

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	การศึกษาผลของวิธีการสกัดอินูลินจากผงแก่นตะวัน	91
5.2	การศึกษาผลของการทำบริสุทธิ์ของสารสกัดอินูลิน.....	92
5.3	การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งสารสกัดอินูลิน.....	92
5.4	ข้อเสนอแนะ	93
	รายการอ้างอิง.....	95
	ภาคผนวก.....	107
	ภาคผนวก ก	108
	ภาคผนวก ข.....	115
	ประวัติผู้เขียน	117

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	4
2.1 โครงสร้างทางเคมีของอินนูลิน	5
2.2 ส่วนประกอบของต้นแก่้นตะวัน (A) ลำต้น (Stem) (B) ใบ (Leave) (C) ดอก (Flower) (D) หัว (Tuber)	8
2.3 โครงสร้างของเซลล์พืช	9
2.4 สเปกตรัมเสียง	12
2.5 กระบวนการแคปเวชัน (Cavitation)	13
2.6 โครงสร้างของผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัด (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (A) ผนังเซลล์พืชหลังจากการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง	14
2.7 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (A) อ่างคลื่นเสียงความถี่สูง (B) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบคัพฮอร์นและ (C) คลื่นเสียงความถี่สูงแบบโพรบ	15
2.8 ฟังก์ชันในเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	17
2.9 ตัวอย่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบซึ่งมีประจุบวกในเมทริกซ์	18
2.10 (a) แผนภาพเฟสความดัน-อุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์ในระบบปิดและ (b) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง	24
3.1 การเตรียมผงแก่้นตะวันสำหรับงานวิจัย	28
3.2 ภาพการดำเนินการทำให้แห้งหัวแก่้นตะวันด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง	29
3.3 ภาพการดำเนินการบดหัวแก่้นตะวันแห้งด้วยเครื่องบดละเอียดแบบหัวค้อน	29
3.4 ภาพการดำเนินการร่อนแยกขนาดด้วยเครื่องร่อนและตะแกรงร่อน	30
3.5 แสดงขั้นตอนการสกัดสารอินนูลินจากผงแก่้นตะวัน	32
3.6 ภาพการดำเนินการสกัดสารอินนูลินด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	32
3.7 ภาพการดำเนินการสกัดสารอินนูลินด้วยเครื่องคลื่นเสียงความถี่สูง	33
3.8 ภาพการดำเนินการแยกสารสกัดอินนูลินออกจากกาก (Residue) ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง	33

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
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
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)
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
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
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)
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

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)	