	การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015)	70
4.11	ภาพถ่าย FE-SEM ของ (A) แก่นตะวัน (JAT) (B-E) กากแก่นตะวันหลังจากสกัดด้วย HW-extraction โดยที่ (B) อุณหภูมิ 60°C เวลา 20 min (C) อุณหภูมิ 60°C เวลา 60 min (D) อุณหภูมิ 80°C เวลา 20 min (E) อุณหภูมิ 80°C เวลา 60 min และ (F-I) กากแก่นตะวันหลังจากสกัดด้วย UAE-extraction โดยที่ (F) อุณหภูมิ 60°C เวลา 5 min (G) อุณหภูมิ 60°C เวลา 15 min (H) อุณหภูมิ 80°C เวลา 5 min (I) อุณหภูมิ 80°C เวลา 15 min โดยระดับกำลังขยายที่ (i) 500x และ (ii) 3,000x	71

สารบัญรูป (ต่อ)

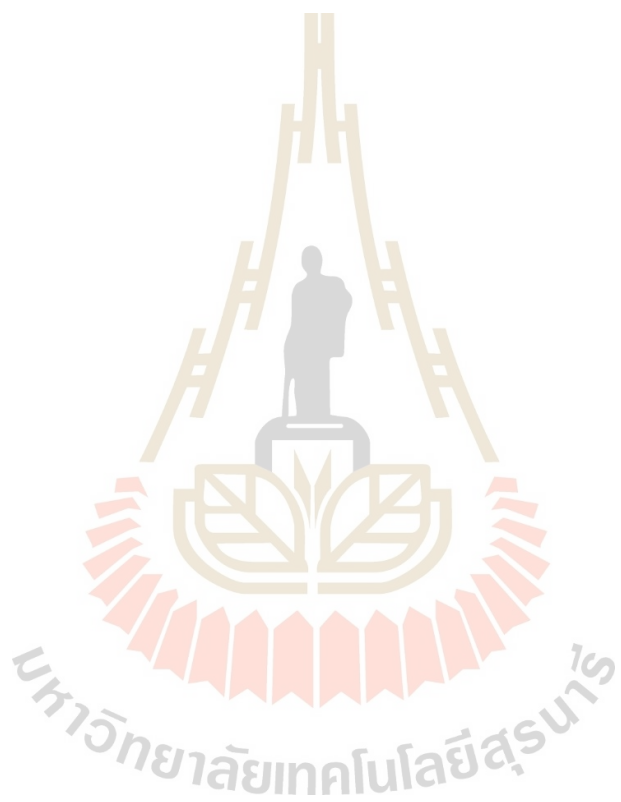
รูปที่	หน้า
4.12 แสดงค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) ของสารสกัด HW-extract (H6020) และ UAE-extract (U6015) ก่อนผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (U) และหลังผ่านเรซินชนิด Strong acid cation (S) และ Weak base anion (SW)	77
4.13 แสดงภาพถ่ายสีของสารสกัด HW-extract และ UAE-extract ก่อนผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-U และ U6015-U) ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation (H6020-S และ U6015-S) และผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Weak base anion (H6020-SW และ U6015-SW)	77
4.14 ภาพถ่ายลักษณะของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดย A คือ ผงของสารสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อนก่อนการทำบริสุทธิ์ด้วย เรซิน; B คือ ผงที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อนและการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; C คือผงของสารสกัดอินนูลินด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงก่อนการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; D คือ ผงที่ได้จากการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; (i) คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying); (ii) คือ การทำแห้งพ่นฝอย (Spray-drying)	83
4.15 ความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity) ของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	84
4.16 ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	86
4.17 ปริมาณอินนูลินของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) อินนูลินจากผงสารสกัดด้วยน้ำร้อน (H6020-U) อินนูลินจากผงสารสกัด	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (U6015-U) อินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านเรซินและ ทำแห้งแบบแช่เยือก (FH6020-SW และ FU6015-SW) และอินนูลินจาก สารสกัดที่ผ่านเรซินและทำแห้งแบบพ่นฝอย (ขSH6020-SW และ SU6015-SW)	
4.18 ขั้นตอนในการวิจัยกระบวนการผลิตอินนูลินจากหัวแก่นตะวัน	89
4.19 กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตอินนูลินจากหัวแก่นตะวัน	90
ก.1 การหาค่าตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดอินนูลินด้วย วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณ อินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการ สกัดอินนูลิน (y = ตัวแปรตาม, D = ค่าพึงพอใจโดยรวม)	109
ก.2 แผนภูมิ Pareto แสดงค่า Standardized effect ของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการ สกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ($p < 0.05$)	110
ก.3 กราฟโครงร่าง (A) ปริมาณอินนูลินของสารสกัด; (B) ปริมาณผลผลิต อินนูลิน; (C) ความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวัน โดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction)	111
ก.4 การหาค่าตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดอินนูลินด้วย การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณ อินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการ สกัดอินนูลิน (y = ตัวแปรตาม, D = ค่าพึงพอใจโดยรวม)	112
ก.5 แผนภูมิ Pareto แสดงค่า Standardized effect ของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ($p < 0.05$)	113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.6	114
กราฟโครงสร้าง (A) ปริมาณอินนูลินของสารสกัด; (B) ปริมาณผลผลิตอินนูลิน; (C) ความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction)	



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

แก่นตะวันจัดเป็นพืชสมุนไพรโดยส่วนประกอบของแก่นตะวันทั้งลำต้น (Stem) ใบ (Leave) ดอก (Flower) และหัว (Tuber) มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งมีประโยชน์กับสุขภาพของผู้บริโภค (Wang et al., 2020) นอกจากนี้ในหัวของแก่นตะวันยังมีปริมาณอินนูลิน (Inulin) อยู่ที่ 10 – 22% (Wet basis) (Rubel et al., 2021) หรือ 45 – 75% (Dry basis) (Redondo-Cuenca et al., 2021) ซึ่งอินนูลินจัดเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ โดยร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้ในระบบทางเดินอาหารได้และเป็นสารที่ไม่ให้พลังงาน แต่อินนูลินยังสามารถถูกย่อยได้โดยแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ เช่น *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* โดยแบคทีเรียเหล่านี้มีส่วนช่วยในการสร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย (Wang et al., 2020; ศิริพร และคณะ, 2555) อินนูลินจึงจัดเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) จากรายงานวิจัยของ Iraporda et al. (2019) พบว่า อินนูลินที่สกัดได้จากแก่นตะวันช่วยส่งเสริมการเจริญของ *Lactobacillus* strains และช่วยเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหารให้ดีขึ้น ส่วนใหญ่อินนูลินถูกนำมาใช้เป็นสารทดแทนไขมัน (Fat replacer) เนื่องจากอินนูลินมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์อาหารทางด้านเนื้อสัมผัส เช่น ในผลิตภัณฑ์จำพวกไอศกรีม เนยแข็ง และโยเกิร์ต (Junyusen et al., 2017) นอกจากนี้ยังมีการนำอินนูลินยังไปใช้เป็นส่วนประกอบหรือสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์อาหารหลาย ๆ ชนิด ซึ่งสามารถจัดเป็นอาหารเชิงหน้าที่ (Functional food) เช่น ขนมปัง ขนมเค้ก บิสกิต โยเกิร์ต โยเกิร์ตไขมันต่ำ เนยแข็ง นมหมัก ไส้กรอก เครื่องดื่ม และอาหารประเภท Gel เป็นต้น (Rubel et al., 2021) พบว่า อินนูลินที่สกัดได้จากแก่นตะวันช่วยส่งเสริมการเจริญของ *Lactobacillus* strains และช่วยเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหารให้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paseephol and Sherkat (2009) ได้รายงานผลการศึกษาความคงตัวและการเจริญ Probiotic bacteria ของโยเกิร์ตที่เติมอินนูลิน ซึ่งพบว่า การเติมอินนูลินไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของโยเกิร์ตและช่วยสนับสนุนการเจริญของ Probiotic bacteria นอกจากนี้ Ceylan et al. (2021) รายงานว่า การเติมผงแป้งแก่นตะวันในขนมอบสำหรับทดแทนการเติมสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch) ช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมอบได้

นอกจากหัวแก่งตะวันที่มีปริมาณอินนูลินสูงแล้ว ยังมีพืชอีกหลายชนิดที่มีอินนูลินเป็นองค์ในปริมาณที่สูง เช่น หัวชิโครี กระเทียม หน่อไม้ฝรั่ง หัวหอม ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และกล้วย เป็นต้น ทั้งนี้การผลิตผงอินนูลินสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การสกัด (Extraction) การทำให้สารสกัดบริสุทธิ์ (Purification) และการทำแห้ง (Drying) ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลิน เช่น ความบริสุทธิ์ของผงอินนูลิน ค่าความสว่าง ความสามารถในการละลาย และสมบัติทางเคมี เป็นต้น รวมทั้งต้นทุนในการผลิตผงอินนูลิน ในปัจจุบันผงอินนูลินที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ส่วนใหญ่นำเข้ามาจากประเทศจีน อินเดีย และกลุ่มประเทศในแถบทวีปยุโรป ซึ่งทำให้ราคาจำหน่ายผงอินนูลินเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากนักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการผลิตผงอินนูลินที่ไม่ซับซ้อน ปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลินสูง นอกจากนี้หากความรู้และเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยและพัฒนาสามารถถ่ายทอดให้กับกลุ่มเกษตรกรผู้เพาะปลูกต้นแก่งตะวัน รวมทั้งผู้ประกอบการที่ดำเนินธุรกิจการแปรรูปแก่งตะวันและผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งจะช่วยทำให้การผลิตผงอินนูลินภายในประเทศเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแก่งตะวันด้วยน้ำร้อนและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงต่อปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลิน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนต่อการเพิ่มคุณภาพของผงอินนูลิน

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลินโดยการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของผงอินนูลิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 หัวแก่งตะวันที่ใช้ในการวิจัยได้รับมาจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนไทรบ้าน โดยใช้พื้นที่เพาะปลูกที่ตำบลไทยสามัคคี อำเภอน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัวแก่งตะวันที่มีอายุหลังการเก็บเกี่ยวระหว่าง 1 - 2 เดือน โดยหัวแก่งตะวันถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C

1.3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดอยู่ระหว่าง 60 - 80°C

1.3.3 การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่ความถี่ 40 kHz ด้วยอ่างคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound bath)

1.3.4 งานวิจัยดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น (Laboratory scale)

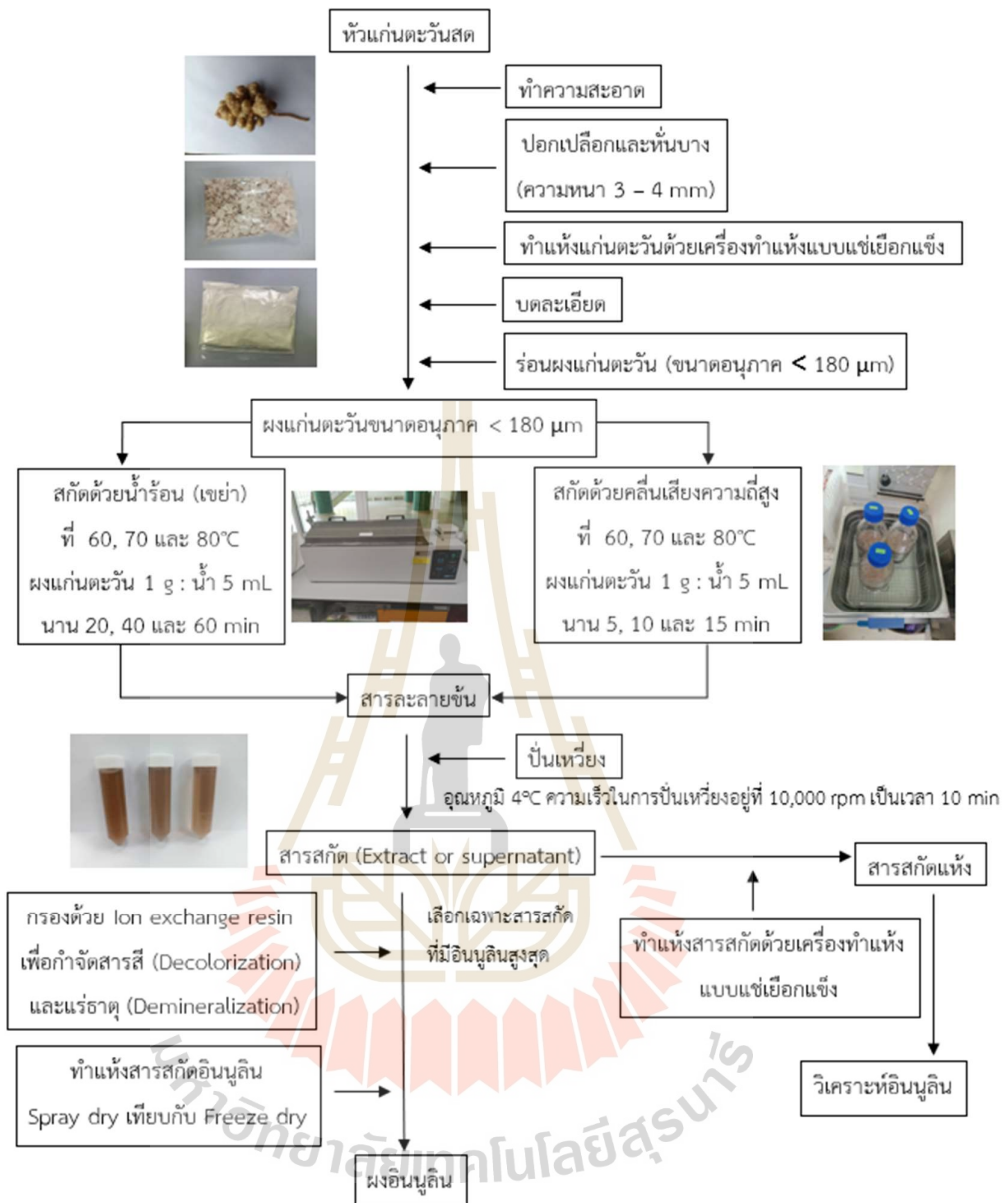
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

1.4.1 การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยลดระยะเวลาในการสกัดอินนูลินและได้ปริมาณผลผลิตอินนูลินสูงกว่าเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยน้ำร้อนร่วมกับการเขย่า

1.4.2 การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนช่วยกำจัดสีและแร่ธาตุออกจากสารสกัดอินนูลินซึ่งทำให้สารสกัดอินนูลินมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

1.5 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีกรอบการศึกษาและพัฒนาวิธีการผลิตอินนูลินจากหัวแค้นตะวันเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลิน รวมทั้งลดระยะเวลาการผลิตลง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การสกัด (Extraction) การทำสารสกัดให้บริสุทธิ์ (Purification) และการทำแห้ง (Drying) ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อปริมาณผลผลิตอินนูลินและคุณภาพของผงอินนูลิน เช่น ความบริสุทธิ์ของผงอินนูลิน และสมบัติทางเคมีกายภาพ จากหลายงานวิจัยได้ใช้น้ำร้อนเป็นตัวทำละลายเพื่อช่วยในการสกัดสารอินนูลิน โดยใช้อุณหภูมิในการสกัดอยู่ระหว่าง $60 - 80^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาในการสกัดค่อนข้างนานระหว่าง 1 – 6 h ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวทางที่จะศึกษาผลของการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดอินนูลินจากหัวแค้นตะวันที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยเปรียบเทียบผลของปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลินกับการใช้วิธีการสกัดแบบดั้งเดิม (ใช้น้ำร้อนร่วมกับการเขย่า) อย่างไรก็ตาม การสกัดแบบดั้งเดิมและการสกัดด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) นั้นทำให้สารสกัด (Extract) ที่ได้นอกจากมีองค์ประกอบของสารอินนูลินแล้วยังมีสารอื่น ๆ เช่น โปรตีน สารให้สี และแร่ธาตุต่าง ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ถูกสกัดออกจากหัวแค้นตะวันมาด้วย ทั้งนี้สารสกัดที่ผ่านการทำแห้งจะมีคุณภาพและความบริสุทธิ์ของผงอินนูลินต่ำลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้โดยการนำสารสกัดมาผ่านการกำจัดสารสี (Decolorization) และแร่ธาตุ (Demineralization) ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดสารสี และแร่ธาตุ นอกจากนี้วิธีการทำแห้งสารสกัดมีผลต่อปริมาณผลผลิตและสมบัติทางเคมีกายภาพของผงอินนูลิน เช่น ความสามารถในการละลาย การดูดความชื้นกลับ ค่าความสว่าง และความคงตัวของผงอินนูลิน เป็นต้น โดยกรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 1.1



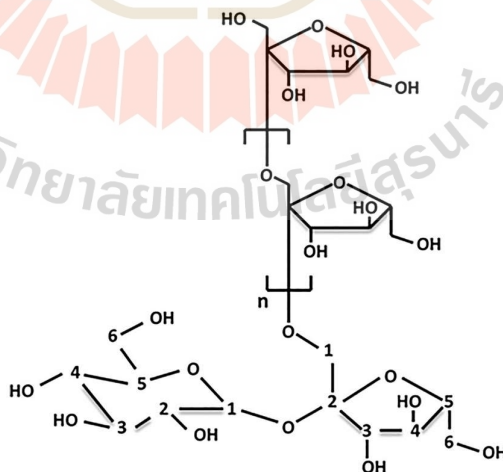
รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดในการพัฒนาวิธีการผลิตผงอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน

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 มีโครงสร้างแบบบีตา (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)



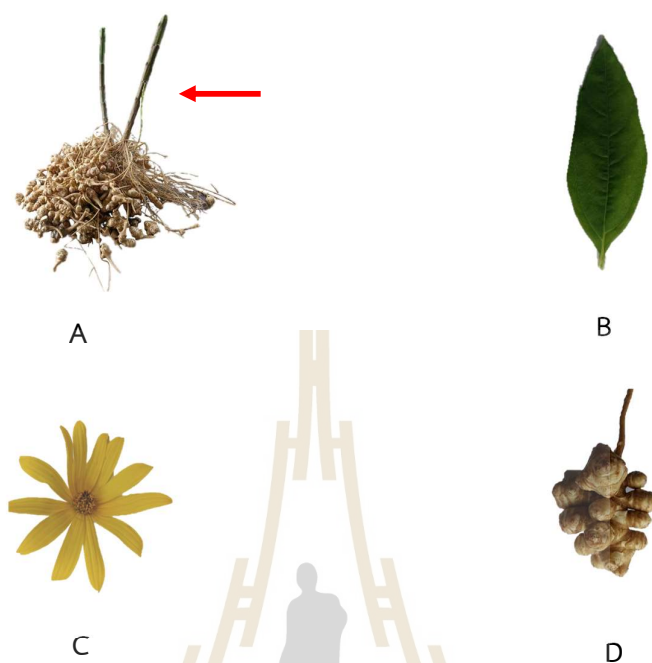
ตารางที่ 2.1 ปริมาณอินนูลินและโอลิโกฟรุคโตส (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสด) ของพืชชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เป็นอาหาร

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; ธีระพัทธ์, 2557; Wang et al., 2020) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้หัวของแค้นตะวันยังมีปริมาณอินนูลิน (Inulin) อยู่ ที่ 10 – 22% (wet basis) (Rubel et al., 2021) หรือ 45 – 75% (Dry basis) (Redondo-Cuenca et al., 2021)

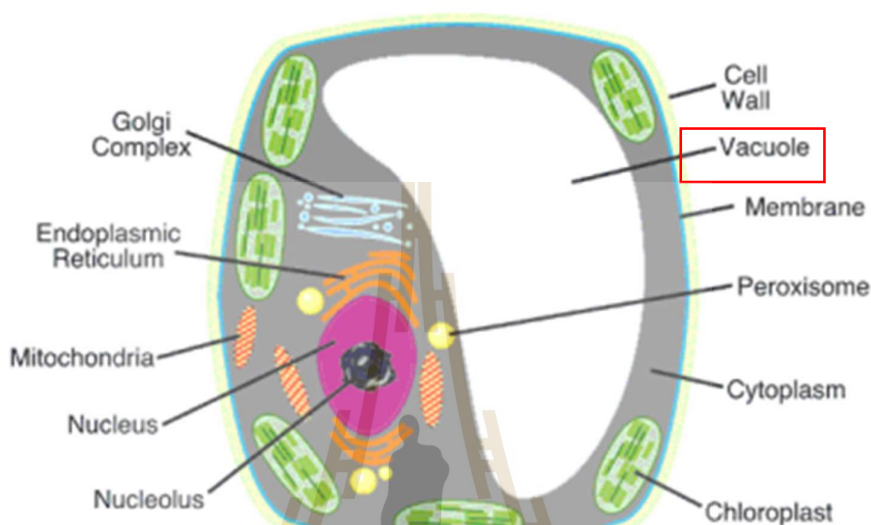


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของต้นแก่้นตะวัน (A) ลำต้น (Stem); (B) ใบ (Leave); (C) ดอก (Flower); (D) หัว (Tuber)

การเพาะปลูกต้นแก่้นตะวันสามารถปลูกได้ทุกฤดู โดยนำหัวของแก่้นตะวันมาตัดเป็นชิ้นประมาณ 3 – 5 cm หลังจากนั้นบ่มด้วยแกลบเพื่อให้เกิดต้นอ่อนโดยใช้เวลาประมาณ 1 สัปดาห์ ในการปลูกควมนำต้นอ่อนปลูกที่ความลึก 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

อินนูลินเป็นสารประกอบกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีสายยาว โดยคาร์โบไฮเดรตกลุ่มนี้ไม่มีเลกุลเป็นกลุ่มที่มีขั้ว (Polar) ดังนั้นในขั้นตอนของการสกัด อินนูลินจากหัวของแก่นตะวันต้องใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วในการสกัด โดยส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำ หรือสารละลายเอทานอล (Ethanol) เป็นต้น (ศุภลักษณ์และคณะ, 2567) กระบวนการสกัดเป็นปฏิกิริยาถ่ายเทมวลโดยของแข็งถูกนำมาละลายในเฟสของเหลว (ตัวทำละลาย) โดยสารสำคัญที่อยู่ภายในเซลล์พืชจะแพร่ออกจากเฟสที่เป็นของแข็งเข้าสู่เฟสที่เป็นของเหลว (สุพจน์, 2552) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ โดยใช้ความร้อนมีผลทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย 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 เพื่อให้ได้สารสกัดที่ต้องการมากที่สุดควรคำนึงถึงระยะเวลาที่ให้นในการสกัดที่เหมาะสม
5. การกวน (Agitation) มีผลทำให้อัตราการสกัดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากในสภาวะที่ปั่นป่วนทำให้เกิดการแพร่ได้ดีขึ้น
6. อัตราส่วนของตัวถูกละลายต่อตัวทำละลายในการสกัด ควรให้ความเข้มข้นที่สมดุลต่ำกว่าความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลาย ส่วนนี้ยังสำคัญในการลดอุปสรรคใน

กระบวนการถ่ายโอนมวลขณะสกัดสารละลายและควรมีค่าที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายมากเกินไปโดยการสกัดที่เจือจางมากทำให้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการเข้มข้น

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมโดยการใช้ความร้อน

จากงานวิจัยของ Redondo-Cuenca et al. (2021) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากหัวชิโครี (Chicory) และหัวแก่นตะวันผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยสภาวะที่ใช้ในการสกัดคือ อุณหภูมิระหว่าง $60 - 80^{\circ}\text{C}$ 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 ทำให้ได้อินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เท่ากับ 81.12%

จากงานวิจัยของ Esmaeili et al. (2021) ได้ศึกษาการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินจากหญ้าเจ้าชู้ โดยตัวทำละลายได้แก่ เอทานอล เมทานอล น้ำ และน้ำกับเอทานอล (50:50, V/V) โดยอัตราส่วนในการสกัดของแข็งต่อของเหลวอยู่ที่ $1:10$ g/mL จากนั้นสารสกัดจะถูกนำมาทำระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลายและทำให้สารสกัดเข้มข้นและถูกนำไปทำแห้งในชั้นต่อไปจากการทดลองนี้พบว่าการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดอินนูลินสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10.32% เมทานอลเป็นตัวทำละลายที่ได้ประสิทธิภาพการสกัดอินนูลินต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 2.55%

จากงานวิจัยของ Escobar-Ledesma et al. (2020) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากมันแกวโดยมีการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ $40 - 80^{\circ}\text{C}$ 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 ซึ่งทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของอินนูลินเท่ากับ 5799.9 g/mol

จากงานวิจัยของ Srinameb et al. (2015) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากหัวแก่นตะวันผ่านการทำแห้งโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 h สภาวะในการสกัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $70 - 100^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลา $10 - 30$ min และใช้ตัวทำละลายแบบแรง (ASE) ในการสกัด โดยประสิทธิภาพการสกัดสูงสุดที่อุณหภูมิการสกัดที่ 80°C เป็นเวลา 20 min โดยสีของสารสกัด

อินนูลินถูกกำจัดโดยใช้เรซิน DEAE และทำแห้งสารสกัดโดยใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้ได้อินนูลินอยู่ที่ 92.5%

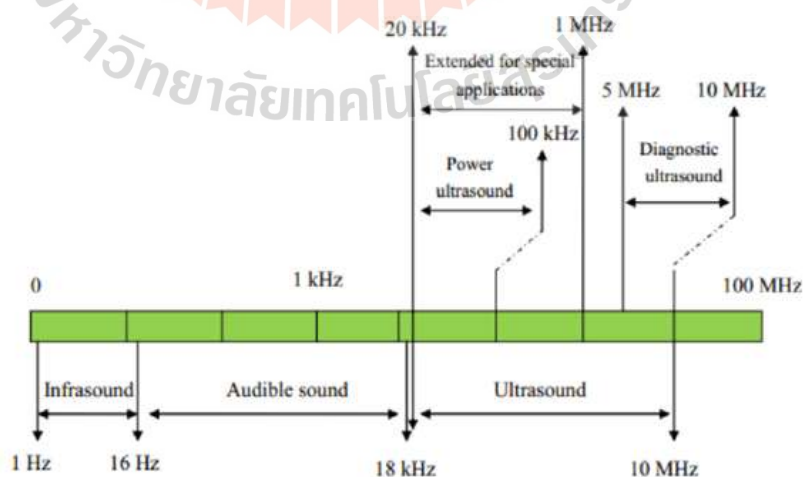
จากงานวิจัยของ Dobre et al. (2008) ได้ศึกษาวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวซีโครี และการเคลือบผงอินนูลินระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่า การใช้น้ำ และน้ำผสมเอทานอล ช่วยในการสกัดที่ 70°C และเขย่านาน 4 h พบว่า การสกัดด้วยน้ำให้ปริมาณผลผลิตอินนูลินสูงกว่า การสกัดด้วยน้ำผสมเอทานอล และการเคลือบผงอินนูลินด้วย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

2.3.3 การสกัดอินนูลินโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

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

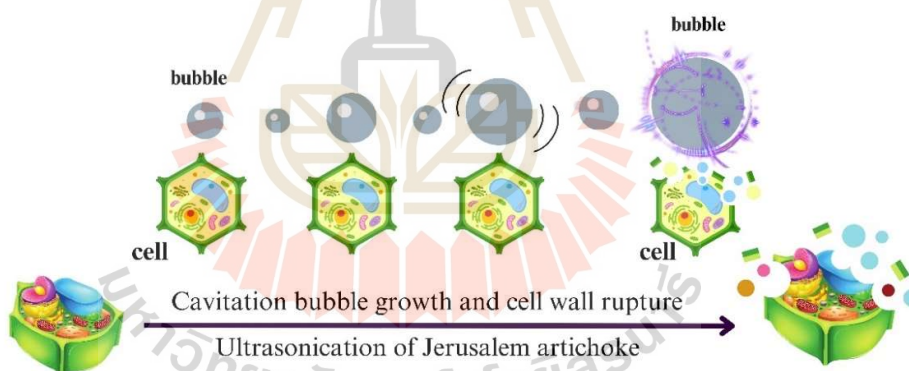
ในช่วงคลื่นเสียงความถี่สูง สามารถพบได้ 2 ประเภท (Cheng et al., 2015) ได้แก่

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

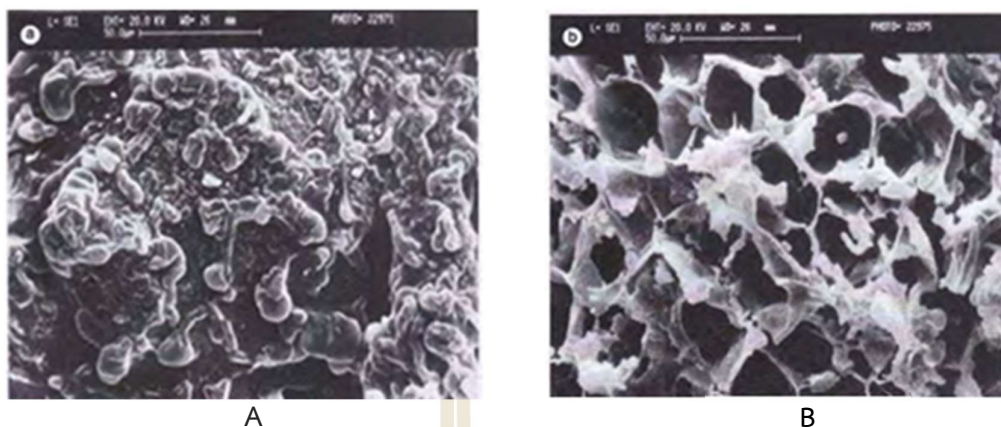


รูปที่ 2.4 สเปกตรัมเสียง (ที่มา : Cheng et al. (2015))

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการแปรรูปอาหารมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและเคมีของอาหาร โดยเฉพาะในกระบวนการแคปวิเตชัน (Cavitation) (รูปที่ 2.5) ที่เกิดขึ้นในตัวทำละลายที่ได้รับคลื่นเสียงความถี่สูง 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



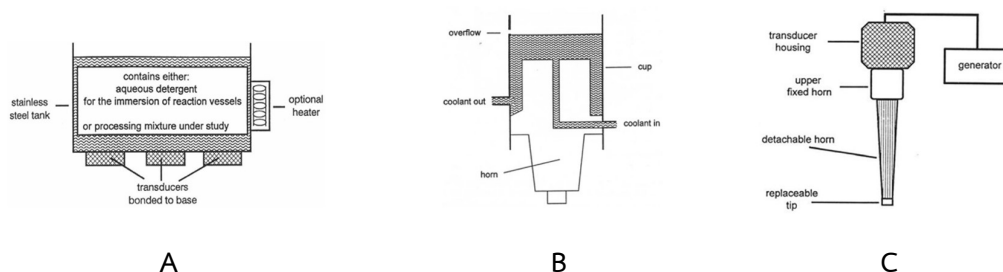
รูปที่ 2.5 กระบวนการแคปวิเตชัน (Cavitation)



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

เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงมักถูกนิยมใช้ในการสกัดสารสำคัญจากพืชโดยในปัจจุบัน (รูปที่ 2.7) สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้ (สุพิชญ์ชญา, 2562)

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



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 พบว่าการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงกว่าการสกัดโดยใช้น้ำร้อนอยู่ที่ 6.5 และ 20.9 g 100 g⁻¹ ตามลำดับ

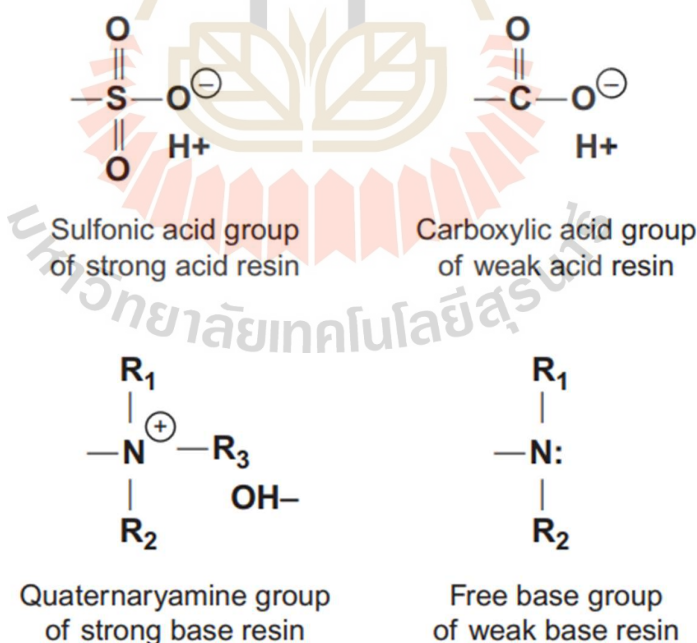
จากงานวิจัยของ Petkova et al. (2016) ได้ศึกษาการสกัดอินนูลินจากรากของต้นเอลแคมเพนโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้ตัวทำละลายเป็นเมทานอล น้ำ และเมทานอล 70% (v/v) จากการศึกษาพบว่า การสกัดอินนูลินจากรากของต้นเอลแคมเพนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่ 45 kHz การใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำนั้นทำให้ได้ปริมาณผลผลิตมากที่สุดอยู่ที่ 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) และประสิทธิภาพการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงทางตรงโดยใช้โพรบออร์นรวมกับการกวนเชิงกลมีประสิทธิภาพมากกว่าทางอ้อมโดยระยะเวลาที่สกัดและได้ปริมาณอินนูลินเข้าสู่จุดสูงสุดอยู่ที่ 8 และ 10 min ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นเสียงทางอ้อมร่วมกับอ่างน้ำจะช่วยลดการสูญเสียของสารสกัด ดังนั้นการใช้คลื่นเสียงทางอ้อมร่วมกับอ่างน้ำอาจสะดวกและมีประสิทธิภาพมากกว่าในการสกัดอินนูลินจากหัวแก่แค้นตะวัน

2.4 การทำบริสุทธิ์สารสกัดอินนูลิน

2.4.1 การทำบริสุทธิ์สารสกัดโดยใช้เรซิน

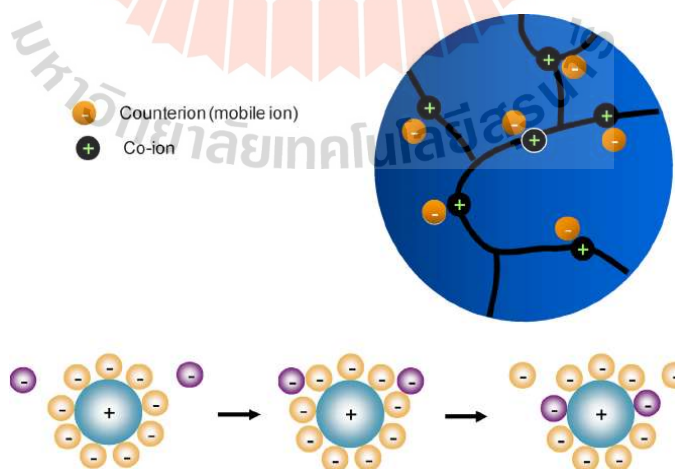
แก่นตะวันมีแร่ธาตุอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทคือ แร่ธาตุหลัก ได้แก่ แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส แคลเซียม คลอไรด์ โซเดียม โพแทสเซียม และธาตุรอง ได้แก่ เหล็ก สังกะสี ซีลีเนียม ไอโอดีน โครเมียม ทองแดง ฟลูออรีน และตะกั่ว (Harmankaya et al., 2012) จึงจำเป็นต้องทำบริสุทธิ์สารสกัดที่สกัดได้เพื่อให้ได้อินนูลินที่บริสุทธิ์ โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins) มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมและการใช้งานต่างๆ คุณสมบัติและการใช้งานที่หลากหลาย การใช้งานเช่น การทำน้ำให้บริสุทธิ์ การกู้คืนและการแยกโลหะ เรซินถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร เครื่องดื่ม เป็นต้น โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนส่วนใหญ่ประกอบด้วยครอสลิงค์โพลิสไตรีน ไดไวนิลเบนซีนโคพอลิเมอร์ (Cross-linked polystyrene-Divinylbenzene copolymers) โดยมีหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนติดอยู่ โดยกลุ่มการทำงานเหล่านี้แสดงถึงพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินสามารถแบ่งออกเป็น 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 เอสเทอริฟิเคชันและอัลคิเลชัน (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) ได้ศึกษาวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแค้น ตะวันและทำให้สารสกัดบริสุทธิ์ด้วยการใช้ 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 เรซินจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยโซเดียมคลอไรด์ และล้างด้วยน้ำกลั่น 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

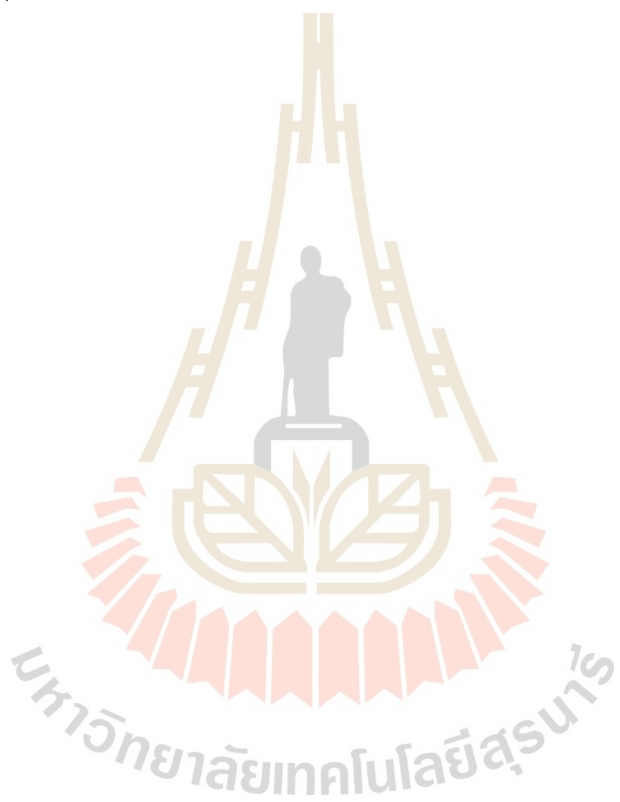
1.1 การแช่แข็งแบบช้า (Slow freezing) โดยตัวอย่างถูกนำเข้าตู้หรือห้องแช่เยือกแข็งอากาศภายในค่อนข้างคงที่ ตัวอย่างต้องใช้ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งนานอาจใช้ระยะเวลาหลายชั่วโมงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่าง การแช่แข็งแบบช้าส่งผลให้ได้ผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ เนื่องมาจากการดึงความร้อนออกได้ช้าทำให้เกิดการขยายตัวของผลึก การขยายตัวของผลึกส่งผลกระทบทำให้เซลล์ของตัวอย่างเกิดความเสียหาย เกิดการหดตัวของตัวอย่าง

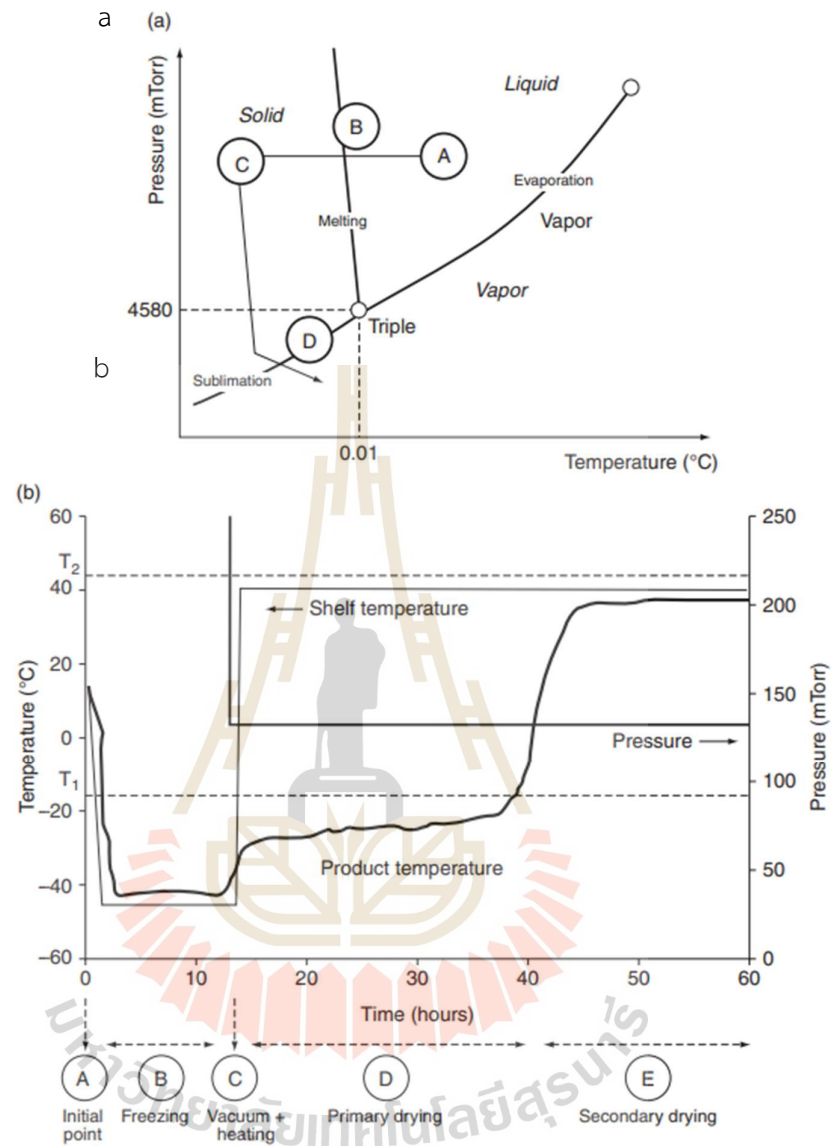
1.2 การแช่แข็งแบบรวดเร็ว (Fast Freezing) อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว มีการเกิดขึ้นของผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็กจำนวนมากและสม่ำเสมอ กระจายทั่วตัวอย่างทั้งภายในเซลล์และภายนอกไม่เกิดการหดตัว ส่งผลให้คุณภาพของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย เมื่อโครงสร้างของตัวอย่างหลังจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีสภาพใกล้เคียงกับตัวอย่างสด

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 มีรูปทรงที่กลม และมีการเกาะติดกันของอนุภาคมากกว่าการใช้อุณหภูมิ 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 ระดับเฉลี่ยของการเกิดพอลิเมอร์ของส่วนที่ละลายได้จะเพิ่มขึ้น 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

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การศึกษาวิธีการสกัด (Extraction) ด้วยการเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อนและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (2) การศึกษาการทำสารสกัดให้บริสุทธิ์ (Purification) ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และ (3) การศึกษาวิธีการทำแห้ง (Drying) โดยเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและแบบแช่เยือกแข็ง โดยการศึกษาทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อปริมาณผลผลิตอินนูลินและคุณภาพของผงอินนูลิน ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของผงอินนูลิน และสมบัติทางเคมีกายภาพ

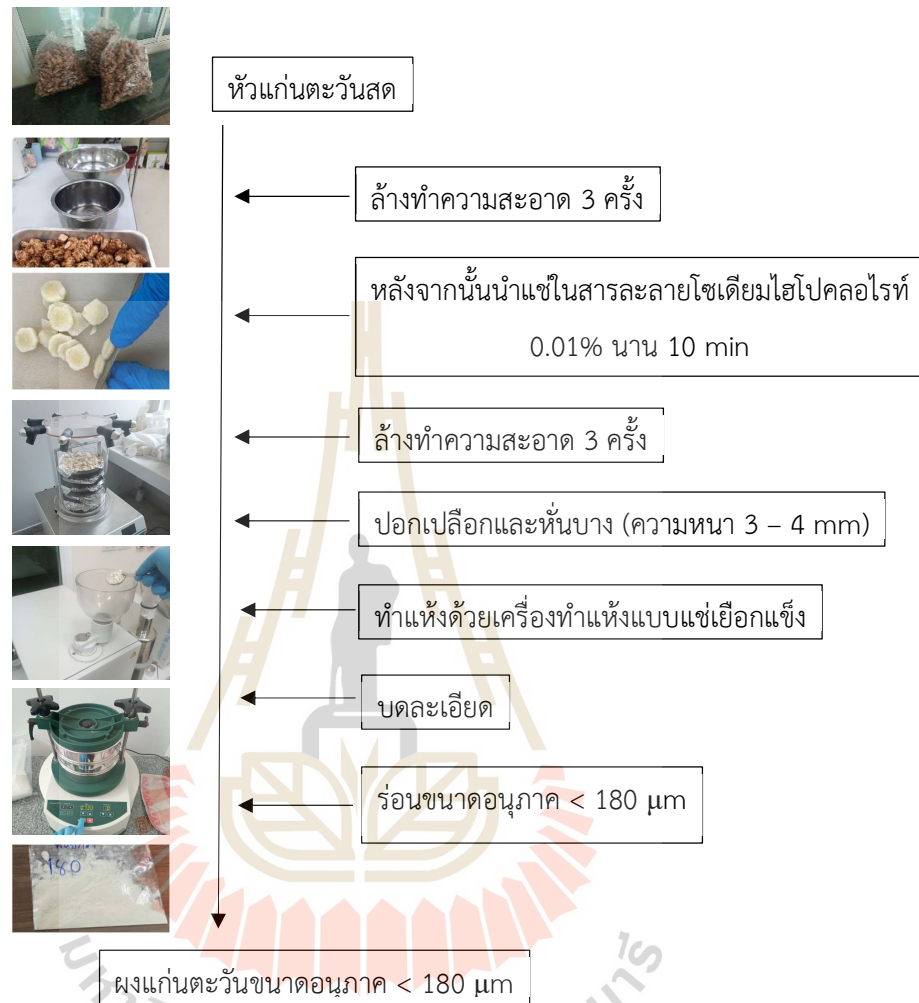
3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

หัวแก่งตะวัน (JAT) ได้รับซื้อมาจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเกษตรแปรรูปแก่งตะวันไต้หวัน ตำบลไทยสามัคคี อำเภอน้ำหนาว จังหวัดนครราชสีมา ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัวแก่งตะวันที่มีอายุหลังการเก็บเกี่ยวระหว่าง 1 – 2 เดือน โดยหัวแก่งตะวันถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C

3.2 การเตรียมผงแก่งตะวัน

งานวิจัยนี้ได้เตรียมหัวแก่งตะวันก่อนนำมาทำผงแก่งตะวัน โดยเริ่มต้นจากการนำหัวแก่งตะวันมาล้างทำความสะอาด 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำหัวแก่งตะวันแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite) 0.01% นาน 10 min เพื่อลดปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ให้น้อยลง แล้วล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดอีก 3 ครั้ง ก่อนปอกเปลือกออกแล้วหั่นเป็นชิ้นบาง ๆ ความหนา ระหว่าง 3 – 4 mm จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -86°C ก่อนนำไปแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer, CoolSafe Touch, LaboGene, Lillerød, Denmark) (รูปที่ 3.2) โดยระหว่างการทำแห้งได้ใช้ความดันอยู่ที่ 0.05 mbar อุณหภูมิของ condenser เท่ากับ -90°C ใช้เวลาทำแห้งนาน 48 h จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาบดลดขนาดด้วยเครื่องบดละเอียดแบบหัวค้อน (Hammer mill, Laboratory Mill 3100, Preten, MA, USA) (รูปที่ 3.3) หลังจากบดแล้วนำผงแก่งตะวันที่ได้ร่อนเพื่อแยกขนาดของผงโดยใช้เครื่องร่อน (Sieve shaker, Octagon 200CL, Endecotts, SW, UK) (รูปที่ 3.4) ให้ได้อนุภาคของผงแก่งตะวันที่มีขนาด 180 µm ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.1

ซึ่งบรรจุผงแก่นตะวันในถุงและเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้ในการสกัดอินนูลินในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.1 การเตรียมผงแก่นตะวันสำหรับงานวิจัย



รูปที่ 3.2 ภาพการดำเนินการทำแห้งห้วแกนตะวันด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 3.3 ภาพการดำเนินการบดห้วแกนตะวันแห้งด้วยเครื่องบดละเอียดแบบหัวค้อน



รูปที่ 3.4 ภาพการดำเนินการร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรงร่อน

3.3 การสกัดสารอินนูลินจากผงแก่นตะวัน

งานวิจัยนี้ได้แบ่งหัววิธีการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ (1) การสกัดอินนูลินด้วยการน้ำร้อน (Hot water extraction, HW-extraction) โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking Water Bath, Shellab, WS272, USA) (รูปที่ 3.6) ซึ่งจัดเป็นวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม และ (2) การสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (Ultrasonic-assisted extraction, UAE-extraction) โดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (13 L Ultrasonic Cleaner, Cole-Parmer, IL, USA) (รูปที่ 3.7) ทั้งนี้ได้การออกแบบวิธีการสกัดอินนูลินโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็ม (Full factorial design) ที่มี 3 ระดับ โดยใช้โปรแกรม Minitab® 17 (Minitab LLC, State College, PA, USA) เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิในการสกัด และระยะเวลาในการสกัดต่อปริมาณอินนูลินในน้ำสกัด (Inulin content) ผลผลิตอินนูลิน (Inulin yield) และความสามารถในการสกัดอินนูลิน (Inulin extractability) โดยอุณหภูมิในการสกัดของ HW-extraction และ UAE-extraction คือ 60°C, 70°C และ 80°C และระยะเวลาในการสกัดของ HW-extraction นาน 20 min, 40 min และ 60 min และ UAE-extraction นาน 5 min, 10 min และ 15 min ดังแสดงการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าอัตราส่วนผงแก่นตะวันต่อน้ำกลั่นที่เหมาะสมคือ 1 g ต่อ 5 mL จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่อุณหภูมิ 4°C รอบของการปั่นเหวี่ยง 10,000 rpm เป็นเวลา 10 min ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Legend XTR, Thermo Scientific, MA, USA) (รูปที่ 3.8) เพื่อแยกกาก (Residue) และสารสกัด

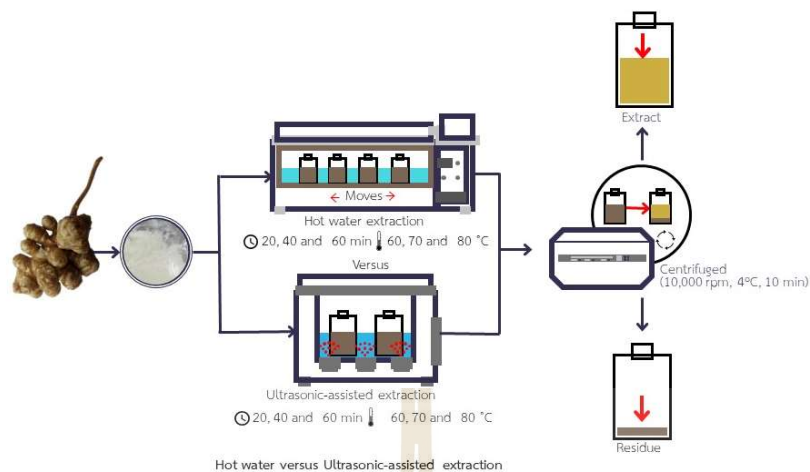
หรือของเหลว (Extract or supernatant) (แสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.5) สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.6 ต่อไป

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design สำหรับการสกัดอินูลินด้วย น้ำร้อน (HW-extraction) โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า

Run order	Temperature (°C)	Time (min)
1	60	60
2	70	40
3	80	60
4	60	20
5	60	40
6	80	20
7	80	40
8	70	20
9	70	60

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design สำหรับการสกัดอินูลินด้วย การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction)

Run order	Temperature (°C)	Time (min)
1	70	15
2	80	5
3	80	15
4	60	5
5	70	10
6	60	15
7	60	10
8	70	5
9	80	10



รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการสกัดสารอินูลินจากผงแก่นตะวัน



รูปที่ 3.6 ภาพการดำเนินการสกัดสารอินูลินด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 ภาพการดำเนินการสกัดสารอินูลินด้วยเครื่องคลื่นเสียงความถี่สูง



รูปที่ 3.8 ภาพการดำเนินการแยกสารสกัดอินูลินออกจากกาก (Residue) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง

3.4 การทำสารสกัดอินูลินให้บริสุทธิ์

หลังจากได้สารสกัดอินูลิน (Extract) ที่แยกออกจากกาก (Residue) ในหัวข้อ 3.3 แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้นำสารสกัดอินูลินมาทำให้บริสุทธิ์มากขึ้น โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) เพื่อแยกสารเจือปนออกจากสารสกัด เช่น การกำจัดสารสี (Decolorization) และการกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) โดยใช้เรซิน 2 ชนิด ได้แก่ Strong acid cation (Amberlite FPC22Na, DuPont™, Delaware, USA) สำหรับกำจัดไอออนบวก และ Weak base anion (Amberlite FPA51, DuPont™, Delaware, USA) สำหรับกำจัดไอออนลบ (ดังแสดงในรูปที่ 3.9) ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของเรซินได้ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Akyıldız et al. (2022) และ Zhang et al. (2022) โดยระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นได้ควบคุมอัตราการไหลของสารสกัดผ่านเรซินให้อยู่ที่

1.5 mL/Sec สารสกัดที่ผ่านการแยกสารเจือปนถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและนำไปทำแห้งด้วยวิธีการในหัวข้อ 3.5 เพื่อให้ได้ผงอินนูลินต่อไป



รูปที่ 3.9 ภาพการดำเนินการทำบริสุทธิ์สารด้วย Ion exchange resin

3.5 การทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

ในงานวิจัยนี้ สารสกัดอินนูลินที่ผ่านการแยกสิ่งเจือปนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแล้วถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่งถูกนำมาทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) และส่วนที่สองถูกนำมาแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) โดยก่อนการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดอินนูลินถูกนำมาทำให้เข้มข้นโดยใช้เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator, N-110, Cole Parmer, Tokyo Rikakikai, Co.,Ltd., Tokyo, Japan) ที่อุณหภูมิ 45°C เพื่อให้ได้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) ที่ 22°Brix (รูปที่ 3.10) การทำแห้งแบบพ่นฝอยได้ใช้เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-dryer, Mini Spray Dryer B-290, Buchi, BÜCHI Labortechnik AG, Flawil, Switzerland) โดยใช้หัวฉีดแบบสองทาง (Two way nozzle) ขนาด Nozzle tip เท่ากับ 0.7 mm และ Nozzle cap เท่ากับ 1.5 mm ซึ่งทำการติดตั้งหัวฉีดและประกอบเครื่อง โดยกำหนดอุณหภูมิขาเข้า (Inlet temperature) ที่ 150°C ความเร็วลม (Aspirator) เท่ากับ 100% Peristaltic pump rate เท่ากับ 25% อัตราการป้อน (Feed flow) อยู่ระหว่าง 8 – 9 mL/min อุณหภูมิขาออก (Outlet temperature) ที่ 75 ± 2°C (รูปที่ 3.11) สำหรับการแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้น สารสกัดอินนูลินถูกนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -86°C (Snijders Labs, Evosafe

Model VF120-86G, Netherlands) นาน 24 h ก่อนนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dryer, CoolSafe Touch, LaboGene, Lillerød, Denmark) (รูปที่ 3.12) โดยสภาวะในการทำแห้งคือ ความดันที่ 0.05 mbar อุณหภูมิของ condenser เท่ากับ -90°C ระยะเวลา 48 h จากนั้นบรรจุผงอินนูลินในถุงและเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น (Desiccator) ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพในหัวข้อ 3.6 ต่อไป



รูปที่ 3.10 ภาพการดำเนินการทำให้สารสกัดเข้มข้นเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน



รูปที่ 3.11 การทำแห้งแบบพ่นฝอยสารสกัดอินนูลิน



รูปที่ 3.12 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสารสกัดอินนูลิน

3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงแก่นตะวันและผงอินนูลิน

3.6.1 สมบัติทางเคมี

3.6.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content) โดยการชั่งผงของสารสกัด 3 g แล้วนำไปวิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (OHAUS, MB-25, OHAUS Instruments Co., Ltd., Shanghai, China) (รูปที่ 3.13) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผงอินนูลิน

3.6.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) โดยชั่งผงของสารสกัด 1 g แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่องวัดค่า Water Activity (AquaLab Pre, METER Group, Inc., WA, USA) (รูปที่ 3.14) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงอินนูลิน

3.6.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content) โดยนำผงแก่นตะวันแห้งและผงอินนูลินแห้งมาวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าด้วยเตาเผา (CBF Series, Cole-Parmer, NC, USA) ที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 24 h (รูปที่ 3.15) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.15 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าด้วยเตาเผา

3.6.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลิน

การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลินโดยใช้ชุดทดสอบ Fructan Assay Kit (Megazyme International, Wicklow, Ireland) (รูปที่ 3.16) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.16 ชุดทดสอบ Fructan Assay Kit

3.6.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนกับ

เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

โครงสร้างทางเคมีของอินนูลินถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Synchrotron-radiation-based Fourier transform infrared, SR-FTIR) โดยเริ่มจากการละลายผงสารสกัดอินนูลินในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 10 mg/mL จากนั้นหยดสารละลายลงบนแผ่นผลึกโพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium bromide (KBr) window) แล้วปล่อยให้แห้ง นำตัวอย่างที่ได้วางบนกล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด (IR microscope, Bruker Hyperion 2000) ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด (Vertex 70 FTIR Spectrometer, Bruker Optics, Ettlingen, Germany) โดยเครื่องมือทั้งหมดนี้ตั้งอยู่ที่แนวลำแสงอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและการสร้างภาพ (Infrared Spectroscopy and Imaging Beamline, BL4.1) ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ข้อมูลจากการวิเคราะห์ถูกควบคุมและจัดเก็บผ่านโปรแกรม OPUS เวอร์ชัน 7.2 ที่ช่วงความยาวคลื่น $3800 - 800 \text{ cm}^{-1}$, ความละเอียดของสเปกตรัม (Spectral resolution) 4 cm^{-1} และจำนวนสแกน 64 รอบ/ครั้ง โดยใช้อากาศเป็นตัวอ้างอิง (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงสารสกัดอินนูลินด้วย SR-FTIR

3.6.1.6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก (Crystallinity) ของผงสารสกัดอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนดำเนินการโดยใช้เทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์มุมกว้าง ((Synchrotron-radiation-based wide angle X-ray scattering, SR-WAXS) โดยตัวอย่างถูกติดบนเฟรมอะลูมิเนียมแล้วนำไปวิเคราะห์ที่ระบบลำแสงที่ 1.3W :SAXS/WAXS (BL1.3W: WAXSสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ประเทศไทย) โดยใช้พลังงาน 9 KeV และตรวจวัดด้วยหัววัด MarCCD LX170HS ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAXSIT ซึ่งพัฒนาโดยนักวิทยาศาสตร์ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (ประเทศไทย) (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก (Crystallinity)

3.6.2 สมบัติทางกายภาพ

3.6.2.1 การวิเคราะห์อัตราการจัดสี (Decolorization ratio) ของสารสกัด

สารสกัดที่ถูกทำให้บริสุทธิ์ถูกนำมาวิเคราะห์อัตราการจัดสี (Decolorization ratio) ตามวิธีของ Zhang et al. (2022) โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดที่ความยาวคลื่น 420 nm และ 720 nm ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer, U2900, Hitachi, Kyoto, Japan) (รูปที่ 3.19) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และคำนวณอัตราการจัดสีตามสมการที่ 1

$$\text{Decolorization ratio (\%)} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ A_1 คือ ความแตกต่างของค่าแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารสกัดก่อนกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ที่ช่วงความยาวคลื่น 420 nm และ 720 nm

A_2 ความแตกต่างของค่าแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารสกัดหลังกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ที่ช่วงความยาวคลื่น 420 nm และ 720 nm



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)

3.6.2.2 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ความหนาแน่นปรากฏ Tapped density, Carr's index และ Hausner ratio

การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density), Tapped density, Carr's index และ Hausner ratio ในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ตามวิธีการของศิริพร (2561) สำหรับ tapped density ได้จากการนำกระบอกตวงที่บรรจุผงอินนูลินมาเคาะบนฝ่าจำนวน 50 ครั้ง และบันทึกปริมาตรที่อ่านได้ และสามารถคำนวณปริมาณผลผลิตทั้งหมด ความหนาแน่นปรากฏ และ Tapped density ด้วยสมการ 2 – 4 ตามลำดับ คำนวณ Carr's index และ Hausner ratio ด้วยสมการ 5 – 6 ตามลำดับ (Yousefi et al. 2022; Arepally and Goswami, 2018) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

$$\text{ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (\%)} = \frac{\text{มวลของผงอินนูลิน (g)}}{\text{มวลของผงแก่นตะวันก่อนการสกัด (g)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (g/mL)} = \frac{\text{มวลผงอินนูลิน (g)}}{\text{ปริมาตร (mL)}} \quad (3)$$

$$\text{Tapped density (g/mL)} = \frac{\text{มวลผงอินนูลิน (g)}}{\text{ปริมาตร (mL)}} \quad (4)$$

$$\text{Carr's index (\%)} = \frac{\text{Tapped density (g/mL)} - \text{Bulk density (g/mL)}}{\text{Tapped density (g/mL)}} \quad (5)$$

$$\text{Hausner ratio} = \frac{\text{Tapped density (g/mL)}}{\text{Bulk density (g/mL)}} \quad (6)$$

3.6.2.3 ความสามารถในการละลาย

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของผงแก่นตะวัน และผงอินนูลิน ดัดแปลงจากวิธีการของ ศิริพร (2561) โดยชั่งผงอินนูลิน 1 g ละลายในน้ำกลั่น 5 mL จากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Legend XTR, Thermo Scientific, MA, USA) โดยใช้ความเร็วรอบ 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4°C นาน 15 min จากนั้นแยกส่วนของเหลวเทลงในถ้วยอะลูมิเนียม แล้วนำตัวอย่างเข้าตู้อบลมร้อนที่ 105°C นาน 5 h และนำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ก่อนชั่งน้ำหนักหลังอบ โดยความสามารถในการละลายสามารถคำนวณด้วยสมการที่ 7 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

$$\text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{มวลของผงสารสกัดหลังอบ (g)}}{\text{มวลของผงสารสกัดก่อนอบ (g)}} \times 100 \quad (7)$$

3.6.2.4 ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ

ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ (Hygroscopicity) โดยชั่งผงสารสกัด 0.5 g ใส่ลงในถ้วยอะลูมิเนียม จากนั้นนำใส่ในตู้อบควบคุมความชื้น (CTC256, Memmert, Memmert GmbH+Co.KG, Germany) (รูปที่ 3.20) โดยอุณหภูมิอยู่ที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90%RH ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3,600 min นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักหลังเข้าสู่สมดุล และคำนวณค่าความสามารถในการดูดความชื้นตามสมการที่ 8

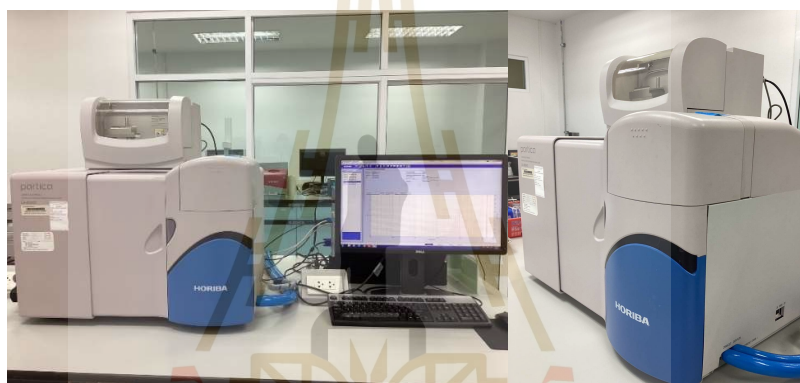
$$\text{ความสามารถในการดูดความชื้น (\%)} = \frac{\text{มวลของผงสารสกัดหลังเข้าสู่สมดุล (g)} - \text{มวลของผงสารสกัดเริ่มต้น (g)}}{\text{มวลของผงสารสกัดเริ่มต้น (g)}} \times 100 \quad (8)$$



รูปที่ 3.20 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นกลับ

3.6.2.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัว

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของผงอินนูลินด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer, LA-9502v, Horiba, Kyoto, Japan) (รูปที่ 3.21) ได้ใช้ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เป็นสารตัวกลางซึ่งทำให้ผงของอินนูลิน กระจายตัวได้ดี โดยนำผงอินนูลิน 10 mg ละลายในไอโซโพรพานอล 10 mL จากนั้นทำการคนจนกระทั่งตัวอย่างกระจายตัวสม่ำเสมอในสารตัวกลาง หลังจากนั้นดูดตัวอย่างที่เตรียมแล้วใส่ใน Sample cell ที่บรรจุด้วยไอโซโพรพานอล และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเพื่อคำนวณหาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผง โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.21 ภาพการดำเนินการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัว

3.6.2.6 การศึกษาโครงสร้างทางระดับจุลภาค

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลของวิธีการสกัดต่อลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของผงแก่นตะวันที่ได้หลังจากการสกัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีการปล่อยสนามไฟฟ้า (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) (ดังแสดงในรูปที่ 3.22) ที่ระดับพลังงาน 10 kV โดยทำการถ่ายภาพตัวอย่างที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 3,000 เท่า ตามลำดับ เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงอินนูลินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีการใช้น้ำร้อนและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด



รูปที่ 3.22 การศึกษาโครงสร้างทางระดับจุลภาคของผงแท่นตะวันหลังจากการสกัด

3.6.2.7 การวิเคราะห์ค่าสี (Color value)

ผงแท่นตะวัน ผงสารสกัดอินนูลิน และผงอินนูลินถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพด้านสีด้วยเครื่องวัดสี (Ultrascan VIS, ColorQuest® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) (รูปที่ 3.23) ใน CIE L* a* b* โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่างของตัวอย่าง (Lightness) ค่า a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่าง (Redness) และค่า b* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลืองของตัวอย่าง (Yellowness) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI) ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) และวิเคราะห์ค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index, BI) ตามวิธีของ Shewale and Hebbar (2016) โดยคำนวณด้วยสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

ดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI)

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (9)$$

ดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (browning index, BI)

$$BI = \frac{100 (x - 0.31)}{0.17} \quad (10)$$

$$\text{โดย } x = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*}$$



รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของวิธีการสกัด (2) การศึกษาวิธีทำสารสกัดให้บริสุทธิ์ และ (3) การศึกษาผลของวิธีการทำแห้ง โดยการศึกษาผลของวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อนในการสกัดและการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดต่อปริมาณผลผลิตอินูลินนั้นได้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็ม (Full factorial design) และวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) โดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Turkey's Honestly Significant Difference (HSD) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) สำหรับการศึกษาวิธีทำสารสกัดอินูลินให้บริสุทธิ์โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารสกัดอินูลิน และการศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดนั้นได้นำผงอินูลินที่ได้มาทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ การทดลองนี้ได้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) และวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีการทดสอบของ Turkey's honestly significant difference (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) โดยโปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การผลิตผงอินนูลินจากหัวแก่้นตะวันสามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตหลัก ๆ ออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การสกัดอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน การทำให้สารสกัดมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และการทำแห้งเพื่อให้ได้ผงอินนูลิน โดยทั้ง 3 ขั้นตอนนี้มีผลต่อปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลิน โดยในส่วนของการวิจัยในบทนี้ได้แบ่งผลการศึกษาดังกล่าวออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน (2) การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน และ (3) การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

4.1 การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน

ผลการวิจัยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดอินนูลินด้วยการนำร้อน (HW-extraction) ซึ่งจัดเป็นวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม และการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) โดยหลังจากการสกัดได้แยกส่วนของเหลวหรือสารสกัด (Extract) ออกจากกาก (Residue) ในส่วนสารสกัดได้ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ปริมาณเถ้า ปริมาณอินนูลิน นอกจากนี้ได้วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงสารสกัดอินนูลินด้วย SR-FTIR และการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงสารสกัดอินนูลินด้วย SR-WAXS ส่วนของกากได้ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM

4.1.1 สมบัติทางเคมีของสารสกัด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) โดยอุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลาในการสกัดนาน 20, 40 และ 60 min ในตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก HW-extraction พบว่า TSS ของสารสกัด (Extract) จาก HW-extraction มีค่าอยู่ระหว่าง 14.71 – 15.50°Brix โดยการสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min มีผลทำให้ได้ TSS สูงสุด (15.50°Brix) ซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการสกัดที่อุณหภูมิ 70°C นาน 20 min TSS ในสารสกัดมีค่าต่ำสุด (14.71°Brix) จากผลการทดลอง

แสดงให้เห็นว่า การใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นในการสกัดทำให้ได้ TSS สูงสุด ซึ่งเพียงพอต่อการสกัด TSS อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ Redondo-Cuenca et al. (2021) รายงานว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในสารสกัด (Extract) จากผงแก่นตะวัน ได้แก่ อินนูลิน ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุคโตส

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก HW-extraction

Run order	Temperature (°C)	Time (min)	TSS (°Brix) ¹	pH ²	Conductivity (mS/cm) ³
1	60	60	15.20±0.23 ^{ab}	5.99±0.02 ^{cde}	7.33±0.01 ^b
2	70	40	14.71±0.73 ^b	5.96±0.03 ^{de}	9.37±0.04 ^a
3	80	60	14.98±0.20 ^{ab}	5.99±0.01 ^{cd}	9.48±0.04 ^a
4	60	20	15.50±0.38 ^a	6.08±0.02 ^a	7.31±0.01 ^b
5	60	40	15.45±0.53 ^{ab}	6.05±0.01 ^{ab}	7.30±0.02 ^b
6	80	20	14.98±0.17 ^{ab}	6.01±0.02 ^{bc}	9.38±0.08 ^a
7	80	40	15.00±0.11 ^{ab}	5.99±0.02 ^{cd}	9.49±0.05 ^a
8	70	20	14.89±0.43 ^{ab}	5.99±0.03 ^{cd}	9.45±0.11 ^a
9	70	60	14.84±0.13 ^{ab}	5.95±0.03 ^e	9.48±0.20 ^a

^{1,2,3} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same column indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$).

ในตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารสกัด ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 5.95 – 6.08 จากการทดลองพบว่า การสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นมีผลทำให้ได้ pH สูงสุด (6.08) ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิในการสกัดที่ต่ำกว่าทำให้เกิดการปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้การเกิดสารที่มีความเป็นกรดได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C พบว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการสกัดจาก 20 เป็น 60 min มีผลทำให้ได้ค่า pH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ที่อุณหภูมิ 80°C การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่ในการสกัดจาก 20 min เป็น 60 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารสกัด ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Paseephol et al. (2007) รายงานว่า การสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 – 98°C นาน 10 min สารสกัดที่ได้นั้น

มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5 – 6 และ Hilman et al. (2020) พบว่า การสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวัน ด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C นาน 60 min ทำให้ได้สารสกัดที่มีค่า pH เท่ากับ 6.5 โดยค่า pH ในช่วง 5 – 7 ถือว่าเป็นช่วงปกติที่พบได้ทั่วไปในการสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อน จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ในงานวิจัยนี้ การสกัดสารจากผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนทำให้ได้ค่า pH ของสารสกัดอยู่ระหว่าง 5.95 – 6.08 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยอื่น ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดอินนูลินจากพืชด้วยน้ำร้อน

การนำไฟฟ้าของสารละลายขึ้นอยู่กับปริมาณสารที่มีประจุหรือไอออน (Ionic species) เช่น Na^+ และ Cl^- ซึ่งเมื่อมีสารที่มีไอออนปนเปื้อนในปริมาณสูง จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสูงขึ้นด้วย (Zhang et al., 2022) ในงานวิจัยนี้ ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัดอยู่ระหว่าง 7.30 – 9.49 mS/cm (ตารางที่ 4.1) จากผลการทดลอง พบว่า การสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด 20, 40 และ 60 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัด ($p>0.05$) แต่การสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ การสกัดอุณหภูมิ 60°C นั้นการเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจาก 20 min เป็น 60 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัด ($p>0.05$) ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2022) ซึ่งพบว่า การสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันทำให้ได้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5.76 – 8.31 mS/cm แต่ค่าการนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้สูงกว่าของ Dobre et al. (2008) ที่สกัดอินนูลินจากผงชิโครีด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70°C นาน 30 – 40 min ซึ่งพบว่า สารสกัดมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 2.7 – 3.1 mS/cm ความแตกต่างนี้อาจเนื่องมาจากแหล่งที่มาของวัตถุดิบ (หัวแก่นตะวัน) และสภาวะการสกัดที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัด ซึ่งส่งผลต่อปริมาณและชนิดของไอออนที่ละลายออกมาในสารสกัด

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก UAE-extraction ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลาในการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min พบว่า TSS ของสารสกัด (Extract) จาก UAE-extraction มีค่าอยู่ระหว่าง 14.95 – 17.10°Brix ทั้งนี้ การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ TSS อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่การเพิ่มอุณหภูมิจาก 60 และ 70°C เป็น 80°C มีผลทำให้ TSS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) การเพิ่มขึ้นของ TSS นี้ อาจเกิดจากการสลายตัวของสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ของผงแก่นตะวัน โดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น แป้ง ซึ่งถูกย่อยสลายให้กลายเป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE) ซึ่งทำให้ปริมาณของสารที่ละลายได้ในสารสกัดเพิ่มขึ้น (Bonto et al., 2021;

Phan et al., 2020) ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Zarroug et al. (2016) ที่รายงานว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 80°C สามารถเพิ่ม TSS จากซิโครีได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ในงานวิจัยนี้ TSS ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก UAE-extraction ใกล้เคียงกับที่ได้จาก HW-extraction (ตารางที่ 4.1) ยกเว้นการสกัดด้วย UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 80°C มีผลทำให้ได้ TSS สูงกว่า HW-extraction ผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิสูง (80°C) ทำให้ TSS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า (60°C และ 70°C)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS), pH, และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด (Extract) ที่ได้จาก UAE-extraction

Run order	Temperature (°C)	Time (min)	TSS (°Brix) ¹	pH ²	Conductivity (mS/cm) ³
1	70	15	15.10±0.12 ^b	6.02±0.02 ^{def}	7.33±0.00 ^c
2	80	5	17.10±0.38 ^a	5.98±0.01 ^f	6.73±0.01 ^d
3	80	15	16.60±0.16 ^a	5.98±0.01 ^f	6.68±0.01 ^e
4	60	5	15.40±0.40 ^b	6.20±0.02 ^a	7.43±0.02 ^a
5	70	10	15.05±0.10 ^b	6.07±0.01 ^{bc}	7.39±0.02 ^b
6	60	15	15.15±0.10 ^b	6.04±0.02 ^{cde}	7.43±0.02 ^a
7	60	10	14.95±0.10 ^b	6.05±0.01 ^{cd}	7.32±0.00 ^c
8	70	5	15.05±0.10 ^b	6.10±0.03 ^b	7.40±0.02 ^{ab}
9	80	10	16.85±0.38 ^a	5.99±0.01 ^{ef}	6.68±0.01 ^e

^{1,2,3} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same column indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$).

ค่า pH ของสารสกัดจาก UAE-extraction อยู่ในช่วง 5.98 – 6.20 (ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้การสกัดด้วย UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 5 min มีผลทำให้ค่า pH (6.20) สูงกว่าการเพิ่มระยะเวลาการสกัดเป็น 10 และ 15 min รวมทั้งการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดเป็น 70 และ 80°C ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการสกัดสารจาก HW-extraction (ตารางที่ 4.1) โดยอุณหภูมิในการสกัดที่ต่ำกว่าทำให้เกิดสารที่มีความเป็นกรดได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม Hilman et al. (2018) รายงานว่า สารสกัดอินนูลินที่ได้จากผงแก่นตะวันซึ่งใช้คลื่น

เสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 5 min มีค่า pH เท่ากับ 6.55 นอกจากนี้ Paseephol et al. (2009) รายงานว่า ค่า pH ของสารสกัดอินนูลินที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อนมักอยู่ในช่วง 5 – 7

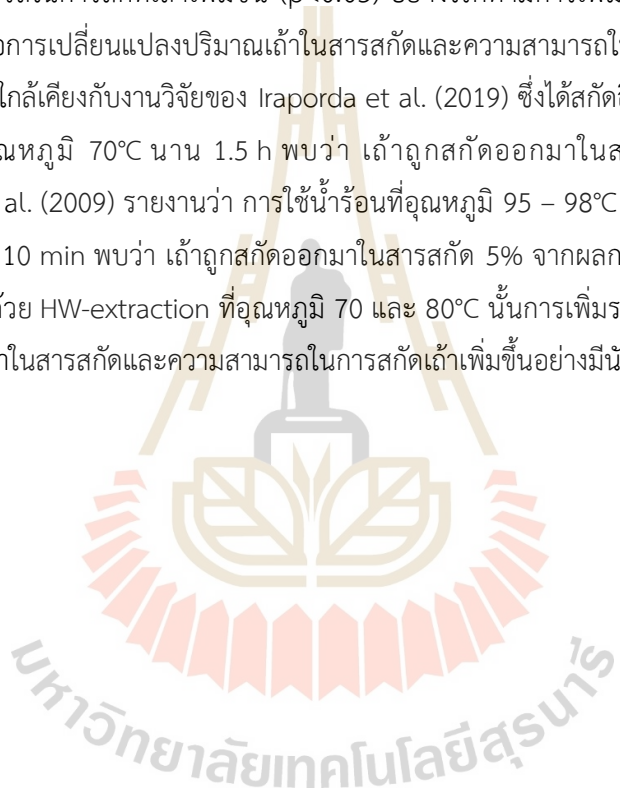
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดจาก UAE-extraction ซึ่งอยู่ในช่วง 6.68 – 7.43 mS/cm ซึ่งพบว่า การสกัด UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 5 และ 15 min มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดสูงสุด (7.43 mS/cm) ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด UAE-extraction เป็น 80°C มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE) ในการสกัดที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบที่มีไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายได้ในสารสกัด หรือกระตุ้นการสร้างสารประกอบใหม่ที่ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดลดลงด้วย

จากผลการทดลองเปรียบเทียบวิธีการสกัดอินนูลินด้วยการนำร้อน (HW-extraction) และการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ต่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารสกัด สามารถสรุปได้ว่า การใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้นในการสกัดด้วย HW-extraction ทำให้ได้ TSS สูงสุด แต่การสกัดด้วย UAE-extraction โดยใช้อุณหภูมิสูง (80°C) มีผลทำให้ TSS เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเกิดจากการสลายตัวของสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ของผงแก่นตะวันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE) ซึ่งทำให้ปริมาณของสารที่ละลายได้ในสารสกัดเพิ่มขึ้น การสกัดด้วย UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 5 min มีผลทำให้ค่า pH (6.20) สูงกว่าการเพิ่มระยะเวลาการสกัดเป็น 10 และ 15 min รวมทั้งการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดเป็น 70 และ 80°C ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการสกัดสารจาก HW-extraction อย่างไรก็ตาม การสกัดด้วย HW-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C อย่างมีนัยสำคัญ แต่การสกัดด้วย UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 5 และ 15 min มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดสูงสุดทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE) ในการสกัดที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบที่มีไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายได้ในสารสกัด หรือกระตุ้นการสร้างสารประกอบใหม่ที่ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดลดลงด้วย

ตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณเถ้าของสารสกัด (Ash) และความสามารถในการสกัดเถ้า (Ash extractability) ของการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) และด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) เถ้าเป็นส่วนประกอบอินทรีย์

ที่หลงเหลือหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา ปริมาณเถ้าสามารถใช้ประเมินแร่ธาตุทั้งหมดในตัวอย่างได้

ปริมาณเถ้าของสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้าของ HW-extraction ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 20, 40 และ 60 min พบว่า อยู่ระหว่าง 5.08 – 8.85% และ 47.58 – 98.05% ตามลำดับ โดยการสกัดที่อุณหภูมิ 60°C เวลา 20, 40 และ 60 min ปริมาณเถ้าและความสามารถในการสกัดเถ้าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ระยะเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 min มีผลทำให้ปริมาณเถ้าและความสามารถในการสกัดเถ้าเพิ่มขึ้น ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิจาก 70°C เป็น 80°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าในสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้า งานวิจัยนี้ปริมาณเถ้ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Iraporda et al. (2019) ซึ่งได้สกัดอินูลินจากผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 70°C นาน 1.5 h พบว่า เถ้าถูกสกัดออกมาในสารสกัดเท่ากับ 4.40% Paseephol et al. (2009) รายงานว่า การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 – 98°C สกัดอินูลินจากผงแก่นตะวันเป็นเวลา 10 min พบว่า เถ้าถูกสกัดออกมาในสารสกัด 5% จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วย HW-extraction ที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C นั้นการเพิ่มระยะเวลาในการสกัดมีผลทำให้ปริมาณเถ้าในสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 4.3 ปริมาณเถ้าของสารสกัด (Extract) และความสามารถในการสกัดเถ้าจาก HW-extraction

Run order	Temperature (°C)	Time (min)	Ash content (%) ¹	Ash extractability (%) ²
1	60	60	6.42±0.06 ^d	95.34±0.83 ^b
2	70	40	7.53±0.28 ^b	76.15±3.94 ^b
3	80	60	8.72±0.49 ^c	81.63±1.38 ^c
4	60	20	6.40±0.09 ^{cd}	98.05±1.37 ^b
5	60	40	6.22±0.03 ^{cd}	95.45±0.46 ^b
6	80	20	5.08±0.62 ^{ab}	47.58±8.15 ^{ab}
7	80	40	5.14±0.45 ^{ab}	47.92±5.87 ^{ab}
8	70	20	5.25±0.22 ^a	54.60±2.80 ^a
9	70	60	8.85±0.84 ^{cd}	83.04±11.17 ^c

^{1,2} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same column indicate statistically significant differences between treatments ($p<0.05$).

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C นาน 5, 10 และ 15 min พบว่า ปริมาณเถ้าของสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้า มีค่าอยู่ระหว่าง 3.33 – 3.64% และ 66.51 – 74.20% ตามลำดับ โดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 5, 10 และ 15 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าในสารสกัด ($p>0.05$) (ตารางที่ 4.4) อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 60°C และที่อุณหภูมิ 80°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 เป็น 15 min มีผลทำให้ความสามารถในการสกัดเถ้า ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณเถ้าของสารสกัด (Extract) และความสามารถในการสกัดเถ้าจาก UAE-extraction

Run order	Temperature (°C)	Time (min)	Ash content (%) ¹	Ash extractability (%) ²
1	70	15	3.66±0.03 ^a	73.16±0.69 ^{ab}
2	80	5	3.64±0.08 ^a	72.76±1.56 ^{ab}
3	80	15	3.53±0.03 ^a	70.54±0.57 ^{cd}
4	60	5	3.64±0.04 ^a	72.65±0.76 ^{abc}
5	70	10	3.61±0.04 ^a	72.14±0.79 ^{abc}
6	60	15	3.37±0.03 ^a	67.28±0.61 ^e
7	60	10	3.45±0.05 ^a	68.92±1.06 ^{de}
8	70	5	3.58±0.28 ^a	74.20±0.55 ^a
9	80	10	3.57±0.03 ^a	71.34±0.64 ^{bc}

^{1,2} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same column indicate statistically significant differences between treatments (p<0.05).

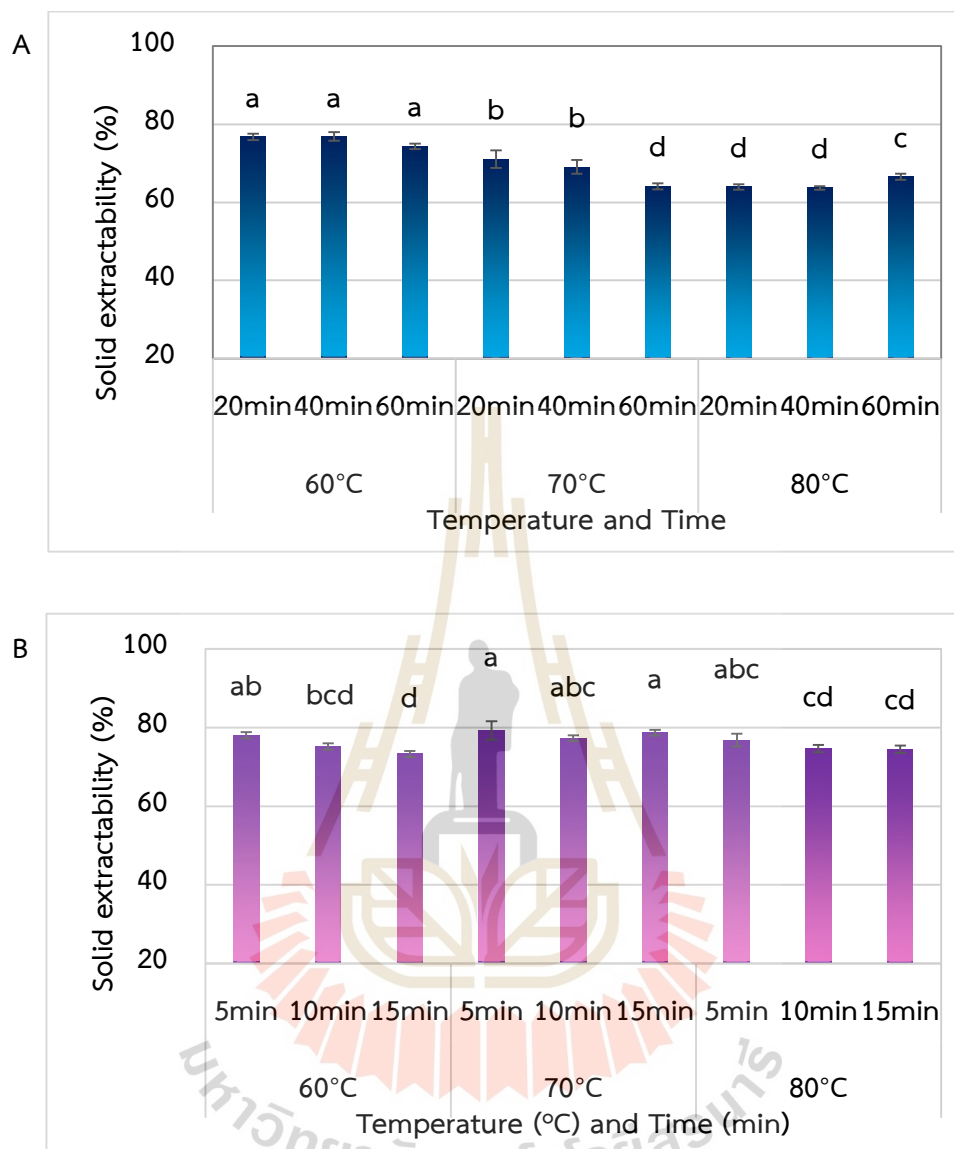
เมื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วย HW-extraction และการสกัดด้วย UAE-extraction ต่อปริมาณของเถ้าของสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้า สามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) มีปริมาณเถ้าในสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้าต่ำกว่า วิธีการสกัดด้วย HW-extraction ทั้งนี้เนื่องจาก UAE-extraction ใช้ระยะเวลาการสกัดที่สั้นกว่าและเกิดปรากฏการณ์แคปพิเทชัน (Cavitation) จากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ทำให้ฟองอากาศหรือโพรงอากาศในของเหลวเกิดขึ้นและยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดพลังงานสูงและแรงเฉือน (Shear forces) ส่งผลให้สามารถช่วยดึงเฉพาะสารละลายง่ายออกมาในสารสกัด (Bonto et al., 2021; Xu et al., 2021; Chen et al., 2022) แต่การละลายของแร่ธาตุอาจจะต้องใช้ระยะเวลา โดยวิธีการสกัดด้วย HW-extraction ใช้เวลานานกว่าอาจทำให้แร่ธาตุเหล่านี้ละลายออกมามากขึ้น

รูปที่ 4.1 แสดงความสามารถในการสกัดของแข็ง (Solid extractability) จากการสกัดผงแก่นตะวันด้วยวิธี HW-extraction มีค่าอยู่ระหว่าง 63.74% – 76.88% (รูปที่ 4.1 A) และการสกัดด้วย UAE-extraction มีค่าอยู่ระหว่าง 73.30% – 79.26% (รูปที่ 4.1 B) โดย Paseephol

et al. (2007) รายงานว่า ของแข็งที่สกัดได้จากการสกัดผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อน ส่วนใหญ่จะเป็น คาร์โบไฮเดรต เช่น อินนูลิน ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เพกติน หรือผนังเซลล์พืช เป็นต้น

จากการสกัดผงแก่นตะวันด้วย HW-extraction พบว่า การสกัดด้วยน้ำร้อนที่ อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาในการสกัด (20 – 60 min) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการสกัดของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) (รูปที่ 4.1 A) อย่างไรก็ตามการเพิ่ม อุณหภูมิในการสกัดจาก 60°C เป็น 70°C และ 80°C มีผลทำให้ความสามารถในการสกัดของแข็ง อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรต เช่น อินนูลิน และฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ถูกย่อยสลายหรือมีการสูญเสียสารประกอบที่ระเหยได้ ทำให้ ของแข็งที่สกัดได้มีปริมาณลดลง งานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Zhang et al. (2022) ซึ่งรายงานว่าการ สกัดอินนูลินจากแก่นตะวันด้วยอุณหภูมิ 50 – 80°C นาน 30 – 75 min พบว่า อุณหภูมิในการสกัด 60°C นาน 60 min ทำให้สกัดของแข็งออกมาได้สูงสุดอยู่ที่ 85.7% แต่ปริมาณอินนูลินลดลงเมื่อเพิ่ม ระยะเวลาการสกัดนานกว่า 60 min ทั้งนี้อาจเนื่องจากระยะเวลาในการสกัดที่นานขึ้น มีผลทำให้ อินนูลินถูกย่อยสลายหรือถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolysis) มากขึ้น นอกจากนี้ Redondo-Cuenca et al. (2021) ซึ่งรายงานว่าการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 – 80°C นาน 20 – 60 min สามารถสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ได้ระหว่าง 48.06 – 81.12% โดยสภาวะที่ เหมาะในการสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์คือ อุณหภูมิ 62.4°C ระยะเวลา 21.7 min ซึ่ง ทำให้ได้ปริมาณอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เท่ากับ 81.12%

ในงานวิจัยนี้ การสกัดผงแก่นตะวันด้วย UAE-extraction พบว่า การสกัดที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดเป็น 60 min มีผลทำให้ความสามารถในการสกัดของแข็งลดลง ($p<0.05$) แต่การสกัดที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C นั้นการเพิ่มระยะเวลาการสกัด จาก 20 เป็น 60 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการสกัดของแข็ง ($p>0.05$) (รูปที่ 4.1 B) ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจาก การสกัดที่อุณหภูมิ 60°C การเกิดปรากฏการณ์แคปพิเทชัน (Cavitation) จากการใช้คลื่น เสียงความถี่สูง สามารถสกัดสารออกมาได้ในระยะเวลานั้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการสกัดทำให้เกิด การย่อยสลายของสารบางอย่าง จากงานวิจัยของ Xu et al. (2021) รายงานว่า เกิดปรากฏการณ์ แคปพิเทชัน (Cavitation) จากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ทำให้เกิดฟองอากาศและเกิดการยุบตัวอย่าง รวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนสูง (Shear forces) ส่งผลให้เกิดการสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ปรากฏการณ์แคปพิเทชันยังสามารถทำให้พันธะโควาเลนต์ถูกทำลายได้



รูปที่ 4.1 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อความสามารถในการสกัดของแข็ง (Solid extractability) ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วย HW-extraction และการสกัดด้วย UAE-extraction ต่อความสามารถในการสกัดของแข็ง สามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C มีประสิทธิภาพในการสกัดของแข็งสูงกว่าการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิเท่ากัน แต่ใช้ระยะเวลาในการสกัดสั้นกว่า อย่างไรก็ตาม UAE-extraction และ HW-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C มีผลทำให้ความสามารถในการสกัดของแข็ง

ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การสกัดที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C UAE-extraction มีประสิทธิภาพในการสกัดของแข็งมากกว่า HW-extraction โดย UAE-extraction ใช้เวลาในการสกัดสั้นกว่า แต่ทำให้ความสามารถในการสกัดของแข็งสูงกว่าเมื่อเทียบกับ HW-extraction

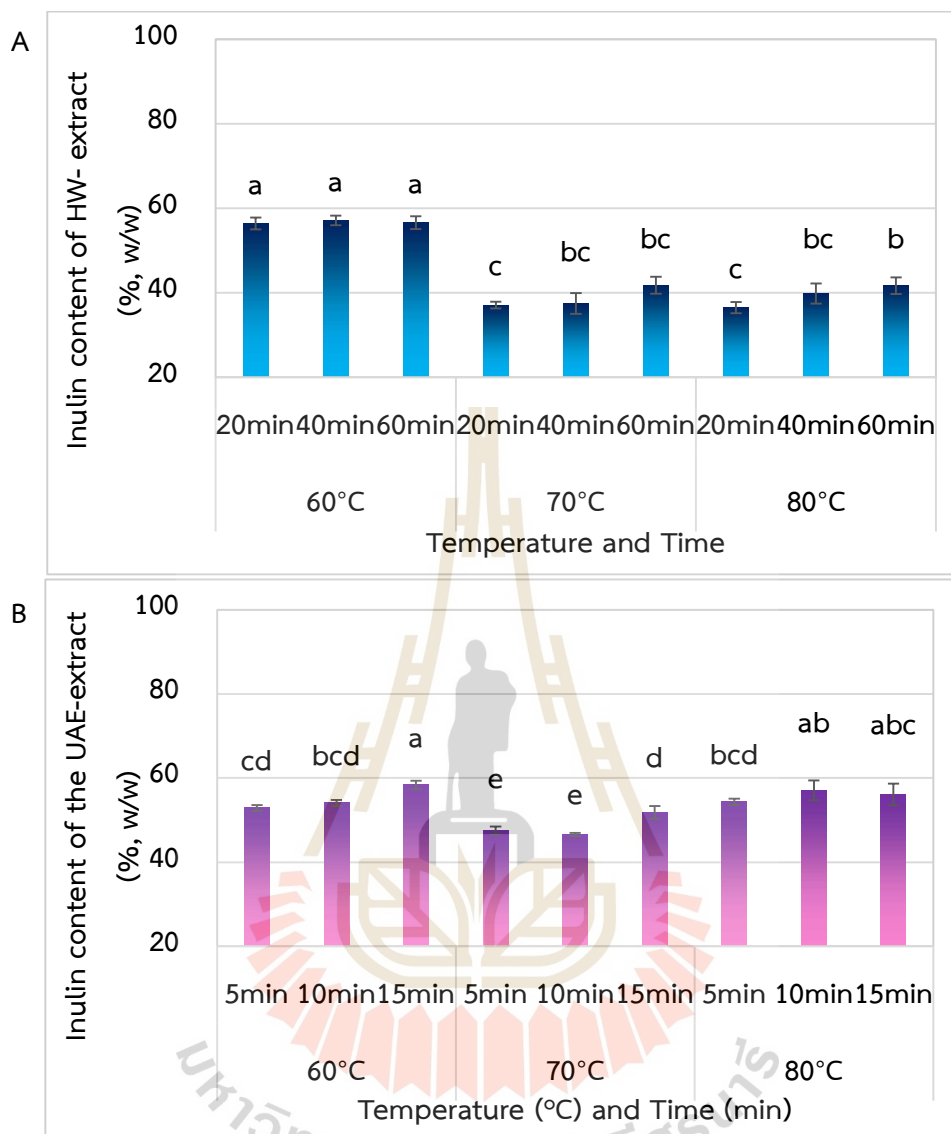
รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงปริมาณอินนูลินของสารสกัด (Inulin content) ปริมาณผลผลิตอินนูลิน (Inulin yield) และความสามารถในการสกัดอินนูลิน (Inulin extractability) จากการสกัดผงแก่นตะวันด้วยวิธี HW-extraction และการสกัดด้วย UAE-extraction

รูปที่ 4.2 A แสดงปริมาณอินนูลินของสารสกัดด้วย HW-extraction ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 36.47 – 57.09% ปริมาณที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าจาก Zhang et al. (2022) ซึ่งรายงานว่าการสกัดอินนูลินจากแก่นตะวันด้วยอุณหภูมิ 74°C นาน 65 min ทำให้ได้ปริมาณอินนูลิน 85.4% รูปที่ 4.3 A แสดงปริมาณผลผลิตอินนูลิน จากการสกัดด้วย HW-extraction มีค่าอยู่ระหว่าง 23.33 – 43.89% โดยปริมาณผลผลิตอินนูลินในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าจากงานวิจัยของ Hilman et al. (2020) ซึ่งรายงานว่าการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C นาน 60 min สามารถสกัดอินนูลินได้ 6.35% รูปที่ 4.4 A แสดงความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดด้วย HW-extraction ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 70.57 – 94.88% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 60°C เป็น 70 และ 80°C ด้วย HW-extraction (รูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 A) ส่งผลให้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนระหว่างการสกัดทำให้เกิดการย่อยสลายโครงสร้างของอินนูลินบางส่วนได้ (Flórez-Fernández et al., 2017) ทำให้ได้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิในการสกัดจาก 60 และ 70°C พบว่า การเพิ่มระยะเวลาการสกัดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน ($p > 0.05$) แต่อุณหภูมิในการสกัด 80°C พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจาก 20 min เป็น 60 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

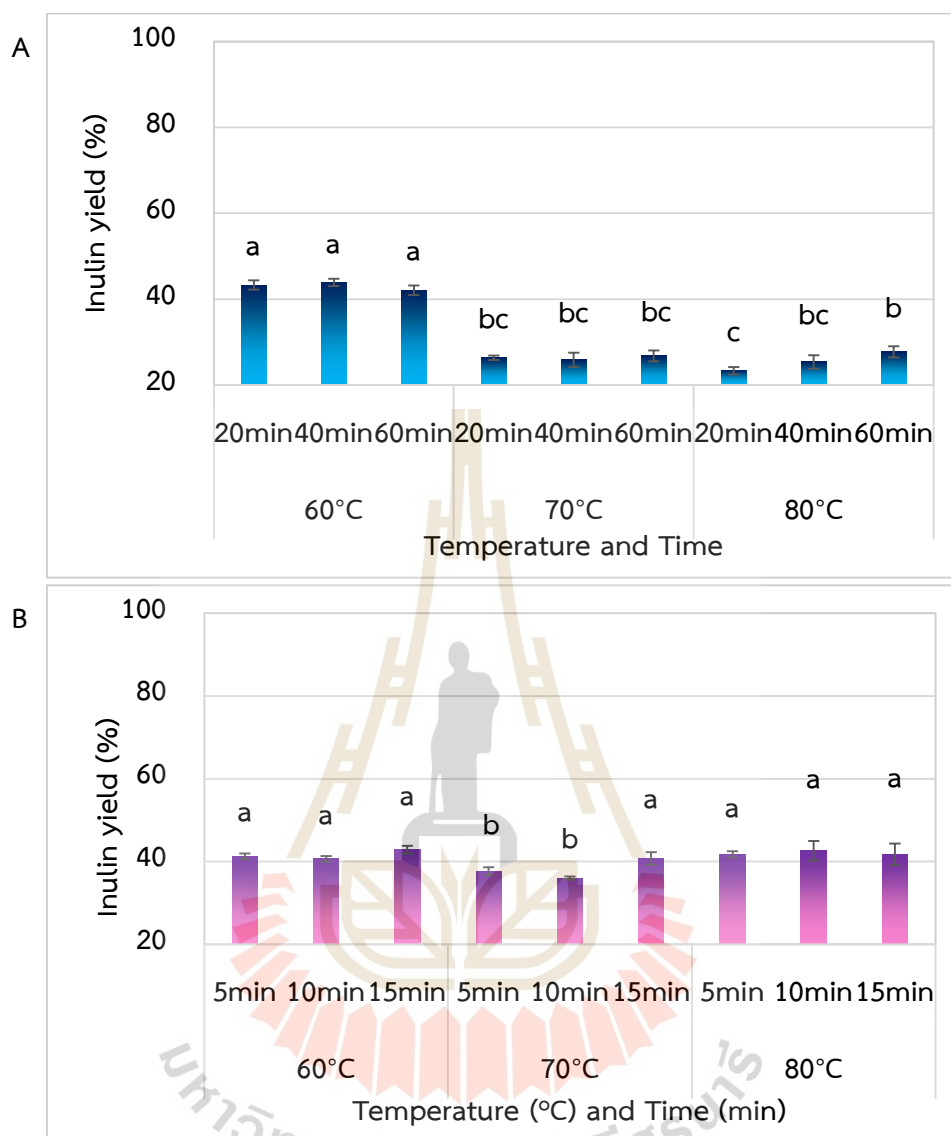
รูปที่ 4.2 B แสดงปริมาณอินนูลินที่ได้จากการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) อยู่ในช่วง 46.53 – 58.23% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Redondo-Cuenca et al. (2021) ที่พบว่า ปริมาณอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวัน และซีโครีอยู่ที่ 54.57% และ 54.16% ตามลำดับ ในรูปที่ 4.3 B แสดงผลผลิตอินนูลินที่ได้จากการสกัดด้วย UAE-extraction ซึ่งอยู่ในช่วง 35.98 – 43.12% ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าผลผลิตอินนูลินสูงกว่าของ Castellino et al. (2020) ที่รายงานว่าการสกัดอินนูลินจากรากอาร์ติโชคโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงให้ผลผลิต

อินนูลินเพียง 20.90% ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความแตกต่างของพันธุ์พืชที่ใช้ และสภาวะการสกัดที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตอินนูลินมีความแตกต่างกัน ในรูปที่ 4.4 B แสดงความสามารถในการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 78.48 – 94.06% ซึ่งสอดคล้องกับ Lingyun et al. (2007) ซึ่งรายงานว่ สภาวะที่เหมาะสมของการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวัน คือ อุณหภูมิ 76.65°C ระยะเวลา 20 min ทำให้สามารถสกัดอินนูลินได้ 83.6%

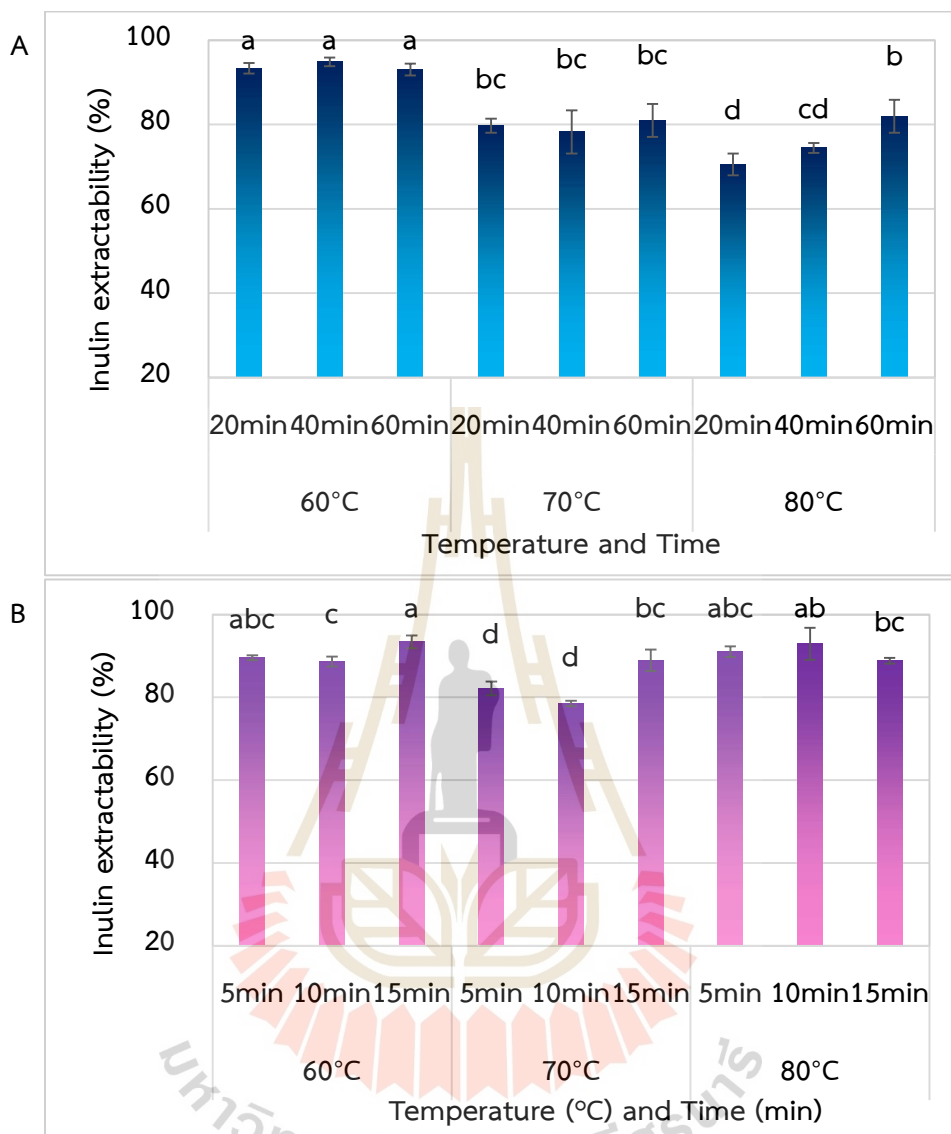
ในงานวิจัยนี้ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 10 min เป็น 15 min ที่อุณหภูมิในการสกัด 70°C ทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัด ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (รูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 B) ซึ่งสอดคล้องกับ Zarroung et al. (2016) ที่รายงานว่ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิ 70°C โดยการเพิ่มระยะเวลาการสกัด 30 min เป็น 90 min ทำให้ปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 80°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวัน ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Zhang et al. (2022) ที่รายงานว่ การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดอินนูลินจาก 50°C เป็น 70°C จะช่วยสนับสนุนการละลายของพอลิแซคคาไรด์ระหว่างการสกัด ในขณะที่อุณหภูมิในการสกัดที่สูงกว่า 70°C อาจส่งผลให้อินนูลินถูกทำลายหรือถูกย่อยสลายเนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นได้ นอกจากนี้ Zarroung et al. (2016) รายงานว่ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดนั้นอุณหภูมิที่ใช้ส่งผลกระทบต่อปริมาณอินนูลินที่สกัดออกมา โดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 61°C ร่วมกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการสกัดทำให้ปริมาณอินนูลินลดลง



รูปที่ 4.2 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อปริมาณ อินนูลิน (Inulin content) ในสารสกัด ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.3 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อปริมาณผลผลิตอินูลินในสารสกัด (Inulin yield) ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.4 ผลของการสกัดด้วย HW-extraction (A) และ UAE-extraction (B) ต่อความสามารถในการสกัดอินนูลิน (Inulin extractability) ตัวอักษรต่างกันบนกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 20, 40 และ 60 min รวมถึงวิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C นาน 5, 10 และ 15 min โดยข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum condition) ในการสกัดอินนูลิน โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ซึ่ง

สามารถคำนวณค่าความพึงพอใจโดยรวม (composite desirability, D) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมที่เท่ากับ 1 แสดงถึง สภาวะการสกัดนั้นได้รับความพึงพอใจรวมสูงสุด ซึ่งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ ที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัดนาน 20 min โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.8567 ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.1 และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction คือ ที่อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัดนาน 15 min โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.6778 ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.4

นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต้นได้แก่ อุณหภูมิในการสกัดและระยะเวลาในการสกัดต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction ได้ใช้แผนภูมิ Pareto เพื่อประเมินความสำคัญของตัวแปรต้น โดยแสดงค่าผลกระทบที่ปรับมาตรฐาน (Standardized effect) ของอุณหภูมิในการสกัด (A) และระยะเวลาในการสกัด (B) จากแผนภูมิ Pareto พบว่า อุณหภูมิเป็นตัวแปรต้นหรือปัจจัย (A) ที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลินอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งมีผลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการสกัด เนื่องจากค่า Standardized effect ของอุณหภูมิสูงกว่าเส้นเกณฑ์นัยสำคัญ (Significance level line) ($p < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ ก.2 ซึ่งบ่งบอกได้ว่า อุณหภูมิในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญในการสกัดอินนูลินด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction)

ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต้นของการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากแผนภูมิ Pareto (ภาคผนวก ก รูปที่ ก.5) พบว่า ระยะเวลาในการสกัด (B) เป็นตัวแปรต้นที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งมีผลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ เนื่องจากค่า Standardized effect ของอุณหภูมิสูงกว่าเส้นเกณฑ์นัยสำคัญ (Significance level line) ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ระยะเวลา อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินน้อยมาก ($p > 0.05$) เนื่องจากในแผนภูมิ Pareto แสดงค่าผลกระทบที่ปรับมาตรฐาน (Standardized effect) ที่ระดับความนัยสำคัญ 2.037 ซึ่งค่าผลกระทบของตัวแปรต้นต่าง ๆ ทั้งระยะเวลา (B) อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลา (AB) และ อุณหภูมิ (A) อยู่ต่ำกว่าเส้นเกณฑ์นัยสำคัญ (Significance level line) (เส้นสีแดง) จากผลการวิเคราะห์ผลของตัวแปรต้นสามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัดด้วยคลื่นเสียง

ความถี่สูง (UAE-extraction) แต่ไม่มีตัวแปรต้นใดที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณผลผลิตและความสามารถในการสกัด อินนูลินสำหรับการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction)

นอกจากนี้ภาคผนวก ก รูปที่ ก.3 และ รูปที่ ก.6 แสดงกราฟโครงร่าง (Contour plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิในการสกัดและระยะเวลาในการสกัดของการสกัดโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) และการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ตามลำดับ

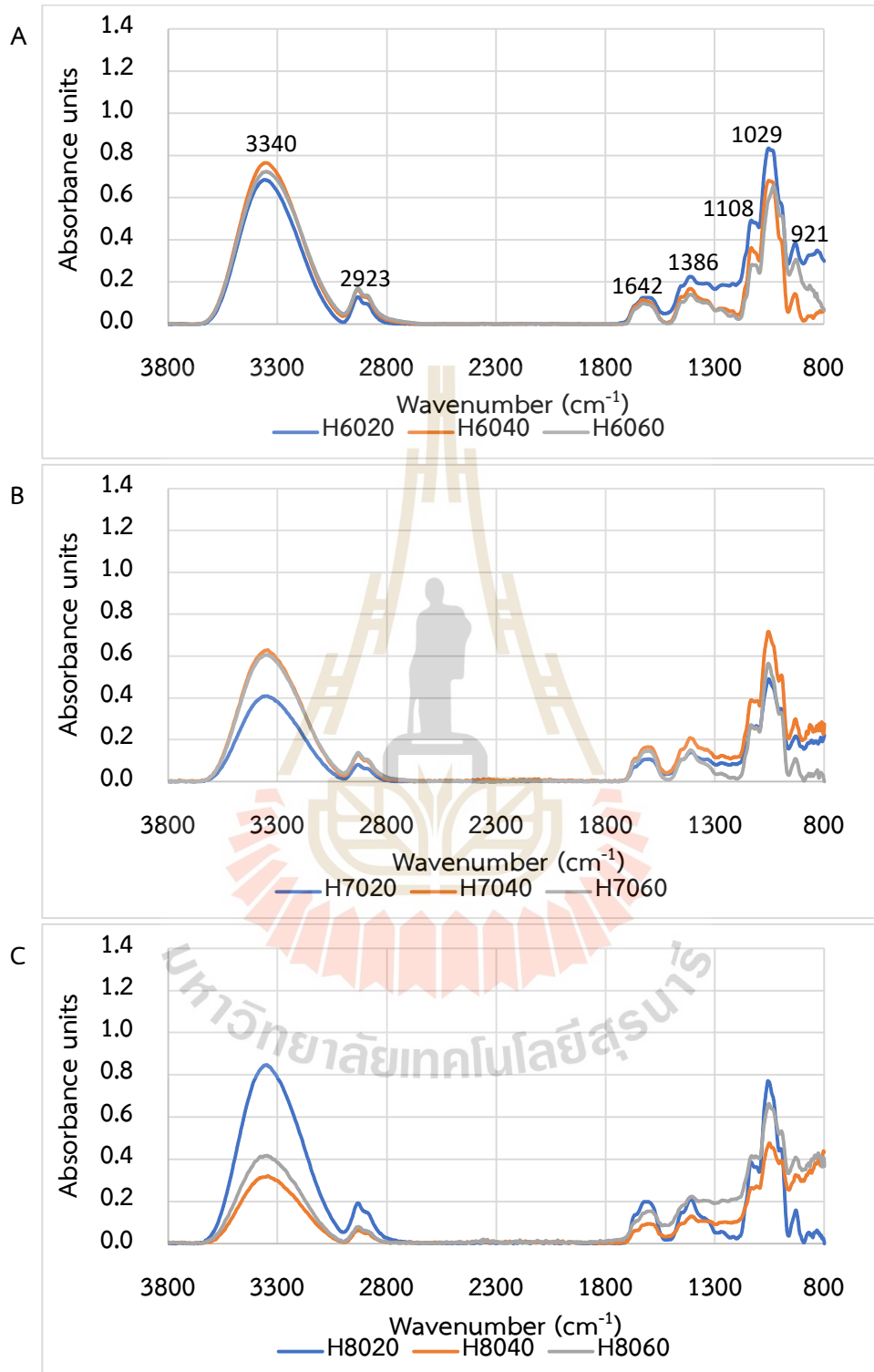
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 60°C เป็น 70 และ 80°C ด้วย HW-extraction ส่งผลให้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มระยะเวลาในการสกัด (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน อย่างไรก็ตาม การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญในการสกัดอินนูลินด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) แต่ระยะเวลาในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ซึ่งผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 20 min และการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 15 min ซึ่งจะสภาวะที่เหมาะสมนี้จะถูกเลือกไปทดลองและวิเคราะห์ผลในหัวข้อถัดไป

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดอินนูลินโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

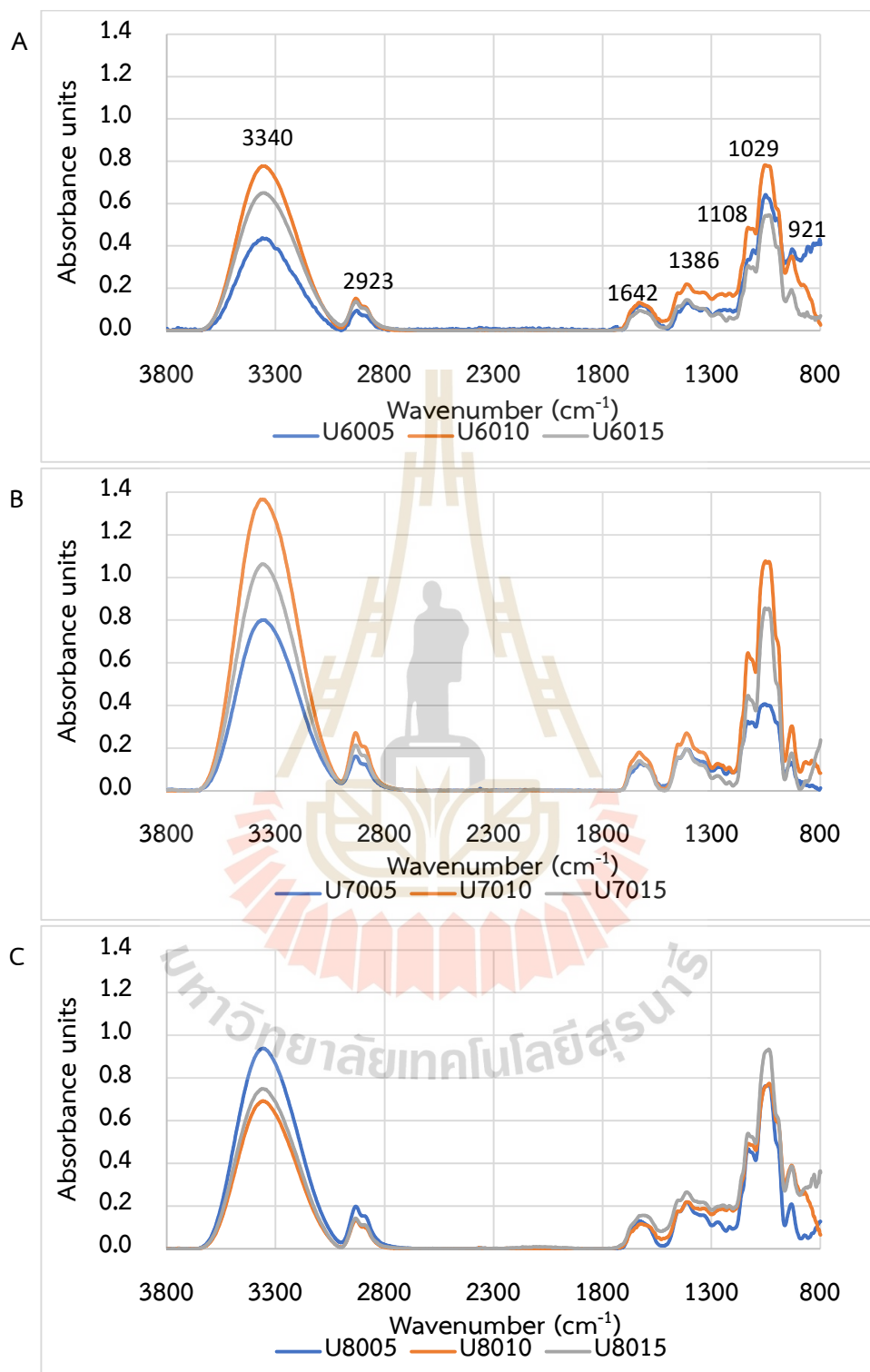
งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared absorption, IR) เพื่อศึกษาการสั่นของพันธะเคมีในโมเลกุล ทั้งการสั่นแบบยืด (Stretching) และการสั่นแบบงอ (Bending) โดยการศึกษาการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดที่ความถี่เลขคลื่น (Wavenumber) เฉพาะสามารถบ่งบอกชนิดของหมู่หน้าที่ (Functional group) ในโครงสร้างของสารอินทรีย์ได้ การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงแก่นตะวัน ผงอินนูลินทางการค้า และผงสารสกัดอินนูลิน ได้ใช้แสงซินโครตรอนในย่านพลังงานอินฟราเรดด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Synchrotron-radiation-based Fourier transform infrared, SR-FTIR)

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงสเปกตรัมเฉลี่ย SR-FTIR ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด

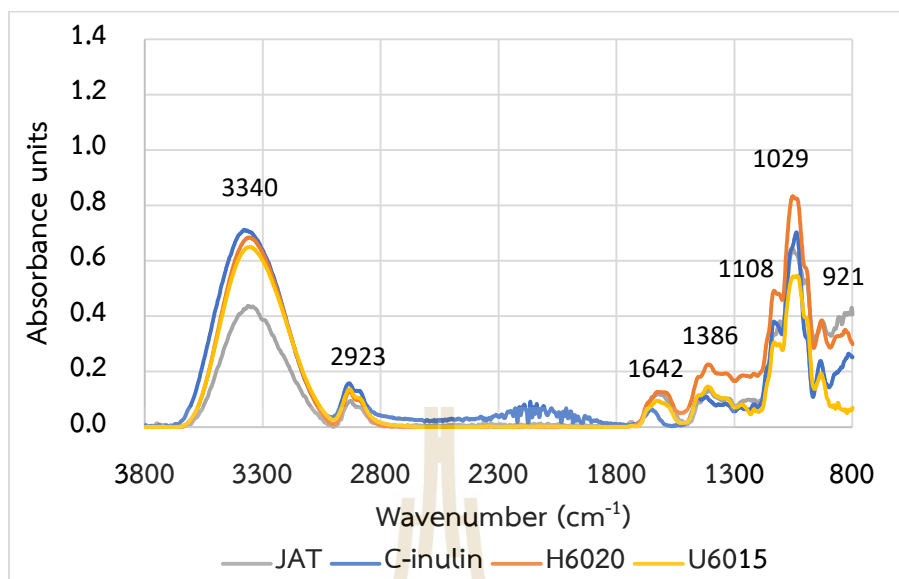
20, 40 และ 60 min และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด 5, 10 และ 15 min ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3800 – 800 cm^{-1} พบว่าสเปกตร้า SR-FTIR ของสารสกัดจากวิธี HW-extraction และ UAE-extraction ที่อุณหภูมิและระยะเวลาการสกัดที่ต่างกัน มีลักษณะโดยรวมคล้ายกันและมีพีคการดูดกลืนที่ชัดในเลขคลื่น 3340, 2923, 1642, 1386, 1108, 1029 และ 921 cm^{-1} อย่างไรก็ตาม ความเข้มของการดูดกลืนที่บางตำแหน่งของเลขคลื่นมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของอนุมูลอิสระที่ทางเคมีต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงสร้างสารสกัด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 (A-C) และ 4.6 (A-C) ในงานวิจัยนี้สเปกตร้าที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารสกัดสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น 3400 – 3200 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) (Pourfarzad et al., 2018) พีคการดูดกลืนระหว่าง 3000 ถึง 2800 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างของลิพิด ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ในกลุ่มเมทิล ส่วนพีคการดูดกลืนระหว่าง 1700 ถึง 1500 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแอมไมด์ เช่น amide I (1700 ถึง 1600 cm^{-1}) เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O และพีคการดูดกลืนระหว่าง 1200 ถึง 800 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O-H หรือ C-O-C ในหน่วยน้ำตาล (Sonsomboonsuk et al., 2024) นอกจากนี้จากรายงานของ Vázquez-Vuelvas et al. (2020) พบว่า อินนูลินมีพีคการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1028 cm^{-1} โดยมีความเข้มสูง โดยเป็นการสั่นของพันธะ C-O-H แบบภายใน (Intra) และการสั่นพันธะ C-O แบบยืด (Stretching) นอกจากนี้พีคการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1114 cm^{-1} , 1104 cm^{-1} และ 937 cm^{-1} ของอินนูลินแสดงการสั่นที่มีความเข้มปานกลาง ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-O-H และการสั่นของพันธะ C-O ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม SR-FTIR ของสารสกัดด้วย HW-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 20, 40 และ 60 min



รูปที่ 4.6 สเปกตรา SR-FTIR ของสารสกัดด้วย UAE-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min



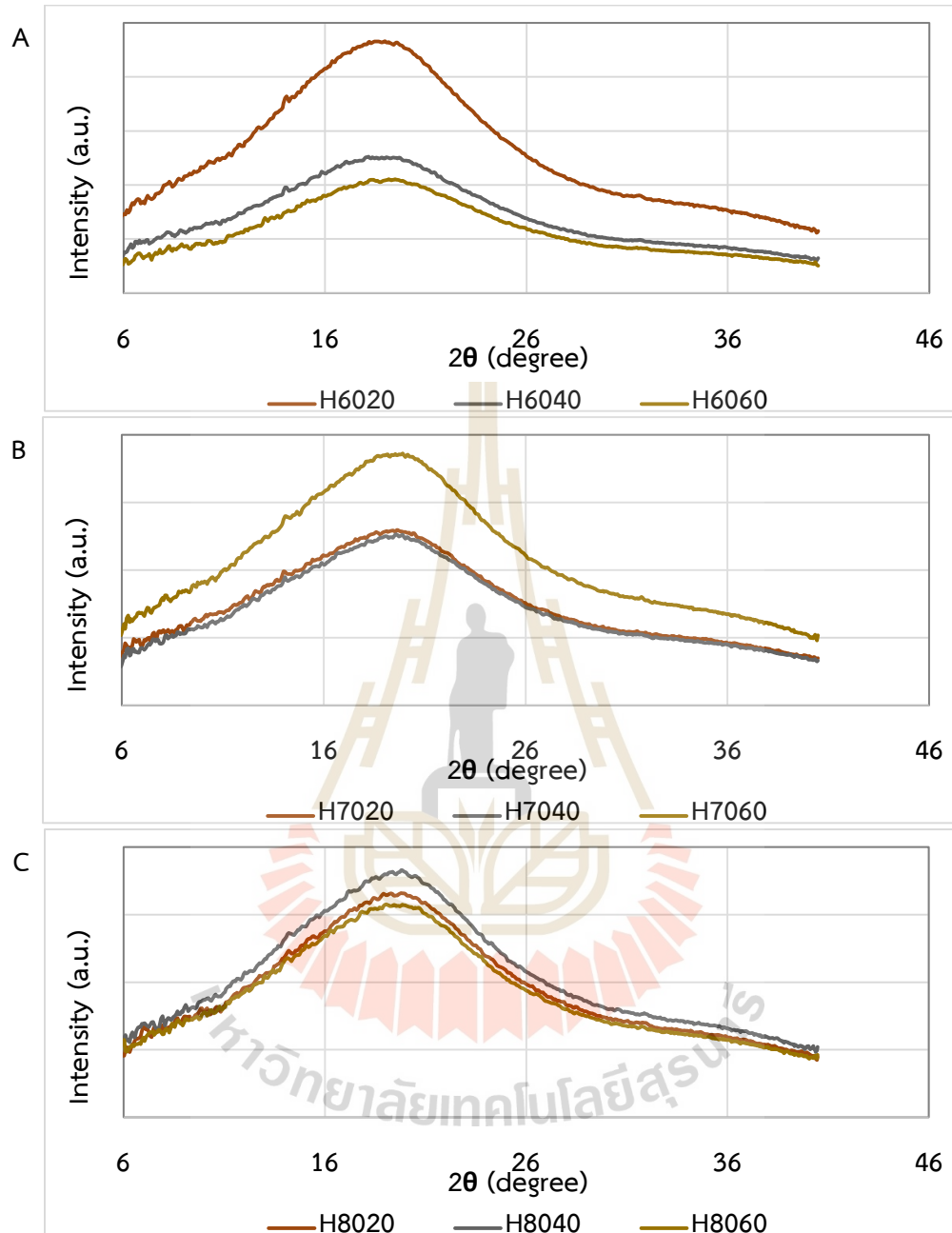
รูปที่ 4.7 สเปกตร้า SR-FTIR ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015)

จากผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 20 min และการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 15 min ซึ่งจะสภาวะที่เหมาะสมนี้ถูกเลือกมาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR กับผงแก่นตะวันและอินนูลินทางการค้า โดยในรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตร้าเฉลี่ย SR-FTIR ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015) สเปกตร้า SR-FTIR ของทั้ง 4 ตัวอย่างนี้มีลักษณะคล้ายกันและมีพีคการดูดกลืนเข้มในเลขคลื่น 3340, 2923, 1642, 1386, 1108, 1029 และ 921 cm^{-1} อย่างไรก็ตาม พีคการดูดกลืนที่เลขคลื่น 3340 cm^{-1} ของ JAT ต่ำกว่า C-inulin, H6020, และ U6015 ซึ่งอาจเป็นเพราะ JAT ยังไม่ได้ผ่านการสกัด ทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ นอกจากอินนูลินในปริมาณมาก แตกต่างจาก C-inulin, H6020, และ U6015 โดยพีคดูดกลืนที่ 3340 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมักพบในสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมาก เช่น พอลิแซ็กคาไรด์และอินนูลิน นอกจากนี้พีคการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1108 1029 และ 921 cm^{-1} สัมพันธ์กับโครงสร้างของอินนูลิน (Vázquez-Vuelas et al., 2020) ซึ่งจากรูปที่ 4.7 พบว่า พีคการดูดกลืนที่เลขคลื่นเหล่านี้พบในทั้ง 4 ตัวอย่าง แต่ H6020 มีความเข้มของพีคมากกว่า JAT C-inulin และ U6015 อย่างไรก็ตาม การ

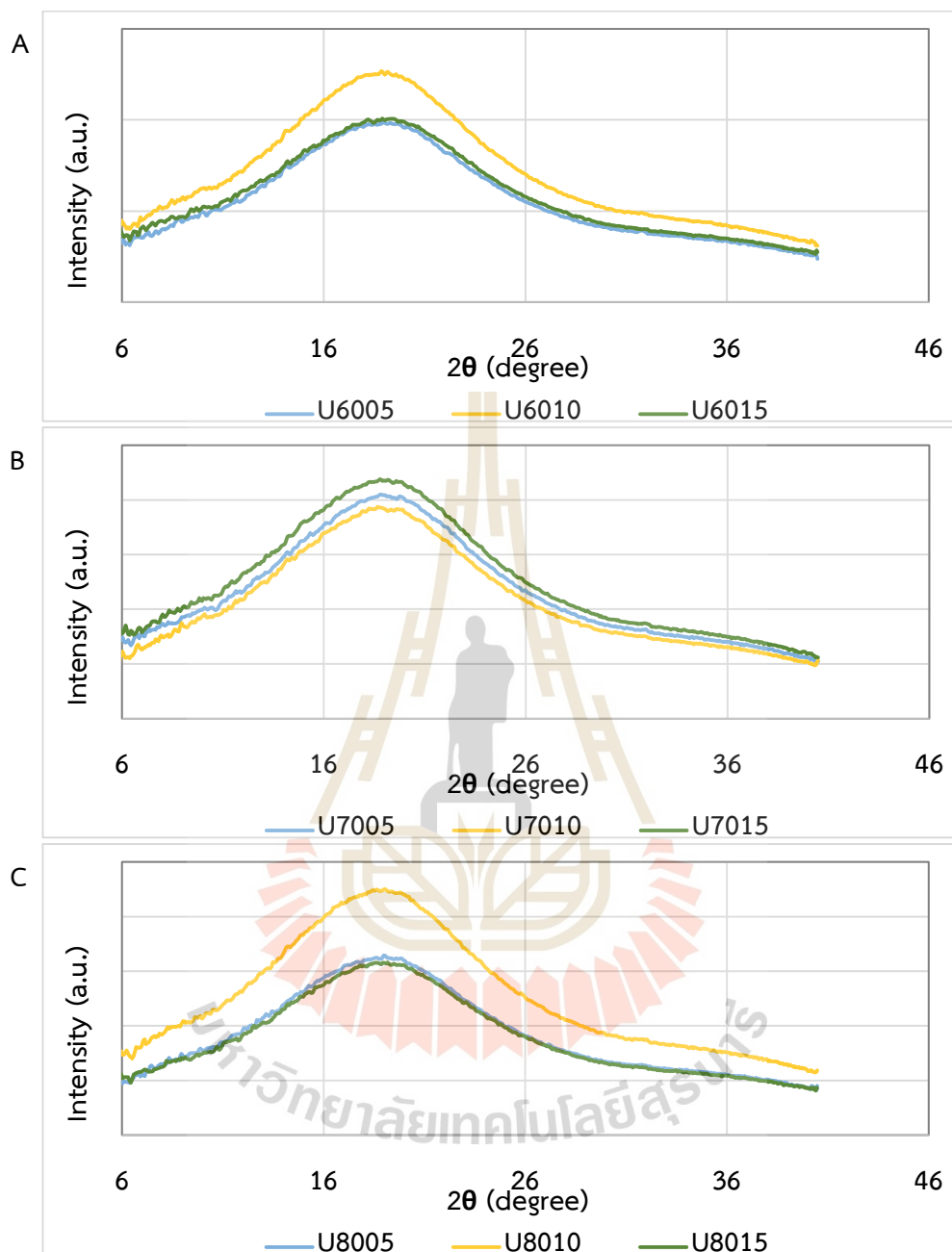
วิเคราะห์ปริมาณอินนูลินด้วยวิธีการเคมี (โดยชุดทดสอบ Fructan Assay Kit) สามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณที่แม่นยำได้

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์

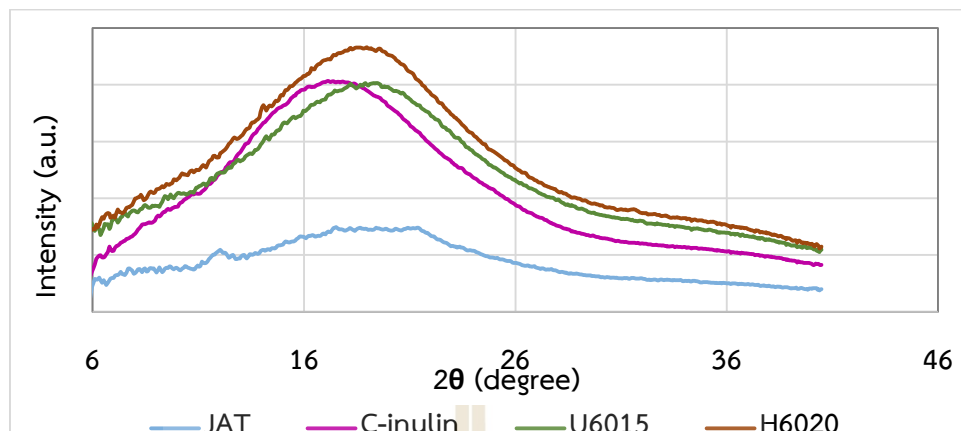
งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของผงแก่นตะวัน ผงอินนูลินทางการค้า และผงสารสกัดอินนูลิน ด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์มุมกว้าง ((Synchrotron-radiation-based wide angle X-ray scattering, SR-WAXS) โดยเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกช่วยบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างภายในของแต่ละตัวอย่างได้ ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงลักษณะ WAXS curves ที่ 2θ ระหว่าง $6^\circ - 40^\circ$ ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60°C , 70°C และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด 20, 40 และ 60 min และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60°C , 70°C และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด 5, 10 และ 15 min ตามลำดับ ซึ่งไม่พบพีคบน WAXS curves ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างไม่มีความเป็นผลึกหรือมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous structure) (Ronkart et al., 2007) นอกจากนี้ Bonto et al. (2021) รายงานว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยปรับสภาพข้าวมีผลทำให้โครงสร้างแบบผลึกของข้าวลดลงและโครงสร้างแบบอสัณฐานเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะ WAXS curves ที่ 2θ ระหว่าง $6^\circ - 40^\circ$ ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015) ซึ่งพบว่า WAXS curves ของ JAT มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 11.7° (รูปที่ 4.10) ทั้งนี้อาจบ่งบอกถึงการมีอยู่ขององค์ประกอบที่มีลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) เช่น แป้ง หรือ เซลลูโลส ซึ่งผงแก่นตะวันไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัดจึงแตกต่างจากผงอินนูลินทางการค้าและผงสารสกัดอินนูลินที่มีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของสารสกัดด้วย HW-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 20, 40 และ 60 min



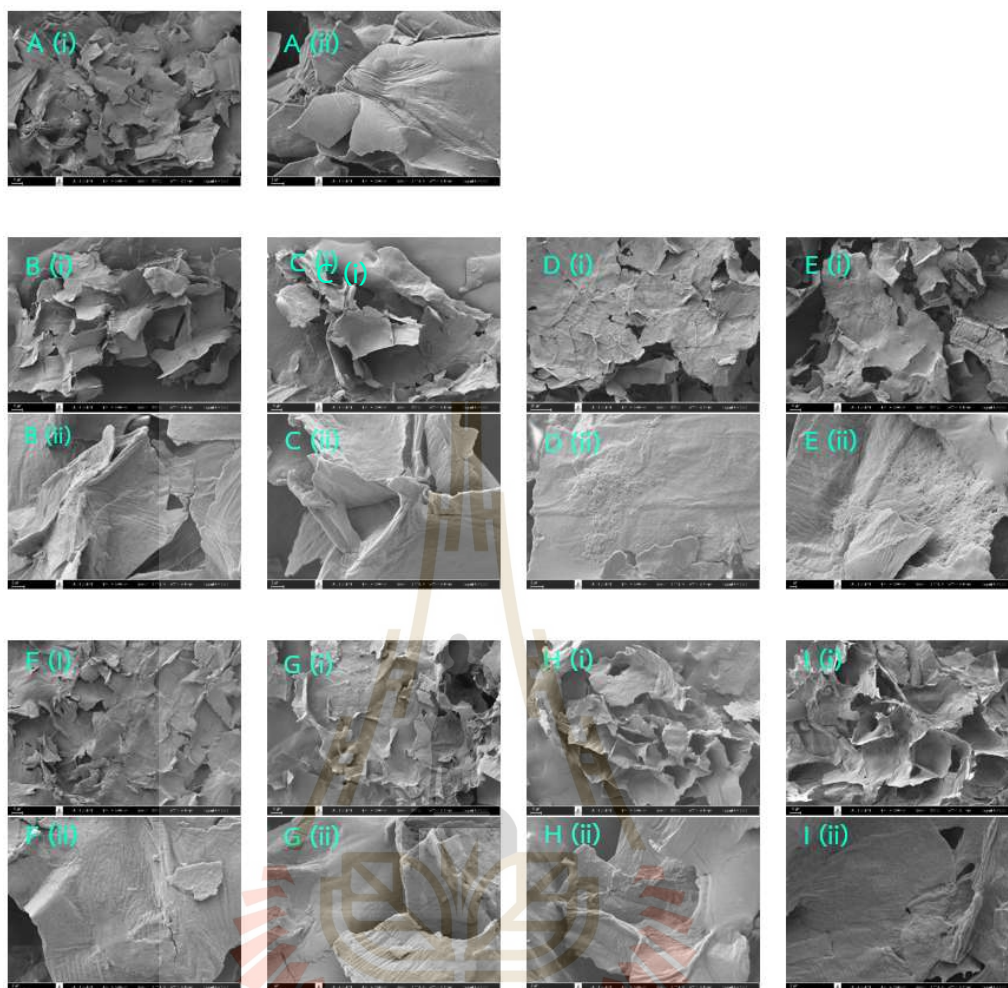
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของสารสกัดด้วย UAE-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของผง แก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015)

4.1.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของผงแก่นตะวันและกากแก่นตะวันหลังการสกัด

รูปที่ 4.11 แสดงภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของ (A) แก่นตะวัน (JAT) (B-E) กากแก่นตะวันหลังการสกัดด้วย HW-extraction และ (F-I) กากแก่นตะวันหลังการสกัดด้วย UAE-extraction โดยใช้ Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) ที่กำลังขยาย 500x และ 3,000x พบว่า JAT มีลักษณะผิวเรียบมากและไม่พบรูพรุน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดพบว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) มีผลทำให้พื้นผิวของกากแก่นตะวันมีลักษณะเป็นฟองฟูและมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งมากกว่าพื้นผิวของกากแก่นตะวันที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดฟองอากาศและการยุบตัว (Bubble Formation and Collapse) ของปรากฏการณ์แคปพิเตชัน (Cavitation) จากคลื่นเสียงความถี่สูง ทำให้เกิดการกระแทก การกัดเซาะที่พื้นผิว การทำลายผนังเซลล์ และสลายอนุภาคขนาดใหญ่ (Sonsomboonsuk et al., 2024) นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจาก 60°C เป็น 80°C ทำให้เกิดรูพรุนบนพื้นผิวมากขึ้น แต่การเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจาก 5 เป็น 15 min ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาของกากแก่นตะวัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Xu et al. (2021) ซึ่งรายงานว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 2 min ในการสกัดอินนูลินจาก JAT มีผลทำให้พื้นผิวของ JAT มีรูพรุน นอกจากนี้ยังมีรายงานการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาที่คล้ายกันในรากของหญ้าเจ้าชู้สำหรับการสกัดอินนูลินโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงด้วย (Chen et al., 2022)



รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย FE-SEM ของ (A) แก่นตะวัน (JAT) (B-E) กากแก่นตะวันหลังจากดัดด้วยสกัดด้วย HW- extraction โดยที่ (B) อุณหภูมิ 60°C เวลา 20 min (C) อุณหภูมิ 60°C เวลา 60 min (D) อุณหภูมิ 80°C เวลา 20 min (E) อุณหภูมิ 80°C เวลา 60 min และ (F-I) กากแก่นตะวันหลังจากดัดด้วยสกัดด้วย UAE-extraction โดยที่ (F) อุณหภูมิ 60°C เวลา 5 min (G) อุณหภูมิ 60°C เวลา 15 min (H) อุณหภูมิ 80°C เวลา 5 min (I) อุณหภูมิ 80°C เวลา 15 min โดยระดับกำลังขยายที่ (i) 500x และ (ii) 3,000x

4.2 การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน

จากการเปรียบเทียบผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันในหัวข้อ 4.1 ต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 20, 40 และ 60 min และการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C นาน 5, 10 และ 15 min โดยผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 20 min (H6020) และการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 15 min (U6015) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมนี้ถูกเลือกนำมาศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) เพื่อแยกสารเจือปนออกจากสารสกัดได้จาก HW-extraction (HW-extract) และจาก UAE-extraction (UAE-extract) ได้แก่ การกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) และการกำจัดสารสี (Decolorization) โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 2 ชนิด ได้แก่ Strong acid cation สำหรับกำจัดไอออนบวก และ Weak base anion สำหรับกำจัดไอออนลบ และนำ HW-extract และ UAE-extract มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าเคมี และกายภาพ ต่อไป

4.2.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าและเคมี

ตารางที่ 4.5 แสดงการนำไฟฟ้า (Conductivity) pH ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ปริมาณของแข็ง (Solid content) และอัตราการกำจัดสี (Decoloration ratio) ของ HW-extract และ UAE-extract ทั้งก่อนและหลังการผ่านการทำบริสุทธิ์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า การนำไฟฟ้าของ HW-extract และ UAE-extract ที่ยังไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-U และ U6015-U) มีไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งอยู่ที่ 7.24 และ 7.14 mS/cm ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าจากสารสกัดที่ไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-U และ U6015-U) มีค่าสูงกว่าจากรายงานของ Zhang et al., 2022 ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันด้วยการใช้น้ำร้อน (74°C 65 min อัตราส่วนผงต่อน้ำเปล่า 1:4) อยู่ที่ 5.76 mS/cm ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากพันธุ์ของแก่นตะวันที่นำมาสกัด และสภาวะที่ใช้การสกัด ซึ่งส่งผลค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัดมีความแตกต่างกัน เมื่อนำสารสกัดมาผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ทำให้ได้สารสกัด H6020-S และ U6015-S ที่มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงเหลือ 2.79 และ 2.93 mS/cm ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของสารสกัดที่ไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้เมื่อสารสกัด H6020-S และ U6015-S ถูกผ่านเรซินชนิด Weak base anion เพิ่มเติม ทำให้ได้สารสกัด H6020-SW และ U6015-SW ที่มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงเหลือ 0.75 และ 0.96 mS/cm ตามลำดับ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้านี้ต่ำกว่าสารสกัดที่ไม่ผ่านเรซินและสารสกัดที่ผ่านเรซินชนิด strong

acid cation อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Zhang et al. (2022) ซึ่งใช้เรซิน D202 (Strongly alkaline anion), HD-8 (Strongly acidic cation), และ D315 (Weakly alkaline) พบว่าแร่ธาตุของสารสกัดลดลงหลังการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเรซิน ซึ่งส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงจาก 5.76 mS/cm เหลือ 0.278 mS/cm เนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารสกัดและเรซิน ซึ่งส่งผลให้แร่ธาตุหลัก เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และธาตุรอง เช่น เหล็ก สังกะสี ถูกกำจัดออก (Harmankaya et al., 2012) ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง

ค่า pH ของ HW-extract และ UAE-extract ที่ยังไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-U และ U6015-U) มีค่า 6.39 และ 6.50 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม หลังผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินชนิด Strong acid cation ค่า pH ของ H6020-S และ U6015-S เพิ่มขึ้นเป็น 6.53 และ 6.44 ตามลำดับ และเมื่อผ่านเรซินชนิด Weak base anion ค่า pH ของสารสกัด H6020-SW และ U6015-SW เพิ่มขึ้นเป็น 8.20 และ 8.74 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสารสกัดที่ไม่ผ่านเรซินและผ่านเรซินชนิด Strong acid cation อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Weak base anion ทำให้ได้ค่า pH สอดคล้องกับรายงานของ Akyildiz et al. (2022) ซึ่งรายงานการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Weak base anion (Amberlite-FPA51) เพื่อทำให้ค่า pH ในน้ำส้มเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ หลังจาก HW-extract และ UAE-extract ได้ผ่านผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งชนิด Strong acid cation และชนิด Weak base anion (H6020-SW และ U6015-SW) ถูกปรับ pH ให้เป็นกลาง (7.0) ด้วยกรดซิตริกก่อนนำไปทำแห้งในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) pH ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ปริมาณของแข็ง (Solid content) และอัตราการกำจัดสี (Decolorization ratio) ของ HW-extract และ UAE-extract ก่อนและหลังผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

Parameters	HW-extract ¹			UAE-extract ²		
	H6020-U	H6020-S	H6020-SW	U6015-U	U6015-S	U6015-SW
Conductivity (mS/cm)	7.24±0.09 ^a	2.79±0.52 ^b	0.75±0.20 ^c	7.14±0.24 ^a	2.93±0.25 ^b	0.96±0.17 ^c
pH	6.39±0.23 ^{bc}	6.53±0.21 ^c	8.20±0.40 ^a	6.50±0.17 ^{bc}	6.44±0.12 ^b	8.74±0.51 ^a
TSS (°Brix)	15.08±0.26 ^a	5.05±0.55 ^b	1.49±0.43 ^c	15.07±0.16 ^a	5.20±0.13 ^b	1.69±0.27 ^c
Solid content (%)	16.68±0.38 ^a	4.95±0.33 ^b	1.40±0.23 ^c	16.15±0.33 ^a	5.55±0.06 ^b	1.50±0.12 ^c
Decolorization ratio (%)	-	22.93±1.41 ^c	50.96±3.28 ^b	-	24.71±1.57 ^c	62.39±1.26 ^a

^{1,2} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same row indicate statistically significant differences between treatments (p<0.05). HW-extract and UAE-extract represent the extracts obtained from hot water extraction (HW-extraction) at temperatures of 60°C for 20 min (H6020), and ultrasound-assisted extraction (UAE-extraction) at 60°C for 15 min (U6015), respectively. U, S, and SW denote extracts that were untreated with resin, treated with strong acid cation resin, and treated with both strong acid cation and weak base anion resins, respectively.

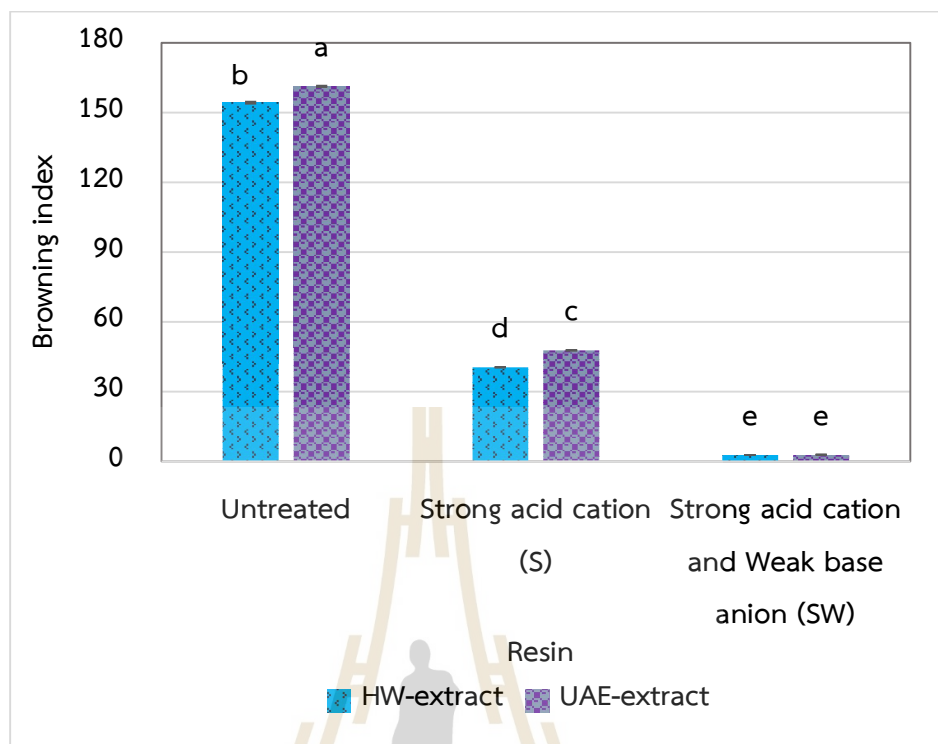
TSS และปริมาณของแข็งของสารสกัด H6020-U และ U6015-U (ไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน) มีค่า 15.08 และ 15.07°Brix และ 16.68 และ 16.15% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) หลังผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ค่า TSS และปริมาณของแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยค่า TSS ลดลงเป็น 5.05 และ 5.20°Brix ตามลำดับ และปริมาณของแข็งลดลงเหลือ 4.95 และ 5.55% ตามลำดับ และเมื่อผ่านเรซินชนิด Weak base anion พบว่า TSS และปริมาณของแข็งมีค่าเท่ากับ 1.49 และ 1.69°Brix และ 1.40 และ 1.50% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่า TSS และปริมาณของแข็งของสารสกัดที่ไม่ผ่านเรซินและผ่านเรซินชนิด Strong acid cation อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนที่ละลายอยู่ในสารสกัดกับไอออนที่มีอยู่ในเรซิน ซึ่งกำจัดแร่ธาตุและสารละลายที่มีประจุออกไป จากรายงานของ Zhang et al. (2022) อธิบายว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน เช่น D202 (Strongly basic anion-exchange resin) และ HD-8 (Strongly acidic cation-exchange resin) สามารถลดค่าการนำไฟฟ้าและความเค็มในสารสกัดจากแก่นตะวันได้ ซึ่งเกิดจากการกำจัดไอออนที่เป็นส่วนประกอบของของแข็งที่ละลายได้ ส่งผลให้ TSS และปริมาณของแข็งในสารสกัดลดลงด้วย

อัตราการกำจัดสีของสารสกัดเมื่อผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation (H6020-S และ U6015-S) พบว่า อัตราการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเป็น 22.93% และ 24.71% ตามลำดับ ตารางที่ 4.5) และเมื่อนำ H6020-S และ U6015-S มาผ่านเรซินชนิด Weak base anion เพิ่มเติม (H6020-SW และ U6015-SW) มีผลทำให้อัตราการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเป็น 50.96% และ 62.39% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสารสกัดที่ผ่านเรซินชนิด Strong acid cation อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ อัตราการกำจัดสีของ U6015-SW มีค่าสูงกว่าของ H6020-SW อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการใช้เพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตาม อัตราการกำจัดสีที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังต่ำกว่ารายงานของ Zhang et al. (2018) ซึ่งมีอัตราการกำจัดสีของสารสกัดอินนูลินด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 82.29% และรายงานของ Zhang et al. (2022) ที่ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strongly alkaline anion resin ตามด้วย Strong acid cation resin และ Weakly alkaline resin ซึ่งให้อัตราการกำจัดสีสูงถึง 99.76% สำหรับ Coca et al. (2008) ใช้สไตรีนิกเรซิน (Styrenic resins) กำจัดสีของน้ำปืชุการ์ พบว่าสามารถลดสีได้ถึง 75 – 80% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ ชนิดของเรซินที่ใช้ รวมถึงการใช้เรซินหลายชนิดต่อเนื่องกันที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากขึ้น

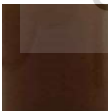
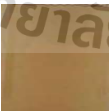
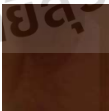
4.2.2 การวิเคราะห์ค่าสี

ค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) ของสารสกัด HW-extract (H6020) และ UAE-extract (U6015) แสดงในรูปที่ 4.12 และภาพถ่ายสีของสารสกัดแสดงในรูปที่ 4.13 โดยสารสกัดก่อนผ่านเรซิน (U) ของ H6020-U และ U6015-U มีค่าความเป็นสีน้ำตาลอยู่ที่ 154.28 และ 161.29 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้ค่าความเป็นสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยน้ำร้อน เมื่อสารสกัดผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation (S) พบว่า ค่าความเป็นสีน้ำตาลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดย H6020-S และ U6015-S มีค่าความเป็นสีน้ำตาลเหลือ 40.49 และ 47.77 ตามลำดับ ซึ่งค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ระหว่างการสกัดด้วยน้ำร้อนและคลื่นเสียงความถี่สูง นอกจากนี้หลังจากผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Weak base anion (SW) ค่าความเป็นสีน้ำตาลของ H6020-SW และ U6015-SW ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยลดลงเหลือ 2.77 (ลดลง 93.15%) และ 2.84 (94.05%) ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการผ่านเรซินมีผลลดค่าความเป็นสีน้ำตาลของสารสกัดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ค่าความเป็นสีน้ำตาลและภาพถ่ายสีของสารสกัดนี้สอดคล้องกับอัตราการกำจัดสี (Decoloration ratio) ที่แสดงในตารางที่ 4.5 โดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับชนิด Weak base anion ทำให้อัตราการกำจัดสีเพิ่มขึ้นและมีผลอย่างชัดเจนในการลดค่าความเป็นสีน้ำตาลของสารสกัด นอกจากนี้ ผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับรายงานของ Zhang et al. (2022) ที่พบว่า การผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีผลทำให้ค่าความเป็นสีน้ำตาลและค่าสีของสารสกัดลดลง รวมถึงงานวิจัยของ Bashir et al. (2010) ที่รายงานว่า การใช้เรซินชนิดไอออนบวกแล้วตามด้วยเรซินชนิดไอออนลบสามารถลดค่าสีของสารสกัดได้ 88 – 97%



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความเป็นสีน้ำตาล (Browning index) ของสารสกัด HW-extract (H6020) และ UAE-extract (U6015) ก่อนผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (U) และหลังผ่านเรซินชนิด Strong acid cation (S) และ Weak base anion (SW)

Color	HW-extract			UAE-extract		
	H6020-U	H6020-S	H6020-SW	U6015-U	U6015-S	U6015-SW
Extract						

รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายสีของสารสกัด HW-extract และ UAE-extract ก่อนผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-U และ U6015-U) ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation (H6020-S และ U6015-S) และผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Weak base anion (H6020-SW และ U6015-SW)

4.3 การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

จากการศึกษาวิธีการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันในหัวข้อ 4.1 ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อน HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 20 min (H6020) และการสกัดอินนูลินด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง UAE-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 15 min (U6015) สารสกัด H6020-U และ U6015-U ถูกนำมาทำบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion เพื่อกำจัดแร่ธาตุและกำจัดสารสี โดยสามารถกำจัดแร่ธาตุในสารสกัด H6020-SW ได้ 89.64% และ U6015-SW ได้ 86.55% ตามลำดับ อัตราการกำจัดสีและลดค่าความเป็นสีน้ำตาลของสารสกัด H6020-SW คือ 50.96% และ 93.15% ส่วน U6015-SW อัตราการกำจัดสี เท่ากับ 62.39% และลดค่าความเป็นสีน้ำตาลได้ 94.05% จากนั้น สารสกัด H6020-SW และ U6015-SW ถูกนำมาทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ดังแสดงผลการวิจัยข้างล่างนี้

4.3.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของผงอินนูลิน

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และสมบัติทางเคมีกายภาพของผงอินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-SW และ U6015-SW) และถูกทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) พบว่า ปริมาณผลผลิตทั้งหมดที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.89 – 6.87% เมื่อเทียบกับผงแก่นตะวันเริ่มต้น โดยปริมาณผลผลิตทั้งหมดของ FH6020-SW และ FU6015-SW สูงกว่าของ SH6020-SW และ SU6015-SW อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การทำแห้งแบบพ่นฝอยมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดต่ำกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย อนุภาคผงอาจติดกับผนังของห้องทำแห้ง (Drying chamber) และภาชนะรับตัวอย่าง ซึ่งมีผลให้ได้ผลผลิตผงอินนูลินต่ำ ทั้งนี้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Zhu et al. (2019) ซึ่งสกัดอินนูลินจากหัวแก่นตะวันด้วยน้ำร้อนและทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย ซึ่งพบว่า ปริมาณผลผลิตของผงอินนูลินที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยมีค่า 7.02% และ 8.65% ตามลำดับ ความแตกต่างของปริมาณผลผลิตอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Zhu et al. (2019) อาจเกิดจากความแตกต่างในประสิทธิภาพของเครื่องทำแห้งและสภาวะการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้ได้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดมีค่าสูงกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ปริมาณความชื้นของผงอินนูลินทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าระหว่าง 6.79 – 7.24% ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.6) แสดงให้เห็นว่า วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยไม่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นของผงอินนูลิน สำหรับปริมาณน้ำอิสระ (a_w) มีค่าระหว่าง 0.25 – 0.29 โดย FH6020-SW มีค่า a_w สูงสุด (0.29) ซึ่งสูงกว่า SH6020-SW (0.25) และ SU6015-SW (0.25) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามค่า a_w ของผงที่ได้จากการทำแห้งมีค่าต่ำกว่า 0.30 มีความปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์และสามารถรักษาได้นานขึ้น (Taengsopha et al., 2023) นอกจากนี้ Leyva-Porras et al. (2014) รายงานว่า โครงสร้างของอินนูลินยังคงเสถียรและไม่มีการจับตัวเป็นก้อนที่ความชื้นต่ำกว่า 10% และ a_w ต่ำกว่า 0.6 แต่หากความชื้นเกิน 15% และ a_w สูงกว่า 0.8 ตามลำดับ อาจทำให้อนุภาคอินนูลินเกิดการเกาะกลุ่มกันได้ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ในงานวิจัยนี้ ผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยมีความปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์และสามารถรักษาได้นานขึ้นโดยไม่มีการจับตัวเป็นก้อน

ปริมาณเถ้า (Ash) ของผงอินนูลินมีค่าอยู่ระหว่าง 3.11 – 4.47% โดยผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่าต่ำกว่าผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสูญเสียของผงอินนูลินที่เกาะติดกับผนังของเครื่องทำแห้งระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและอาจเกิดการสูญเสียแร่ธาตุเนื่องจากความร้อนสูงที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง Kilic-Akyilmaz et al. (2022) รายงานว่า การใช้ความร้อนสูงอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียแร่ธาตุได้

ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) และความหนาแน่นที่อัดตัว (Tapped density) ของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่า 0.24 – 0.27 g/mL ซึ่ง สูงกว่าผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) ซึ่งมีค่า 0.07 g/mL อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhu et al. (2019) ที่กล่าวว่า ผงอินนูลินที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะผงที่ฟูและปุย ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นที่อัดตัวต่ำลง ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่ารายงานของ Rubel et al. (2018) ซึ่งระบุว่า ผงอินนูลินที่ได้จากการสกัดแก่นตะวันและทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความหนาแน่นปรากฏอยู่ระหว่าง 0.32 – 0.58 g/mL และแบบแช่เยือกแข็งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.73 – 0.88 g/mL ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากกระบวนการอุปกรณ์ และสภาวะในการทำแห้งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ Tontul and Topuz (2017) รายงานว่า ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) จะแปรผันตามขนาด รูปร่าง และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผง นอกจากนี้ขนาดอนุภาคที่เล็กลงอาจส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีช่องว่าง

ระหว่างผงน้อยลง นอกจากนี้หาก ความหนาแน่นที่อัดตัวของผงต่ำกว่าอาจบ่งบอกถึงพื้นผิวของอนุภาคที่ไม่เรียบหรือมีขนาดไม่สม่ำเสมอ (Tontul & Topuz, 2017; Saikia et al., 2015) ส่วนรายงานของ Taengsopha et al. (2023) ระบุว่า อนุภาคผงที่ผ่านการทำให้แห้งมีค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นที่อัดตัวสูงจะช่วยลดปริมาตรของบรรจุภัณฑ์ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการขนส่ง และลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลให้ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาดีขึ้น จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ผงอินนูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมีค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นที่อัดตัวสูงกว่า ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงขนาดอนุภาคของผงอินนูลินที่เล็กลง และการมีความหนาแน่นสูงนี้ช่วยลดปริมาตรของบรรจุภัณฑ์ ทำให้การขนส่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษามากกว่าผงที่ผ่านการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง

อัตราส่วนของเฮาส์เนอร์หรืออัตราส่วนความหนาแน่น (Hausner's ratio, HR) และดัชนีของคาร์หรือดัชนีการไหล (Carr index, CI) อธิบายถึงสมบัติการเกาะตัว (Cohesiveness) และความสามารถในการไหล (Flowability) ของอนุภาคผง (Saikia et al., 2015) จากผลการทดลองพบว่า HR และ CI ของผงอินนูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.33 – 1.58 และ 21.59 – 36.67% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้จากงานวิจัย Yousefi et al. (2022) รายงานว่า ค่า HR ระหว่าง 1.25 ถึง 1.4 บ่งชี้ถึงผงที่มีสมบัติการไหลยาก ส่วนค่า HR ที่มากกว่า 1.4 บ่งชี้ถึงผงที่มีสมบัติการไหลที่ยากมาก นอกจากนี้ Arepally and Goswami (2019) รายงานว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจะมีสมบัติการไหลที่ดีเยี่ยม (Excellent) เมื่อค่า HR อยู่ระหว่าง 1.0 – 1.1 และค่า CI อยู่ระหว่าง 0 – 15% แต่สมบัติการไหลที่ต่ำมาก (Very poor) จะถูกบ่งชี้เมื่อค่า HR มากกว่า 1.6 และค่า CI สูงกว่า 38% Reddy et al. (2014) รายงานว่า ค่า HR และ CI ระหว่าง 1.35 – 1.45 และ 26 – 31% ตามลำดับ บ่งบอกถึงความสามารถในการไหลต่ำ (Poor) อยู่ระหว่าง 1.46 – 1.59 และ 32 – 37% บ่งบอกถึงความสามารถในการไหลต่ำมาก (Very poor) จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ผงอินนูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีความสามารถในการไหลระหว่างต่ำถึงต่ำมาก โดยเฉพาะ FH6020-SW ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผงอินนูลินสามารถดูดความชื้นได้ดีเป็นผลทำให้ความสามารถในการไหลต่ำ ทั้งนี้การสารเติมตัวพา เช่น มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin) อาจช่วยทำให้ผงอินนูลินมีความคงตัวและความสามารถในการไหลที่ดีขึ้น (Taengsopha et al., 2023)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลผลิตทั้งหมดและสมบัติทางเคมีกายภาพของผงอินูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน แลกเปลี่ยนไอออน H6020-SW และ U6015-SW

Parameters	Freeze-dried inulin powder ¹		Spray-dried inulin powder ²	
	FH6020-SW	FU6015-SW	SH6020-SW	SU6015-SW
Total yield (%)	6.38±1.29 ^a	6.87±0.65 ^a	2.89±0.01 ^b	3.18±0.34 ^b
Moisture content (%)	6.79±0.30 ^a	7.24±0.07 ^a	6.91±0.01 ^a	6.84±0.08 ^a
a _w	0.29±0.01 ^a	0.26±0.02 ^{ab}	0.25±0.00 ^b	0.25±0.01 ^b
Ash (%)	4.47±0.20 ^a	3.62±0.07 ^b	3.14±0.13 ^c	3.11±0.10 ^c
Bulk density (g/mL)	0.07±0.03 ^b	0.07±0.01 ^b	0.27±0.02 ^a	0.24±0.01 ^a
Tapped density (g/mL)	0.12±0.06 ^b	0.09±0.01 ^b	0.40±0.00 ^a	0.32±0.03 ^a
HR	1.58±0.12 ^a	1.33±0.10 ^a	1.50±0.08 ^a	1.35±0.07 ^a
CI (%)	36.67±4.71 ^a	21.59±4.82 ^a	33.24±3.50 ^a	25.82±3.89 ^a
Whiteness index	34.37±0.23 ^b	34.54±0.37 ^b	35.65±0.10 ^a	35.91±0.47 ^a
Solubility (%)	81.63±0.05 ^a	80.90±1.32 ^a	81.46±0.10 ^a	82.78±1.78 ^a
Hygroscopicity rate (%/min)	0.34±0.04 ^a	0.30±0.02 ^{ab}	0.19±0.01 ^{ab}	0.27±0.04 ^b

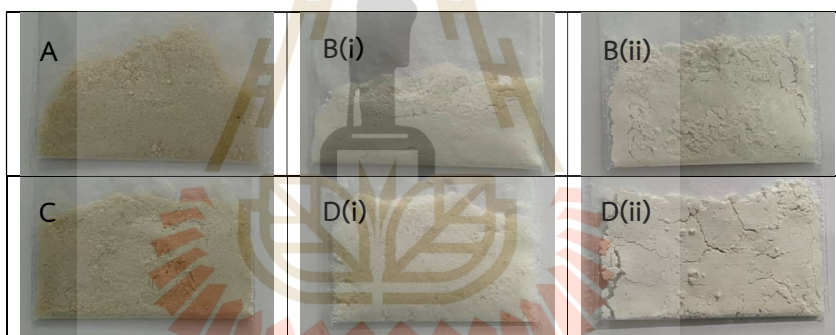
^{1,2} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same row indicate statistically significant differences between treatments (p<0.05). FH6020-SW and FU6015-SW denote freeze-dried inulin powders after hot water extraction (H6020) and ultrasonic-assisted extraction (U6015), respectively, with strong and weak resin purification. SH6020-SW and SU6015-SW refer to spray-dried inulin powders after the same extraction methods and resin purification.

ดัชนีความขาวของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่า 35.61 – 35.91 ซึ่ง สูงกว่าผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) ซึ่งมีค่า 34.37 – 34.54 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) ภาพถ่ายลักษณะของผงอินนูลินแสดงในรูปที่ 4.14 ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากลักษณะของอนุภาคผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งขนาดอนุภาคที่เล็กกว่านี้ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่ดีกว่า จึงทำให้อนุภาคผงอินนูลินที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีสีขาวมากขึ้น จากงานวิจัยของ Zhu et al. (2019) กล่าวว่า ผงอินนูลินที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง หากสังเกตจะพบว่าผงอินนูลินมีสีเหลืองอ่อน ขณะที่ผงอินนูลินที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีสีขาวกว่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่า ขนาดของอนุภาคมีผลต่อดัชนีความขาวของผง โดยขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้ผงมีความขาวมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ดัชนีความขาวของผงอินนูลินต่ำกว่าของ Díaz et al. (2022) ซึ่งมีดัชนีความขาวของผงอินนูลินที่สกัดได้จากหัวแค้นตะวันอยู่ระหว่าง 61.5 – 67.3 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตและชนิดของเรซินที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Rubel et al. (2018) รายงานว่า ผงอินนูลินที่สกัดได้จากหัวแค้นตะวัน เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า ผงมีขนาดอนุภาคเล็กและมีลักษณะเป็นผงสีขาวที่สามารถสังเกตได้ด้วยสายตา ขณะที่ผงอินนูลินที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีลักษณะผงที่ยืดเกาะกันเป็นกลุ่ม และเมื่อสังเกตด้วยสายตาจะเห็นว่าผงอินนูลินที่ได้มีสีออกน้ำตาลเล็กน้อย

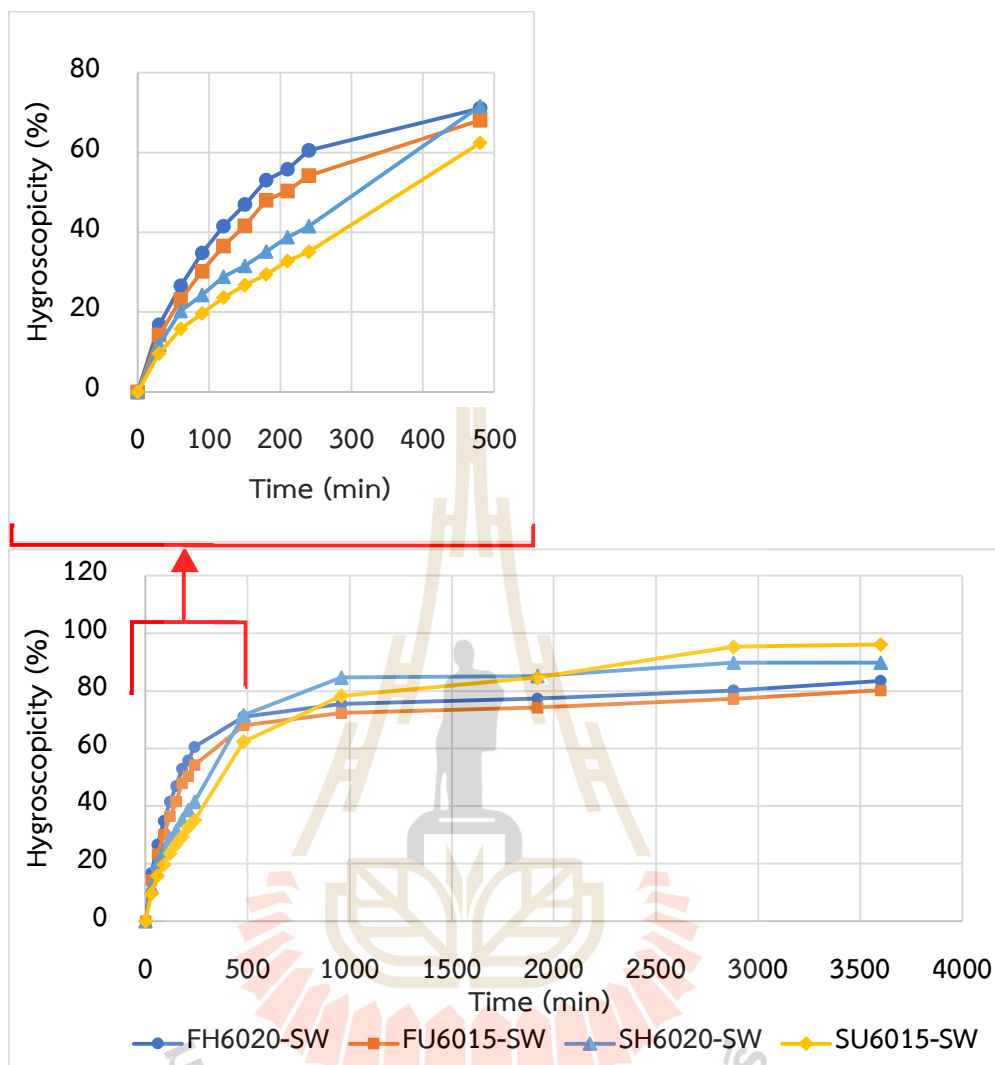
ความสามารถในการละลายของผง (Solubility) ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ผงควรจะเปียกและละลายได้เร็วโดยไม่มีการเกิดการจับตัวเป็นก้อน Taengsopha et al. (2023) กล่าวว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคส่งผลให้ความสามารถในการละลายและการไหลของผงดีขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการละลายของผงอินนูลินทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 80.90 – 82.78% ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ความสามารถในการละลายของผงอินนูลินที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าจากงานวิจัยของ Jirayucharoensak et al. (2015) ซึ่งมีค่าความสามารถในการละลายของผงอินนูลินที่สกัดจากผงแค้นตะวันและผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยอยู่ระหว่าง 45.38 – 77.35%

Tontul and Topuz (2017) รายงานว่า ความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity) แสดงถึงความสามารถของผงในการดูดซับความชื้นจากสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการดูดความชื้นของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) แสดงในรูปที่ 4.15 โดยแบ่งการวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกได้เก็บข้อมูลความสามารถในการดูดความชื้นทุก ๆ 30

min นาน 6 h และช่วงที่ 2 เก็บข้อมูลในทุก ๆ 8 h จนถึง 60 h ของการเก็บรักษา ซึ่งพบว่า ช่วงแรก อัตราความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity rate) ของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) มีค่าระหว่าง 0.30 – 0.34 %/min ซึ่งสูงกว่าของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่าระหว่าง 0.19 – 0.27%/min อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.6 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้ผงที่ได้มีลักษณะฟูและปุย (Zhu et al., 2019) ซึ่งอาจส่งผลให้อัตราการดูดซับความชื้น (hygroscopicity) สูงกว่าผงที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากโครงสร้างที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มระยะเวลาการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดความชื้นของผงอินนูลินในช่วงที่ 2 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดความชื้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีค่าความสามารถในการดูดความชื้นของผงที่เก็บรักษาไว้นาน 16 – 60 h สูงกว่าผงที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายลักษณะของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดย A คือ ผงของสารสกัดอินนูลินด้วยน้ำร้อนก่อนการทำบริสุทธิ์ด้วย เรซิน; B คือ ผงที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำร้อนและการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; C คือผงของสารสกัดอินนูลินด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงก่อนการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; D คือ ผงที่ได้จากการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซิน; (i) คือ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying); (ii) คือ การทำแห้งพ่นฝอย (Spray-drying)



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity) ของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) และแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean size) และการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Span value) ของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดหลังผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงอินนูลิน SH6020-SW มีค่า 84.83 μm ซึ่งสูงกว่าผงอินนูลิน SU6015-SW (39.91 μm) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดอินนูลินมีผลทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงอินนูลินมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้น้ำร้อนในการสกัดอินนูลิน ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Jambrak et al., 2014 ซึ่งพบว่า ผลของการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงแบบอ่าง (Ultrasound bath) ที่ 40 kHz กับเวย์โปรตีนทำให้ขนาดอนุภาคเวย์โปรตีนขนาดที่เล็กลง นอกจากนี้ Lou et al.,

2022 พบว่าการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงแบบหัวโพรบ (Ultrasound probe) กับอินนูลินสายยาวที่ 24 kHz พบว่าอินนูลินมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 100 – 300 μm โดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างของอินนูลินมีการเปลี่ยนแปลง

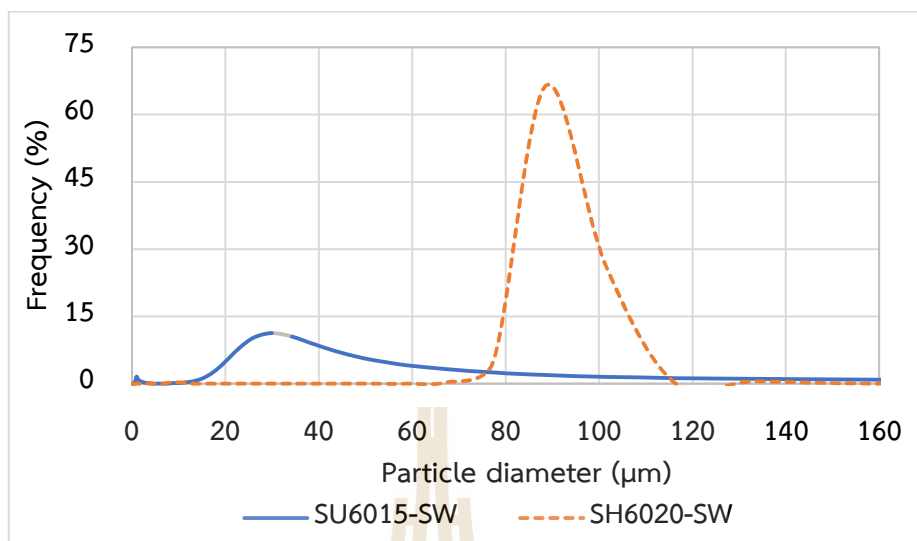
Tontul และ Topuz (2017) รายงานว่า ชนิดและความเข้มข้นของสารตัวพา (Carrier agent) รวมถึงความหนืดของสารตั้งต้นมีผลต่อขนาดของอนุภาคผง โดยที่ความเข้มข้นสูงขึ้นและความหนืดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขนาดอนุภาคส่งผลให้ความสามารถในการละลายและการไหลของผงดีขึ้น (Koc et al. 2014; Taengsopha et al., 2023) อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการละลายและการไหลของผงอินนูลิน SH6020-SW และ SU6015-SW ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทั้งนี้อาจเนื่องจากเพราะอินนูลินเป็นสารที่มีสมบัติละลายน้ำได้ดี ทำให้ค่าความสามารถในการละลายของผงอินนูลินที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันนั้นไม่แตกต่างกัน

การกระจายตัวขนาดอนุภาค (Span value) แสดงถึงความกว้างของการกระจายของขนาดอนุภาคผง หากมีการกระจายของอนุภาคสูงอาจบ่งบอกถึงขนาดอนุภาคผงที่มีความแตกต่างกันมาก โดยขนาดอนุภาคที่กระจายตัวกว้างอาจทำให้การละลาย การกระจายตัว และคุณภาพของผงไม่สม่ำเสมอและอาจทำให้ผงจับตัวเป็นก้อนได้ง่ายขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ พบว่า Span value ของผงอินนูลิน SH6020-SW มีค่า 0.22 ซึ่งต่ำกว่าผงอินนูลิน SU6015-SW (2.24) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.7) รูปที่ 4.16 แสดงขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของผง SH6020-SW และ SU6015-SW ซึ่งมีขนาดอนุภาคผงตั้งแต่ 6 – 152 μm และ 1 – 262 μm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Span value ที่แสดงในตารางที่ ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean size) และการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Span value) ของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

Parameters	SH6020-SW ¹	SU6015-SW ²
Mean size (μm)	84.83 $\pm$ 0.70 ^a	39.91 $\pm$ 3.45 ^b
Span value	0.22 $\pm$ 0.01 ^b	2.24 $\pm$ 0.26 ^a

^{1,2} The values are means of three replications $\pm$ standard deviations. Different lowercase letters in the same row indicate statistical differences between pretreatments ($p < 0.05$). SH6020-SW and SU6015-SW refer to spray-dried inulin powders after hot water extraction (H6020) and ultrasonic-assisted extraction (U6015), respectively, with strong and weak resin purification.



รูปที่ 4.16 ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray-drying) ของสารสกัดที่ผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

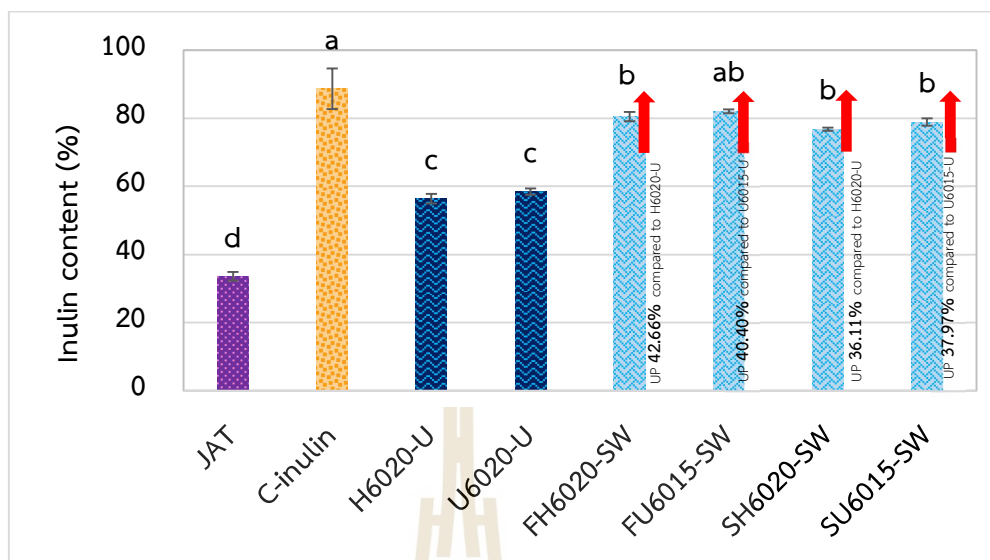
4.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลิน

รูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณอินนูลินด้วยชุดทดสอบ Fructan Assay Kit พบว่าผงแก่นตะวัน (JAT) ก่อนนำมาสกัด และปริมาณอินนูลินทางการค้า (C-inulin) มีปริมาณอินนูลินเท่ากับ 33.54% และ 88.69% ตามลำดับ หลังจากการสกัดอินนูลินจากผงแก่นตะวันด้วยวิธีการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min (H6020-U) และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัดที่อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min (U6015-U) พบว่า ปริมาณอินนูลินของผงสารสกัดนี้มีค่า 56.40% และ 58.43% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับผงแก่นตะวัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณอินนูลินในผงสกัดเพิ่มขึ้น 68.15% และ 74.20% เมื่อเทียบกับผงแก่นตะวัน เมื่อนำสารสกัดมาทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (H6020-SW และ U6015-SW) และทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) พบว่า ปริมาณอินนูลินของผง FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW มีค่า 80.46%, 82.03%, 76.77%, และ 78.86% ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ปริมาณอินนูลินในผงทั้ง 4 ตัวอย่างนี้สูงกว่าปริมาณอินนูลินในผงสกัด (H6020-U, U6015-U) และผงแก่นตะวัน (JAT) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณอินนูลินในผงหลังจากทำแห้งเพิ่มขึ้น 42.66%, 40.40%, 36.11% และ 37.97% ตามลำดับเมื่อเทียบกับผงสกัด ก่อนผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน อย่างไรก็ตาม ปริมาณอินนูลินของ FH6020-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW มีค่า ต่ำกว่าปริมาณอินนูลินทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ยกเว้นอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FU6015-SW) ซึ่งมีปริมาณอินนูลินไม่แตกต่างจากอินนูลินทางการค้า ในงานวิจัยนี้ ปริมาณอินนูลินของ FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khuenpet et al. (2017) ซึ่งได้สกัดอินนูลินจากหัวแก่่นตะวัน (JAT) ที่อุณหภูมิ 75 – 85°C นาน 30 min โดยสารสกัดถูกทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้อุณหภูมิเข้าที่ 160°C อัตราการป้อน (Feed flow) 12 mL/min และอุณหภูมิขาออกที่ 70°C พบว่าได้ปริมาณอินนูลินอยู่ระหว่าง 75.62 – 78.42% แต่ปริมาณอินนูลินต่ำกว่าของ Srinameb et al. (2017) ที่ได้สกัดอินนูลินจากหัวแก่่นตะวันที่อุณหภูมิ 80°C นาน 20 min ร่วมกับตัวทำละลายเร่งปฏิกิริยาและผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยมีไดเอทิลอะมิโนเอทิลเซลลูโลสเป็นตัวดูดซับจากนั้นทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า ปริมาณอินนูลินเท่ากับ 92.5%

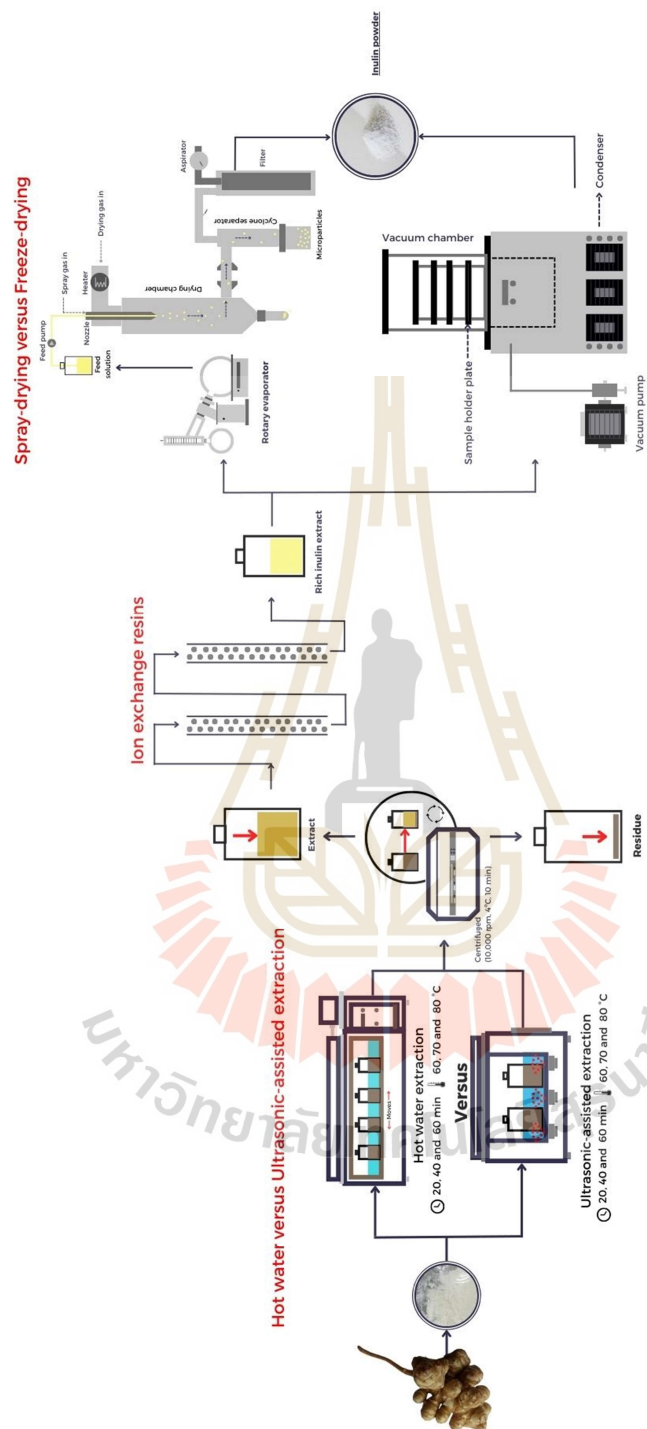
ปริมาณผลผลิตทั้งหมดที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยของ FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW มีค่า 6.38%, 6.87%, 2.89% และ 3.18% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) เมื่อเทียบกับผงแก่่นตะวันเริ่มต้น เมื่อคำนวณปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมด (Total inulin yield) ของ FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW พ มีค่า 15.30%, 16.80%, 6.61%, และ 7.47% ตามลำดับ (ไม่แสดงผลในตาราง) โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมดสูงกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การสกัดอินนูลินจากผงแก่่นตะวันด้วยวิธีการใช้น้ำร้อน (H6020-U) และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (U6015-U) มีผลทำให้ได้อินนูลินในผงสกัดเพิ่มขึ้นเป็น 56.40% และ 58.43% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สภาวะในการสกัดทั้ง 2 วิธีนี้มีผลทำให้ได้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดไม่แตกต่างกัน และเมื่อผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทำแห้งด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย ทำให้ได้ผงอินนูลิน FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW ที่มีปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นเป็น 80.46%, 82.03%, 76.77%, และ 78.86% ตามลำดับ โดยวิธีการทำแห้งทั้ง 2 วิธีนี้ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลินที่ได้ แต่การทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีผลช่วยในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของ อินนูลิน โดยทำให้ปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นคิดเป็น 42.66%, 40.40%, 36.11% และ 37.97% ตามลำดับ สำหรับปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมด (Total inulin yield) ที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดและปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมดสูงกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย

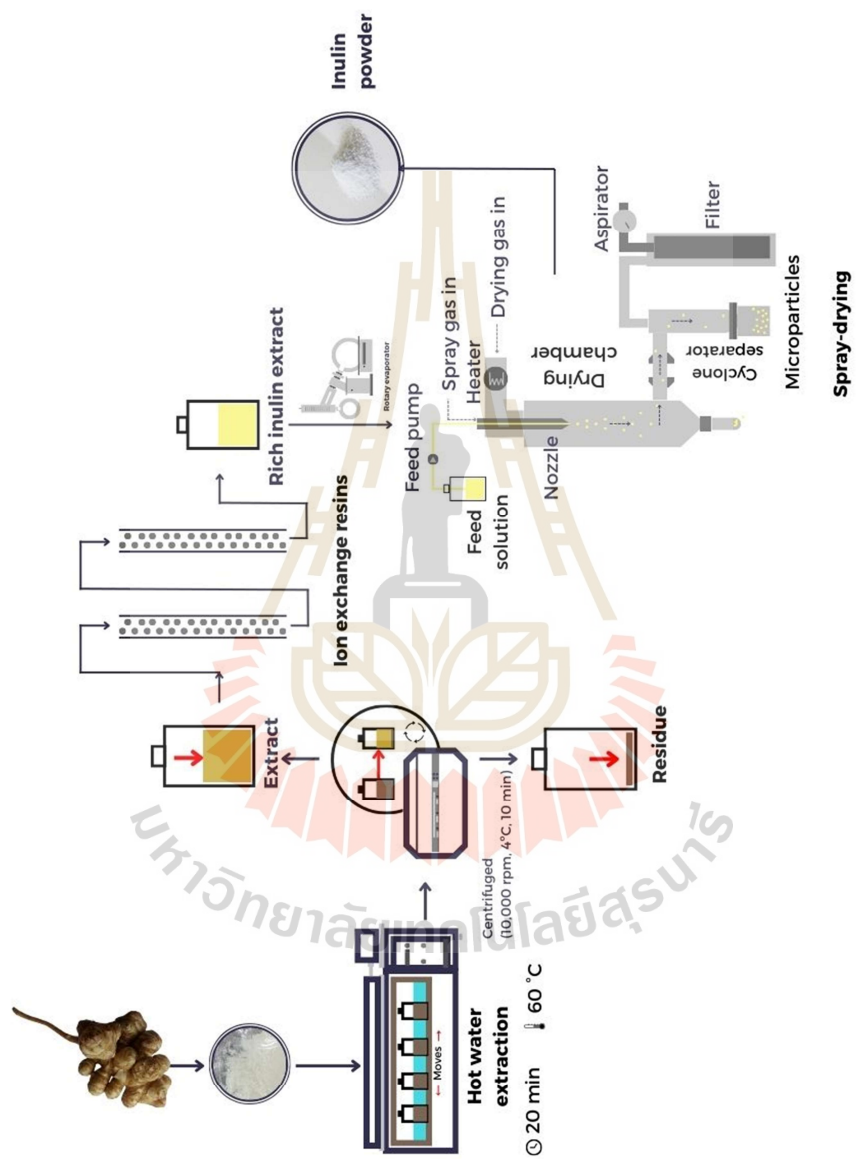


รูปที่ 4.17 ปริมาณอินนูลินของผงแค้นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) อินนูลินจากผงสารสกัดด้วยน้ำร้อน (H6020-U) อินนูลินจากผงสารสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (U6015-U) อินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านเรซินและทำแห้งแบบแช่เยือก (FH6020-SW และ FU6015-SW) และอินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านเรซินและทำแห้งแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW)

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตผงอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน โดยเริ่มจากการศึกษาวิธีการสกัด การทำบริสุทธิ์ และการทำแห้งเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุด (แสดงขั้นตอนในรูปที่ 4.18) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วยอินนูลินจากหัวแค้นตะวันด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 20 min ร่วมกับการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นกระบวนการที่ช่วยให้ได้ผงอินนูลินคุณภาพสูง ทั้งด้านความสามารถในการสกัดอินนูลิน และสมบัติทางเคมีกายภาพของผงอินนูลิน อีกทั้งยังได้ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคที่เหมาะสม และมีความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มคุณภาพและความคงตัวของผงอินนูลินระหว่างเก็บรักษา โดยกระบวนการที่เหมาะสมนี้แสดงในรูป 4.19



รูปที่ 4.18 ขั้นตอนในการวิจัยกระบวนการผลิตอินูลินจากหัวแ่ก่นตะวัน



รูปที่ 4.19 กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตอินูลินจากหัวแค้นตะวัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการผลิตอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน โดยสามารถสรุปผลการวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามผลการศึกษาดังนี้ คือ (1) การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน (2) การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน และ (3) การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

5.1 การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินนูลินจากหัวแค้นตะวัน

5.1.1 การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 80°C ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) สูงกว่าการสกัดที่ 60°C และ 70°C ขณะที่การสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C ให้ค่า TSS สูงกว่าการสกัดที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลานาน นอกจากนี้ HW-extraction ที่ 60°C ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 70 และ 80°C แต่ UAE-extraction ที่ 60°C ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่น

5.1.2 การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 60°C เป็น 70 และ 80°C ใน HW-extraction ส่งผลให้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน UAE-extraction ที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.3 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดอินนูลินด้วย HW-extraction คือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัดนาน 20 min โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.8567 สำหรับการสกัดอินนูลินด้วย UAE-extraction สภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 60°C ระยะเวลาสกัดนาน 15 min โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.6778 การสกัดด้วย HW-extraction อุณหภูมิเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญในการสกัดอินนูลิน แต่ UAE-extraction ระยะเวลาเป็นตัวแปรต้นสำคัญต่อปริมาณอินนูลินที่สกัดได้

5.1.4 จากภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า หัวแค้นตะวันมีลักษณะผิวเรียบมากและไม่มีรูพรุน การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) มีผลทำให้พื้นผิวของหัวแค้นตะวันมีลักษณะเป็นพองฟูและมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งมากกว่าพื้นผิวของหัวแค้นตะวันที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิเดียวกัน

5.2 การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน

5.2.1 สารสกัดก่อนผ่านเรซิน H6020-U และ U6015-U มีค่าการนำไฟฟ้า 7.24 และ 7.14 mS/cm ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของสารสกัด H6020-SW และ U6015-SW ลดลงเหลือ 0.75 และ 0.96 mS/cm ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดแร่ธาตุในสารสกัด H6020-SW และ U6015-SW ได้ถึง 89.64% และ 86.55% ตามลำดับ

5.2.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) และปริมาณของแข็งของสารสกัดก่อนผ่านเรซิน H6020-U และ U6015-U มีค่า 15.08 และ 15.07°Brix และ 16.68 และ 16.15% ตามลำดับ เมื่อผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion พบว่า TSS และปริมาณของแข็งของสารสกัด H6020-SW และ U6015-SW มีค่าลดลงเหลือ 1.49 และ 1.69°Brix และ 1.40 และ 1.50% ตามลำดับ

5.2.3 การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้เพียงชนิดเดียว อัตราการกำจัดสีของสารสกัด H6020-SW และ U6015-SW เพิ่มขึ้นเป็น 50.96% และ 62.39% ตามลำดับ

5.2.4 ค่าความเป็นสื่อน้ำตาลของสารสกัดก่อนผ่านเรซิน H6020-U และ U6015-U อยู่ที่ 154.28 และ 161.29 ตามลำดับ หลังจากผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ร่วมกับ Weak base anion พบว่า ค่าความเป็นสื่อน้ำตาลของ H6020-SW และ U6015-SW ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยลดลงเหลือ 2.77 และ 2.84 ตามลำดับ

5.3 การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินนูลิน

5.3.1 ผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งทั้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยมีความชื้นต่ำกว่า 10% และปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.3 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความปลอดภัยจากการเจริญของจุลินทรีย์และสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น

5.3.2 ผงอินนูลินจากการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นที่อัดตัวสูงกว่าจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ซึ่งแสดงถึงขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้มีความคงตัวในการเก็บรักษาดีกว่า และมีสีขาวมากกว่า

5.3.3 การสกัดอินนูลินด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงลดลงเมื่อเทียบกับการสกัดด้วยน้ำร้อน แต่การกระจายขนาดอนุภาค (Span value) ของผงจากการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกว้างกว่าผงจากการสกัดด้วยน้ำร้อน แสดงถึงความแตกต่างของขนาดอนุภาคที่มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอในการละลาย การกระจายตัว และคุณภาพของผง

5.3.4 ความสามารถในการละลายของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยไม่แตกต่างกัน แต่อัตราความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity rate) ของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสูงกว่าผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบพ่นฝอย

5.3.5 หลังจากทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย พบว่า ผงอินนูลิน FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW มีปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นเป็น 80.46%, 82.03%, 76.77% และ 78.86% ตามลำดับ โดยการทำแห้งทั้งสองวิธีไม่มีผลต่อปริมาณอินนูลิน แต่การทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินช่วยเพิ่มปริมาณอินนูลินเป็น 42.66%, 40.40%, 36.11% และ 37.97% เมื่อเทียบกับปริมาณอินนูลินก่อนการทำบริสุทธิ์

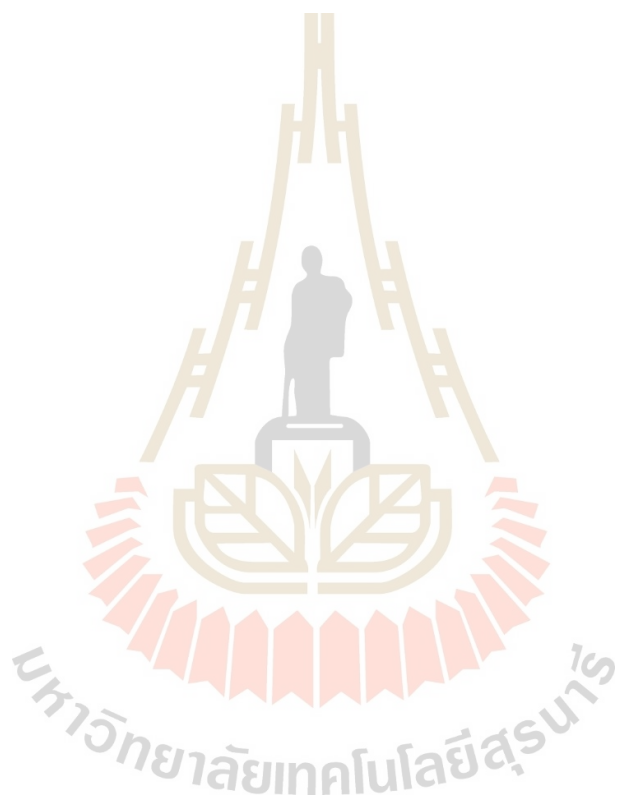
5.3.6 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (6.38 – 6.87%) และปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมด (15.30 – 16.80%) สูงกว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งทำให้ได้ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (2.89 – 3.18%) และปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมด (6.61 – 7.47%)

5.3.7 การสกัดด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 20 min ตามด้วยการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตผงอินนูลินจากหัวแก่นตะวัน ซึ่งทำให้ได้ผงอินนูลินที่มีคุณภาพและความคงตัวระหว่างเก็บรักษา

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาผลของการบริสุทธิ์ของสารสกัดอินนูลิน พบว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ Strong acid cation (Amberlite FPC22Na, DuPont™, Delaware, USA) สำหรับกำจัดไอออนบวก และ Weak base anion (Amberlite FPA51, DuPont™, Delaware, USA) สำหรับกำจัดไอออนลบ มีผลต่อการลดปริมาณผลผลิตอินนูลิน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการทำบริสุทธิ์สาร สกัดอินนูลินด้วยวิธีอื่น ๆ ที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนในการดำเนินการไม่สูง เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

นอกจากนี้ การศึกษาวิธีการทำแห้งผงอินนูลินด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอย พบว่าผงอินนูลินมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี ดังนั้นจึงควรศึกษาการเติมสารตัวพา (Carrier agent) เช่น มอลโทเดกซ์ทรีน เพื่อลดความสามารถในการดูดความชื้น รวมทั้งช่วยปรับปรุงคุณภาพของผงอินนูลิน





รายการอ้างอิง

- Akyıldız, A., Önür, E., Ağçam, E., Kirit, B.D. and Türkmen, F.U. (2022). Changes in quality parameters of orange juice deacidified by ion exchange resins. *Food Chemistry*, Volume 375, 131837.
- Alvarado, L. and Chen, A. Electrodeionization: Principles, strategies and applications. *Electrochimica Acta*, 132, 583-597.
- Arepally, D., and Goswami, T. K. (2018). Effect of inlet air temperature and gum Arabic concentration on encapsulation of probiotics by spray drying. *LWT - Food science and technology*. doi:10.1016/j.lwt.2018.10.022.
- Barbaro, P. and Liguori, F. (2009). Ion exchange resins: Catalyst recovery and recycle. *Chemical Recovery*, 109(2), 515-529.
- Barbosa, J., Borges, S., Amorim, M., Pereira, M.J., Oliveira, A., Pintado, M.E. and Teixeira, P. (2015). Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder. *Journal of Functional Foods*, 17, 340 – 351.
- Bashir, M.J.K., Aziz, H.A., Yusoff, M.S., Huqe, A.A.M. and Mohajeri, S. (2010). Effects of ion exchange resins in different mobile ion forms on semi-aerobic landfill leachate treatment. *Water Sci Technol*, 61(3):641-9. doi: 10.2166/wst.2010.867.
- Bonto, A.P, Tiozen, R.N., Sreenivasulu, J.N. and Camacho, D.H. (2021). Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: A review. *Journal of Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 71.
- Bhandari, V.M., Sorokhaibam, L.G. and Ranade, V.V. (2022). Ion exchange resin catalyzed reactions—An overview. *Industrial Catalytic Processes for Fine and Specialty Chemicals*, 393-426

- Bhanja, A., Sutar, P.P. and Mishra, M. (2016). Inulin a polysaccharide: Review on its functional and prebiotic efficacy. *Journal of Food Biochemistry*, 46(12), e14386.
- Castellino, M., Renna, M., Leoni, B., Calasso, M., Difonzo, G., Santamaria, P., Gambacorta, G., Caponio, F., Angelis, M D. and Paradiso, V.M. (2020). Conventional and unconventional recovery of inulin rich extracts for food use from the roots of globe artichoke. *Food Hydrocolloids*, 107, 105975.
- Ceylan, H., Bigicli, N and Cankurtaran, T. (2021). Improvement of functional cake formulation using Jerusalem artichoke flour as inulin source and resistant starch (RS4). *LWT - Food Science and Technology*, 145, 111301.
- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Arjharn, W., Treeamnuk, T., Junyusen, P. and Pakawanit, P. (2021). Effects of parboiling and infrared radiation drying on the quality of germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation* Volume 45, Issue 11 e15892.
- Cheng, X., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B. and Sun, J. (2015). The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 576-585.
- Chen, Y., Su, J.Y. and Yang, C.Y. (2022). Ultrasound-assisted aqueous extraction of chlorogenic acid and cynarin with the impact of inulin from burdock (*Arctium lappa* L.) roots. *Journal of antioxidants*, vol. 11, no. 7.
- Coca, M., García, M.T., Mato, S., Cartó, Á. and González, G. (2008). Evolution of colorants in sugarbeet juices during decolorization using styrenic resins. *Journal of food engineering* 89, 429–434.
- Díaz, A., García, M.A. and Dini, C. (2022). Jerusalem artichoke flour as food ingredient and as source of fructooligosaccharides and inulin. *Journal of Food Composition and Analysis*, Volume 114, 104863.
- Coca, M., García, M.T., Mato, S., Cartón, A. and González, G. (2008). Evolution of colorants in sugarbeet juices during decolorization using styrenic resins. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 429–434.

- Dobre, T., Stroescu, M., Stoica, A., Draghici, E. and Antohe, N. (2008). Inulin extraction and encapsulation. Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timisoara, ROMÂNIA, 53(67), 215-217.
- Dyvelkov, K.N. and Sloth, J. (2014). New advances in spray-drying processes. Microencapsulation in the Food Industry, 57-63.
- Escobar-Ledesma, F.R., Sánchez-Moreno, V.E., Vera, E., Ciobotă, V., Jentzsch P.V. and Jaramillo, L.I. (2020). Extraction of inulin from Andean plants: An approach to non-traditional crops of Ecuador. Molecules, 25(21), 25215067.
- Esmaili, F., Hashemiravan, M., Eshaghi, M.R. and Gandomi, H. (2021). Optimization of aqueous extraction conditions of inulin from the *Arctium lappa* L. roots using ultrasonic irradiation frequency. Journal of Food Quality, Volume 2021, 5520996.
- Flórez-Fernández, N. and Muñoz, M.J.G. (2017). Ultrasound-assisted extraction of bioactive carbohydrates. Water Extraction of Bioactive Compounds, Chapter 12, 317-331.
- Garcia-Amezquita, L.E., Welte-Chanes, J., Vergara-Balderas, F.T., and Bermudez-Aguirre, D. (2016). Freeze-drying: the basis process. Encyclopedia of Food and Health, 104-109.
- Guo, X, Chang, R. and Hussain, M.A. (2009). Ion-exchange resins as drug delivery carriers. Journal of Pharmaceutical Sciences, 98(11), 3886-3902.
- Harmankaya, M., Juhaimi, F. A., and Özcan, M. M. (2012). Mineral contents of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) growing wild in Turkey. Analytical Letters, 45(15), 2269–2275.
- Hilman, A., Harmayani, E. and Cahyanto, M.N. (2018). Inulin extraction and characterization of fresh and chip Gembili (*Dioscorea esculenta*) extract by ultrasound-assisted extraction. International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches, 47-53.

- Iraporda, C., Rubel, I.A., Manrique, G.D. and Abraham, A.G. (2019). Influence of inulin rich carbohydrates from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers on prebiotic properties of Lactobacillus strains. LWT - Food Science and Technology, 101, 738–746.
- Jambrak, A.R., Mason, T.J. Lelas, V., Paniwnyk, L. and Herceg, Z. (2014). Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins. Journal of food engineering 121, 15–23.
- Jangam, S.V., Mujumdar, A.S. and Adhikari, B. (2016). Drying: Physical and structural changes. Encyclopedia of Food and Health, Pages 446-455.
- Jirayucharoensak, R., Jittanit, W. and Sirisansaneeyakul, S. (2015). Spray-drying for inulin powder production from Jerusalem artichoke tuber extract and product qualities. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2558
- Johansson, Ö., Pamidi, T., Khoshkhoo, M. and Sandström, Å. (2017). Sustainable and energy efficient leaching of tungsten (W) by ultrasound controlled cavitation. Luleå University of Technology, Sweden.
- Junyusen, T., Ngampang, N., Sangmuang, A., Suthada, S. and Chatchavanthatri, N. (2017). The effects of inulin on the textural, thermal, and microstructural properties of reduced-fat cheese. Suranaree Journal Science Technology, 24(1), 23–30.
- Khuenpet, K., Fukuoka, M., Jittanit, W. and Sirisansaneeyakul, S. (2017). Spray drying of inulin component extracted from Jerusalem artichoke tuber powder using conventional and ohmic-ultrasonic heating for extraction process. Journal of Food Engineering, Volume 194, 67-78.
- Kilic-Akyilmaz, M., Ozer, B., Bulat, T. and Topcu, A. (2022). Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some bioactive components of milk. International dairy journal, Volume 126, 105231.

- Leyva-Porras, C., López-Pablosb, AL., Alvarez-Salasc, C., Pérez-Urizard, J. and Saavedra-Leosb, Z. (2014). Physical properties of inulin and technological applications, Polysaccharides, DOI 10.1007/978-3-319-03751-6_80-1.
- Lingyun W., Jianhua, W., Xiaodong, Z., Da, T., Yalin, Y., Chenggang, C. Tianhua, F. and Fan, Z. (2007). Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke tubers. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1087–1093.
- Lou, X., Lou, D., Yue, C., Zhang, T., Li, P., Xu, Y., Xu, B. and Xing, J. (2022). Effect of ultrasound treatment on the physicochemical and structural properties of long-chain inulin. *LWT- Food Science and Technology* 154. 112578.
- Mavumengwana, V.B. (2004). Isolation, purification and characterization of inulin and fructooligosaccharides from *Chicorium intybus* and inulinase from *Aspergillus niger*. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of master. Department of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology Faculty of Scienc. Rhodes University.
- Michalska-Ciechanowska, A., Majerska, J., Brzezowska, J., Wojdyło, A. and Figiel, A. (2020). The influence of maltodextrin and inulin on the physico-chemical properties of cranberry juice powders. *Chem engineering*, 4(1), 4010012.
- Mushtaq, A., Roobab, U., Denoya, Gl., Beatriz, Ml., Jose, G., Lorenzo, M., Barba, F.J., Asif, X.Z., Rana, W. and Aadil, M. (2020). Advances in green processing of seed oils using ultrasound-assisted extraction: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), e14740.
- Paseephol, T., Small, D. and Sherkat, F. (2007). Process optimisation for fractionating Jerusalem artichoke fructans with ethanol using response surface methodology. *Food Chemistry* 104, 73–80.
- Paseephol, T. and Sherkat, F. (2009). Probiotic stability of yoghurts containing Jerusalem artichoke inulins during refrigerated storage. *Journal of functional food*, 1(3), 311–318.

- Petkova, N., Ivanov, I., Vrancheva, R., Denev, P. and Pavlov, A. (2017). Ultrasound and microwave-assisted extraction of Elecampane (*Inula helenium*) roots. *Natural Product Communications*, 12 (2), 171-174.
- Peerawat, T., Junyusen, T., Moolkaew, P. and Junyusen, P. (2023). Comparative effects of prebiotic addition on the physicochemical and microstructural properties of spray-dried yogurt powder. *Engineering and applied science research*. vol. 50 (6), 657-663.
- Phan, V.M., Junyusen, T., Liplap, P. and Junyusen, P. (2020). Optimization and kinetics of ultrasound-assisted solvent extraction of gamma oryzanol from dried rice bran soapstock. *Journal of Agr. Nat. Resour.*, 54 (3), 309-316.
- Pourfarzad, A., Ahmadian, Z. and Habibi-Najafi, M.B. (2018). Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study. *Heliyon*, 4, e01017.
- Povey, M.J.W. and Mason, T.J. (1998). *Ultrasound in food processing*, Blackie academic and professional, London, 105-126.
- Puangbut, D., Jogloy, S., Upite, D., Vorasoot, N., Srijaranai, S., Kesmala, T., Holbrook, C.C. and Patanothai, A. (2012). Influence of planting date and temperature on inulin content in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Australian journal of Crop science*, 6(7), 1159-1165.
- Ratti, C. (2013). Freeze drying for food powder production. *Handbook of Food Powders*, 57-84
- Reddy, R.S., Ramachandra, C.T., Hiregoudar, S., Nidoni, U., Ram, J. and Kammar, M. (2014). Influence of processing conditions on functional and reconstitution properties of milk powder made from Osmanabadi goat milk by spray drying. *Small Ruminant Research*, 119(1-3), 130–137.
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vazquez, S.E., Condezo-Hoyos, L., Gomes-Ordóñez, E. and Ruperez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops & Products*, 170, 113726.

- Reinoso, B.D., Muñoz, M.J.G. and González, H.D. (2017). Introduction. Water Extraction of Bioactive Compounds, 1-50.
- Ronkart, S.N., Deroanne, C., Paquot, M. and Fougnyes, C. (2007). Characterization of the physical state of spray-dried inulin. Food Biophysics, 2(2), 83-92.
- Rubel, I.A., Iraporda, C., Novosad, A., Cabrera, F.A., Genovese, D.B. and Manrique, G.D. (2018). Inulin rich carbohydrates extraction from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers and application of different drying methods. Food research international, Volume 103, 226-233.
- Rubel, I.A., Iraporda, C., Manrique, G.D., Genovese, D.B. and Abraham, A.G. (2021). Inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): from its biosynthesis to its application as bioactive ingredient. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 26(5), 100281.
- Saikia, S., Mahnot, N. K., and Mahanta, C.L. (2015). Effect of spray-drying of four fruit juices on physicochemical, phytochemical and antioxidant properties. Journal of Food Processing and Preservation, 39(6), 1656–1664.
- Sarkar, R., Bhowmik, A., Kundu, A., Dutta, A., Nain, L, Chawla, G. and Saha, S. (2021). Inulin from *Pachyrhizus erosus* root and its production intensification using evolutionary algorithm approach and response surface methodology. Carbohydrate Polymers, 251, 117042.
- Severo, M.G., Zeferino, A.S. and Soccol, C.R. (2017). Development of a Rabies vaccine in cell culture for veterinary use in the Lyophilized Form, 523-568.
- Sharma, A., & Gupta, N. (2006). Ultrasonic pre-irradiation effect upon aqueous enzymatic oil extraction from almond and apricot seeds. Ultrasonic Sonochemistry, 13, 529–534
- Shewale, S.R. and Hebbar, U.H. (2016). Effect of infrared pretreatment on low-humidity air drying of apple slices. Drying Technology An International Journal. 490-499, doi: 10.1080/07373937.2016.1190935.

- Srinameb, B., Nuchadomrong, S., Jogloy, S., Patanothai A., and Srijaranai S. (2015). Preparation of inulin powder from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tuber. *Plant Foods Human Nutrition*, 70(2), 221–226.
- Sonsomboonsuk, S., Junyusen, T., Moolkaew, P., Junyusen, P., Treeamnuak, T., Taengsopha, P., Chatchavanthatri, N., Nawong, S. and Pakawanit, P. (2024). Effects of cooking methods on the physicochemical, textural and microstructural properties of hot salt puffed germinated brown rice. *Journal of Agriculture and Food Research* 15, 101001.
- Tontul, I. and Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in food science & Technology* 63, 91–102.
- Vázquez-Vuelvas, O.F., Chávez-Camacho, F.A., Meza-Velázquez, J.A., Mendez-Merino, E., Ríos-Licea, M.M. and Contreras-Esquivel, J.C. (2020). A comparative FTIR study for supplemented agavin as functional food. *Food Hydrocolloids* 103, 105642.
- Víctor-Ortega, M.D., Ochando-Pulido, J.M., Airado-Rodríguez, D. and Martínez-Ferez, A. (2016). Comparison between different ion exchange resins combinations for final treatment of olive mill effluent. *Separation and Purification Technology*, 158, 374-382.
- Wang, Y., Zhao, Y., Xue, F., Nan, X., Wang, H., Hua, D., Lie, J., Yang, L., Jiang, L. and Xiong, B. (2020). Nutritional value, bioactivity, and application potential of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a neotype feed resource. *Animal Nutrition*, 6(4), 429-437.
- Xu, H., Gunenc, A. and Hosseinian, F. Ultrasound affects physical and chemical properties of Jerusalem artichoke and chicory inulin. *Food Biochem.*, Vol. 46, no. 4.
- Yousefi, S., Kavyanirad, M., Aminifar, M., Weisany, W. and Khaneghah, K.M. (2022). Yogurt fortification by microencapsulation of beetroot extract (*Beta vulgaris* L.) using

- maltodextrin, gum arabic, and wheyprotein isolate. Food Sci Nutr, 10, 1875–1887.
- Zarroug, Y., Abdelkarim, A., Dorra, S.T., Hamdaoui, G., Felah, M.E. and Hassouna, M. Biochemical characterization of *Tunisian cichorium intybus* L. roots and optimization of ultrasonic inulin extraction. Mediterranean journal of chemistry, vol.6, no. 1, 674-685.
- Zhang, H., Yang, L., Zhu, D. and Liu, H. (2018). An efficient method for decoloration of inulin from Jerusalem artichoke by Macroporous resin. Key Engineering Materials, 789, 92-97.
- Zhang, X., Zhu, X., Shi, X., Hou, Y. and Yi, Y. (2022). Extraction and purification of inulin from Jerusalem artichoke with response surface method and ion exchange resins. American Chemical Society Omega, 7(14), 12048–12055.
- Zhu, Z., Wu, M., Cai, J., Li, S., Marszalek, K., Lorenzo, J.M. and Barba, F.J. (2019). Optimization of spray-drying process of Jerusalem artichoke extract for inulin production. Molecules, 24(9), 24091674.
- กลอยใจ เขยกลิ่นเทศ. 2556. การผลิตสีผงสำหรับผสมอาหารจากหัวสตรูตธรรมาชาติด้วยวิธีการทำแห้งแบบฉีดพ่นฝอย. โครงการวิจัยคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- จารุพิชญา โสมลคร. 2563. การศึกษาวิธีการสกัดและผลของอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวต่อปริมาณอินนูลินในกระเทียม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา.
- เฉลิมขวัญ คำคำ และ มัลลิกา ชมนาวัง. 2548. คุณรู้จัก Prebiotics แล้วหรือยัง. วารสารอาหาร. ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 หน้า 96-102.
- ชุติมา วันเพ็ญ. 2555. การสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากแก่นตะวันด้วยอัลตราโซนิก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพมหานคร.

- ธีระพัศ ศิลปะสมบูรณ์. 2557. อิทธิพลของปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโตของแก่นตะวันในดินชุด
อยุธยา. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ,
พระนครศรีอยุธยา.
- นริศรา วิจิต, หยาดฝน ทะนงการกิจ และ พิริรัชชญา ภาณุสันต์. 2562. ผลของการเอนแคปซูเลชัน
โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะเกี๋ยง. โครงการวิจัย
งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 สนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ
(วช.) มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- มยุรฉัตร เผือกไร่, สังคม เตชะวงศ์เสถียร และ สนั่น จอกลอย. 2555. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพและ
ปริมาณอินนูลินในหัวแก่นตะวันตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา. *Agricultural
Sci. J.* 43: 3 (Suppl.): 608-611. ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะ
เกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- รวีพร จิรายุเจริญศักดิ์, วีระเชษฐ์ จิตตะนิทย์ และ สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล. 2558. Spray-drying for
inulin powder production from Jerusalem Artichoke tuber extract and
product qualities. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่
17 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2558*, 13-18.
- วันชนก ไกรงาม. 2564. ผลของการแช่เยือกแข็งต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้ง และคุณภาพของแตงโม
ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ. วิทยานิพนธ์วิทยา
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพมหานคร.
- ศิริพร ตันจ่อ, ครรชิต จุฑประสงค์, และ ชนิญทิตา ไชยโต. 2555. อินนูลินและฟรุคโตโอลิแซคคาไรด์
ในแก่นตะวันสายพันธุ์ต่างๆ. *KKU Res. J.* 2012;17(11), 26-27.
- ศิริพร สอนสมบูรณ์สุข. 2561. การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบ
กระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- ศุภลักษณ์ เกตุตากแดด, อุไรลักษณ์ พงษ์เกษ, ศุภลักษณ์ คมคาย, ทรัพย์มณี บุญญโก และ นิตยา ภู
งาม. (2567). การเปรียบเทียบวิธีการสกัดอินนูลินจากแก่นตะวัน. *วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย* 16(2), 364-374.
- สำคัญ รัตนบุรี. 2551. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย. รายงานการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา

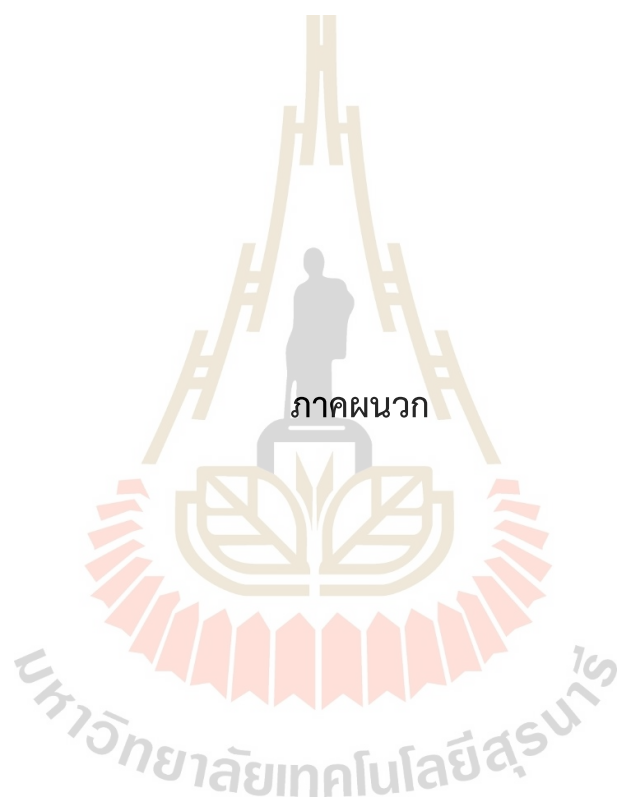
สุพจน์ นวลละออง. 2552. การสกัดสารพรีไบโอติกส์จากพืช. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา

สุพิชญ์ชญา กลั่นทะกะสุวรรณ. 2562. การใช้อัลตราโซนิกช่วยสกัดสารออกฤทธิ์ชีวภาพจากกระเทียมเพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อ Escherichia coli. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

เอกภพ สีนงาน. 2555. การศึกษาคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติกของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ที่ได้จากแก่นตะวัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพมหานคร.

โอรีโนโค เยื่อง. 2551. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ใช้วิธีการดักจับไอน้ำแบบใช้สารดักไอน้ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพมหานคร.

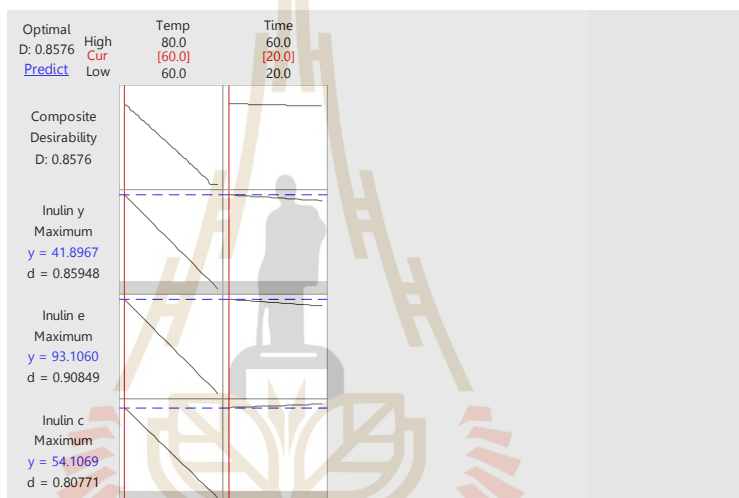




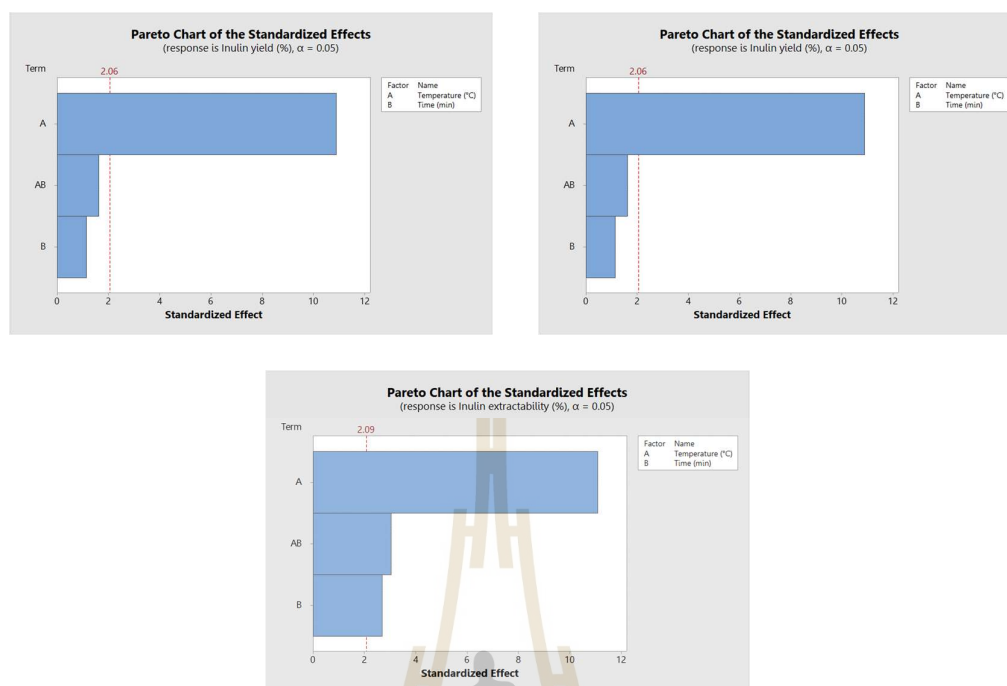
ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ



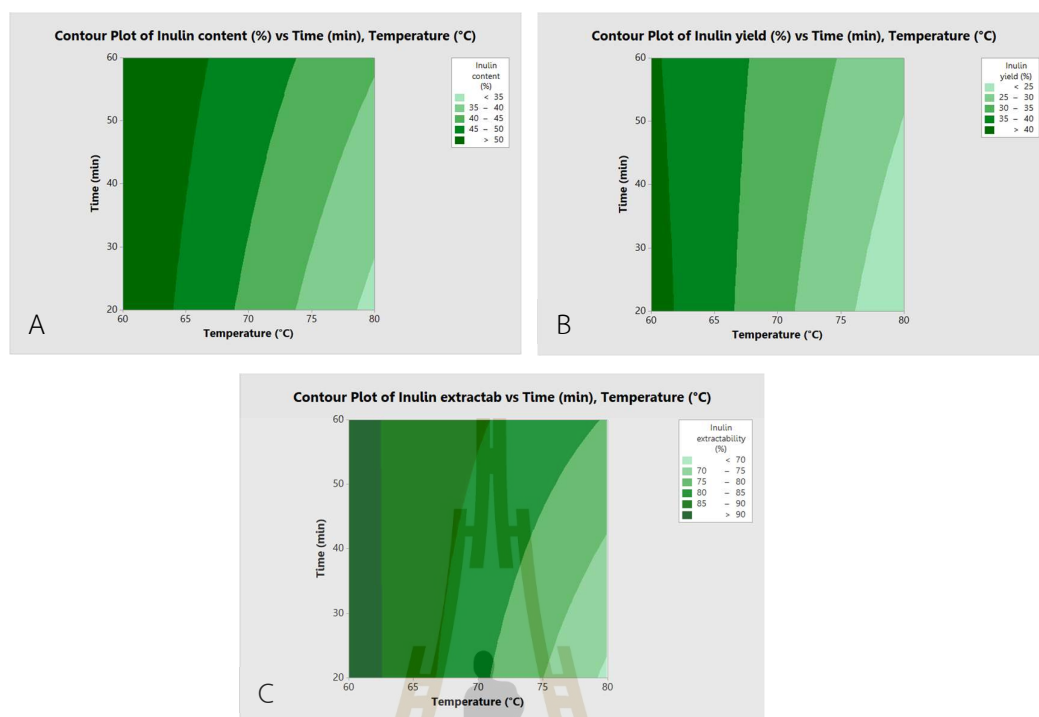
ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลา 20, 40 และ 60 min เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum condition) ในการสกัดอินนูลิน โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ซึ่งสามารถคำนวณค่าความพึงพอใจโดยรวม (composite desirability, D) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมที่เท่ากับ 1 แสดงถึง สภาวะการสกัดนั้นได้รับความพึงพอใจโดยรวมสูงสุด



รูปที่ ก.1 การหาค่าตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดอินนูลินด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน (y = ตัวแปรตาม, D = ค่าพึงพอใจโดยรวม)

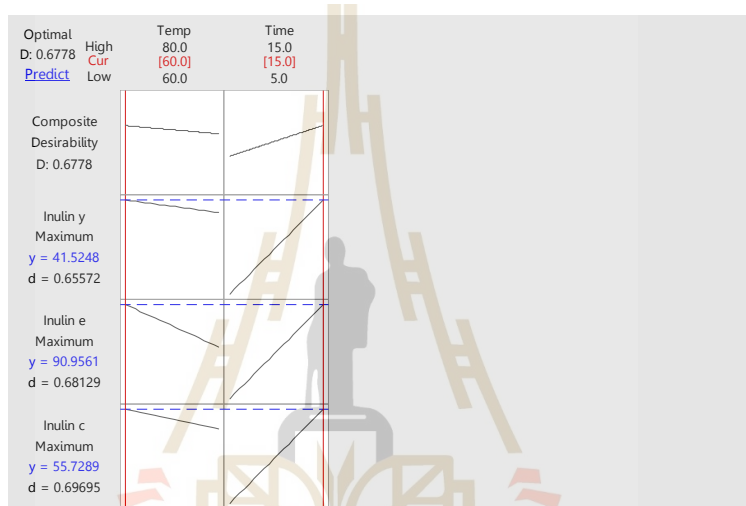


รูปที่ ก.2 แผนภูมิ Pareto แสดงค่า Standardized effect ของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) ($p < 0.05$)

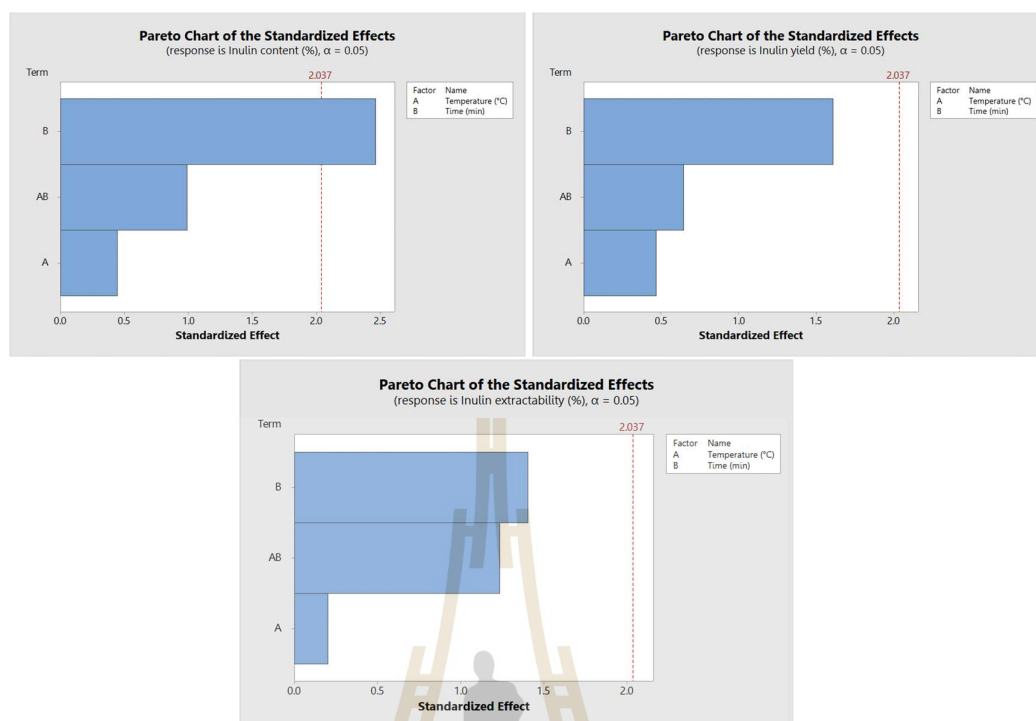


รูปที่ ก.3 กราฟโครงร่าง (A) ปริมาณอินนูลินของสารสกัด; (B) ปริมาณผลผลิตอินนูลิน; (C) ความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction)

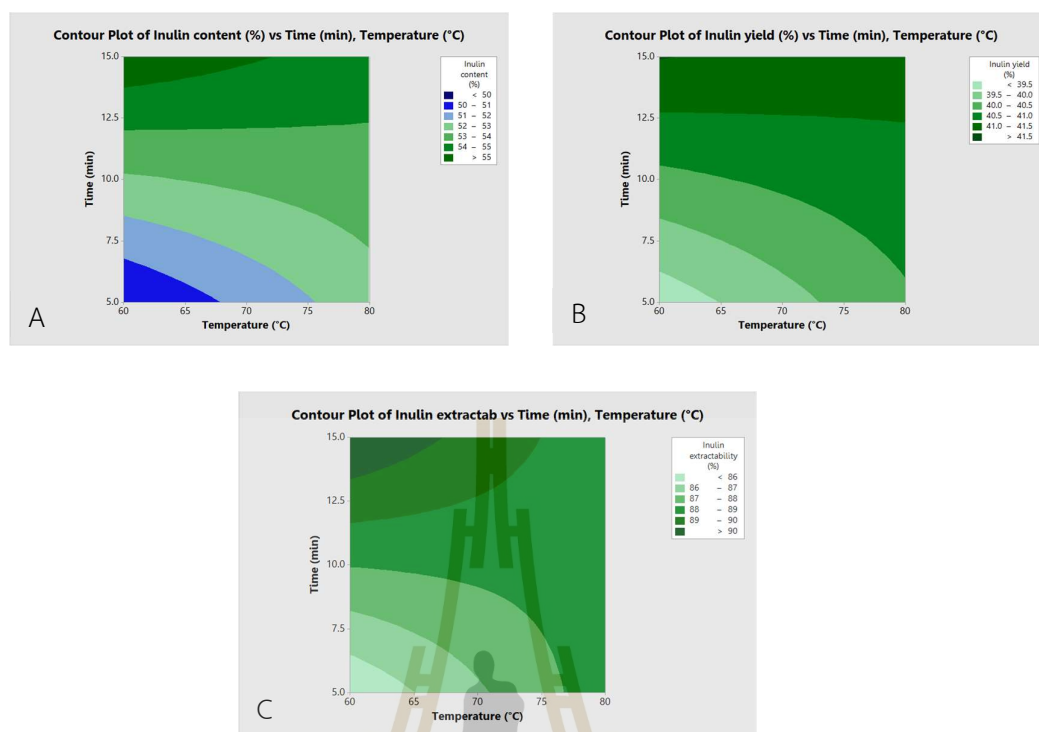
ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน จากการสกัดผงแก่นตะวันโดยวิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C นาน 5, 10 และ 15 min เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum condition) ในการสกัดอินนูลิน โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ซึ่งสามารถคำนวณค่าความพึงพอใจโดยรวม (composite desirability, D) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมที่เท่ากับ 1 แสดงถึง สภาวะการสกัดนั้นได้รับความพึงพอใจรวมสูงสุด



รูปที่ ก.4 การหาค่าตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดอินนูลินด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน (y = ตัวแปรตาม, D = ค่าพึงพอใจโดยรวม)



รูปที่ ก.5 แผนภูมิ Pareto แสดงค่า Standardized effect ของตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดที่มีผลต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัด ปริมาณผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) ($p < 0.05$)



รูปที่ ก.6 กราฟโครงร่าง (A) ปริมาณอินนูลินของสารสกัด; (B) ปริมาณผลผลิตอินนูลิน; (C) ความสามารถในการสกัดอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวัน โดยใช้วิธีการสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction)

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

1. รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Taengsopha, P., Junyusen, T., Moolkaew, P. and Junyusen, P. (2023). Comparative effects of prebiotic addition on the physicochemical and microstructural properties of spray-dried yogurt powder. *Engineering and Applied Science Research* 2023;50(6):657-663

Sonsomboonsuk, S., Junyusen, T., Moolkaew, P., Junyusen, P., Treeamnuk, T., Taengsopha, P., Chatchavanthatri, N., Nawong, S. and Pakawanit, P. (2024). Effects of cooking methods on the physicochemical, textural and microstructural properties of hot salt puffed germinated brown rice. *Journal of Agriculture and Food Research* Volume 15, 101001

2. รายชื่อบทความวิจัยในการประชุมวิชาการ

Taengsopha, P., Junyusen, T., Moolkaew, P. and Junyusen, P. (2024). Enhancement of the extractability of inulin from Jerusalem artichoke tuber using ultrasound-assisted extraction. *SEATUC Symposium 2024*, Shibaura institute of technology, Tokyo, Japan, 27-28 Feb 2024.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายพีรวัฒน์ แดงโสภา เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2542 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1- 6 ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา 2 จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563

พ.ศ.2565 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร หลักสูตร วิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

