

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การผลิตผงอินนูลินจากหัวแก่้นตะวันสามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตหลัก ๆ ออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การสกัดอินนูลินจากหัวแก่้นตะวัน การทำให้สารสกัดมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และการทำแห้งเพื่อให้ได้ผงอินนูลิน โดยทั้ง 3 ขั้นตอนนี้มีผลต่อปริมาณผลผลิตและคุณภาพของผงอินนูลิน โดยในส่วนของผลการวิจัยในบทนี้ได้แบ่งผลการศึกษาดังกล่าวออกเป็น 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 ($p>0.05$) ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ 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) ค่าความเป็นกรด่าง (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 ปริมาณเถ้าของสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 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 มีผลทำให้ความสามารถในการสกัดเถ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

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).

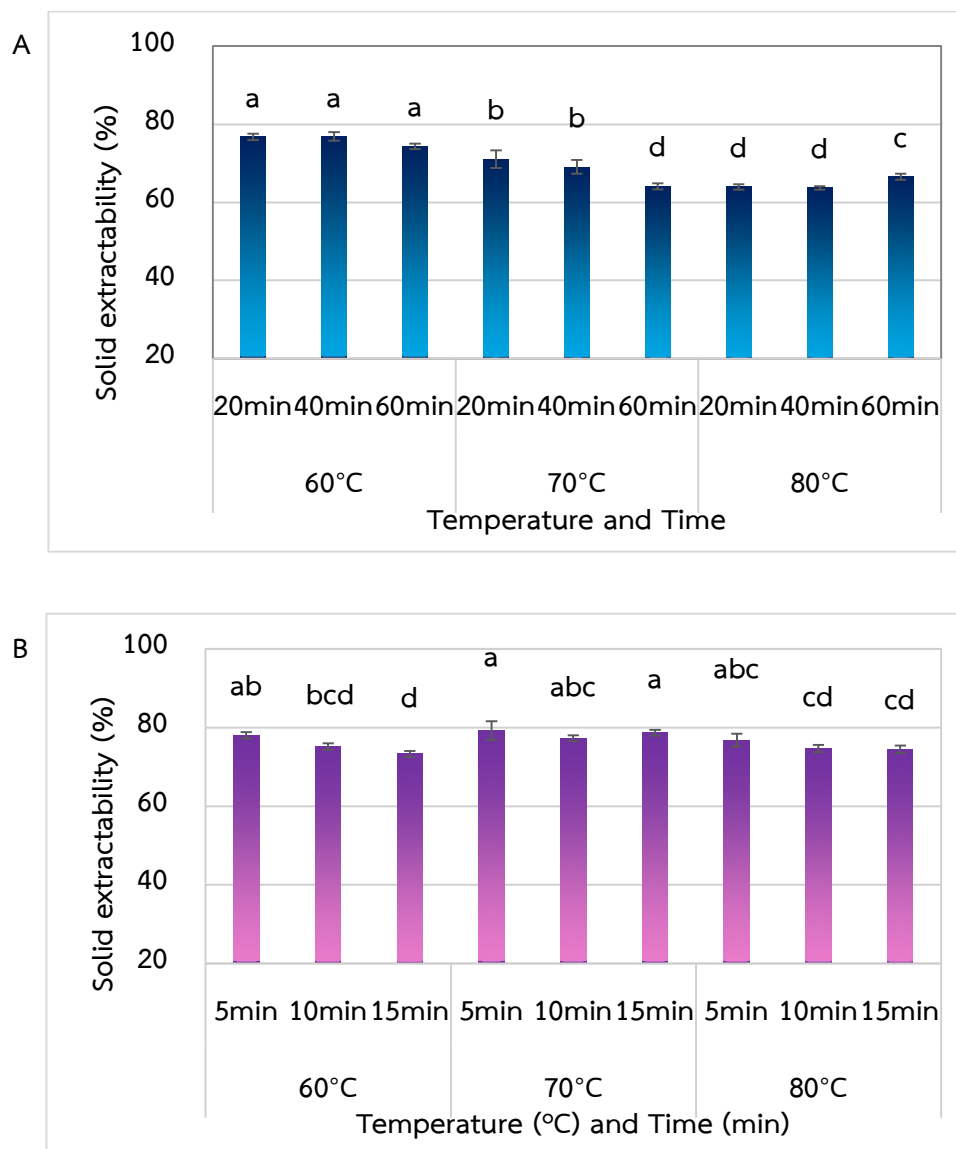
เมื่อเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วย HW-extraction และการสกัดด้วย UAE-extraction ต่อปริมาณของเถ้าของสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้า สามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UAE-extraction) มีปริมาณเถ้าในสารสกัดและความสามารถในการสกัดเถ้าต่ำกว่า วิธีการสกัดด้วย HW-extraction ทั้งนี้อาจเนื่องจาก UAE-extraction 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

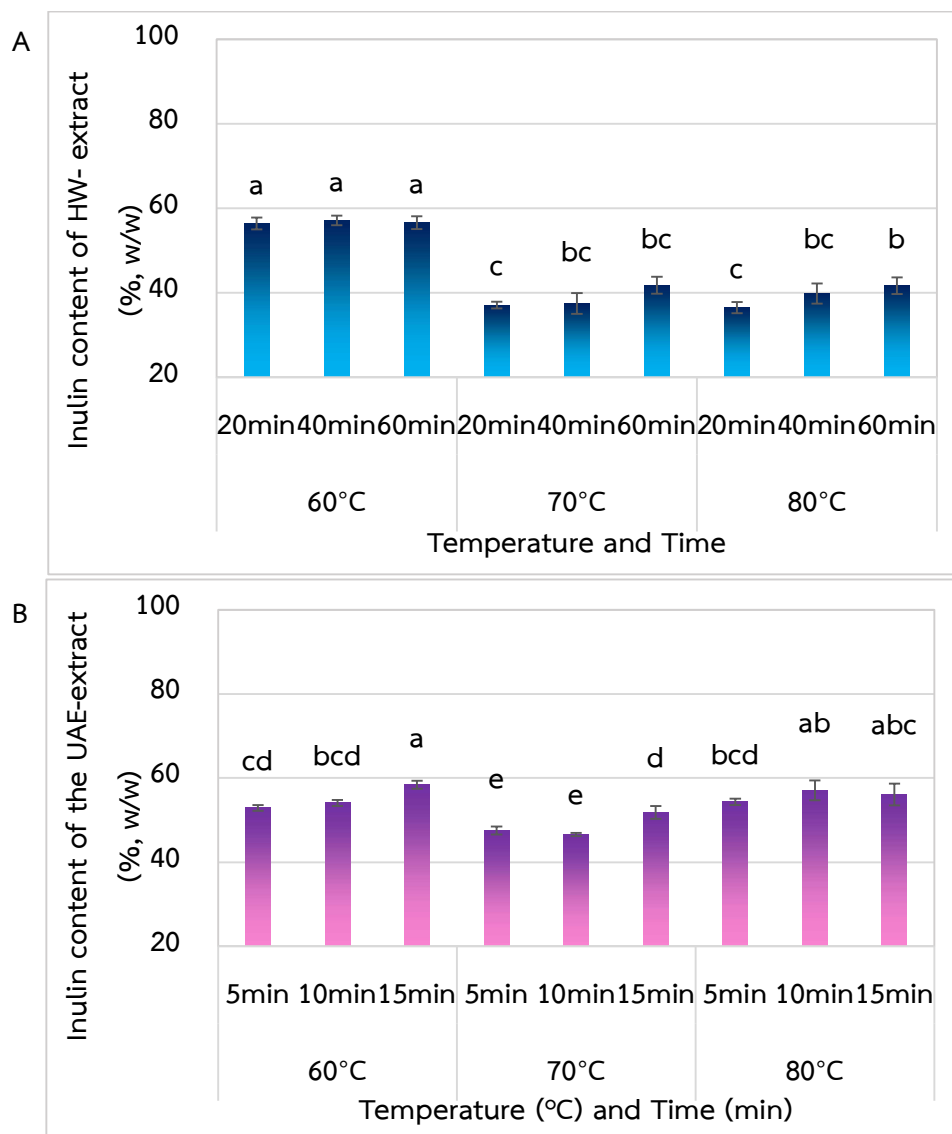
รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงปริมาณอินนูลินของสารสกัด (Inulin content) ปริมาณผลผลิตอินนูลิน (Inulin yield) และความสามารถในการสกัดอินนูลิน (Inulin extractability) จากการสกัดผงแก่นตะวันด้วยวิธี HW-extraction และการสกัดด้วย UAE-extraction

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 ($p < 0.05$)

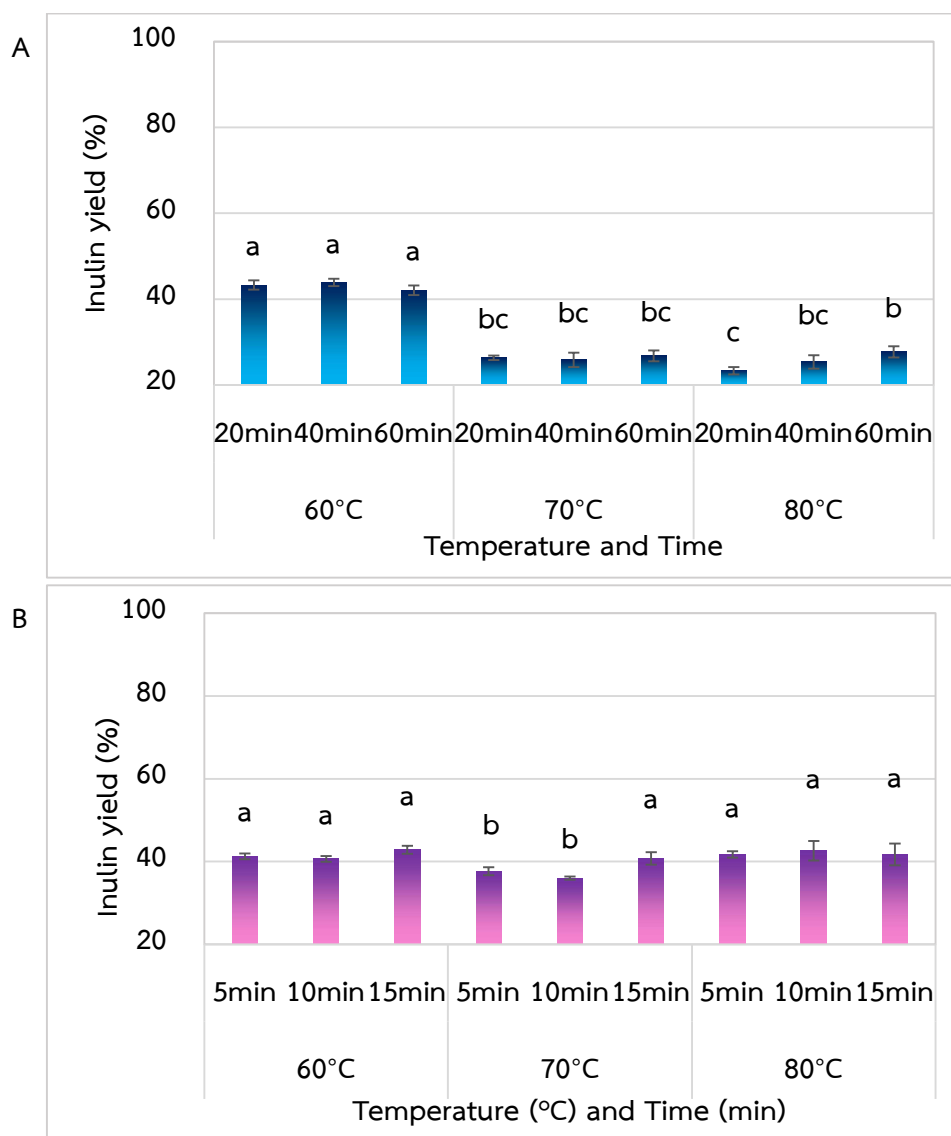
รูปที่ 4.2 B แสดงปริมาณอินนูลินที่ได้จากการสกัดโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) อยู่ในช่วง 46.53 – 58.23% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Redondo-Cuenca et al. (2021) ที่พบว่า ปริมาณอินนูลินจากการสกัดผงแก่นตะวัน และซีโครีอยู่ที่ 54.57% และ 54.16% ตามลำดับ ในรูปที่ 4.3 B แสดงผลผลิตอินนูลินที่ได้จากการสกัดด้วย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

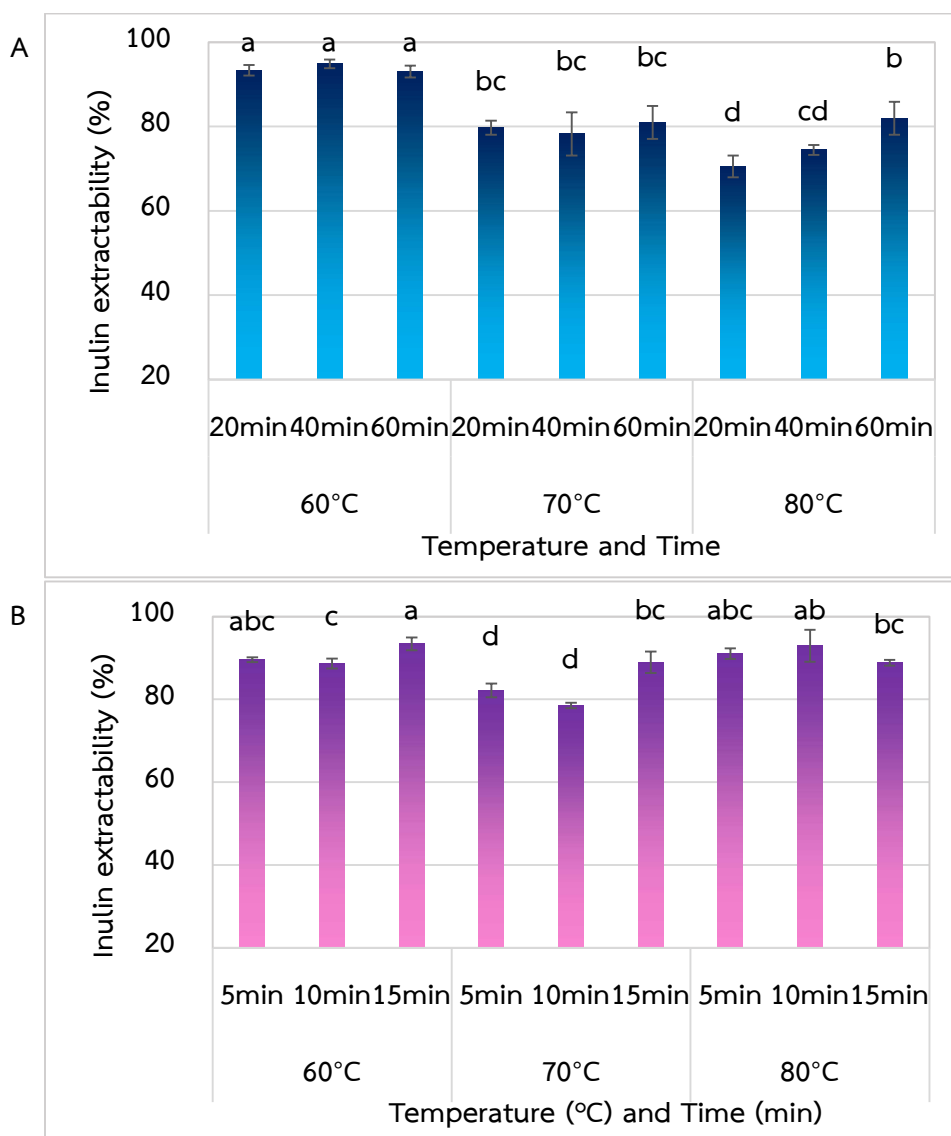
ในงานวิจัยนี้ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 10 min เป็น 15 min ที่อุณหภูมิในการสกัด 70°C ทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัด 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) ต่อปริมาณผลผลิตอินนูลินในสารสกัด (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

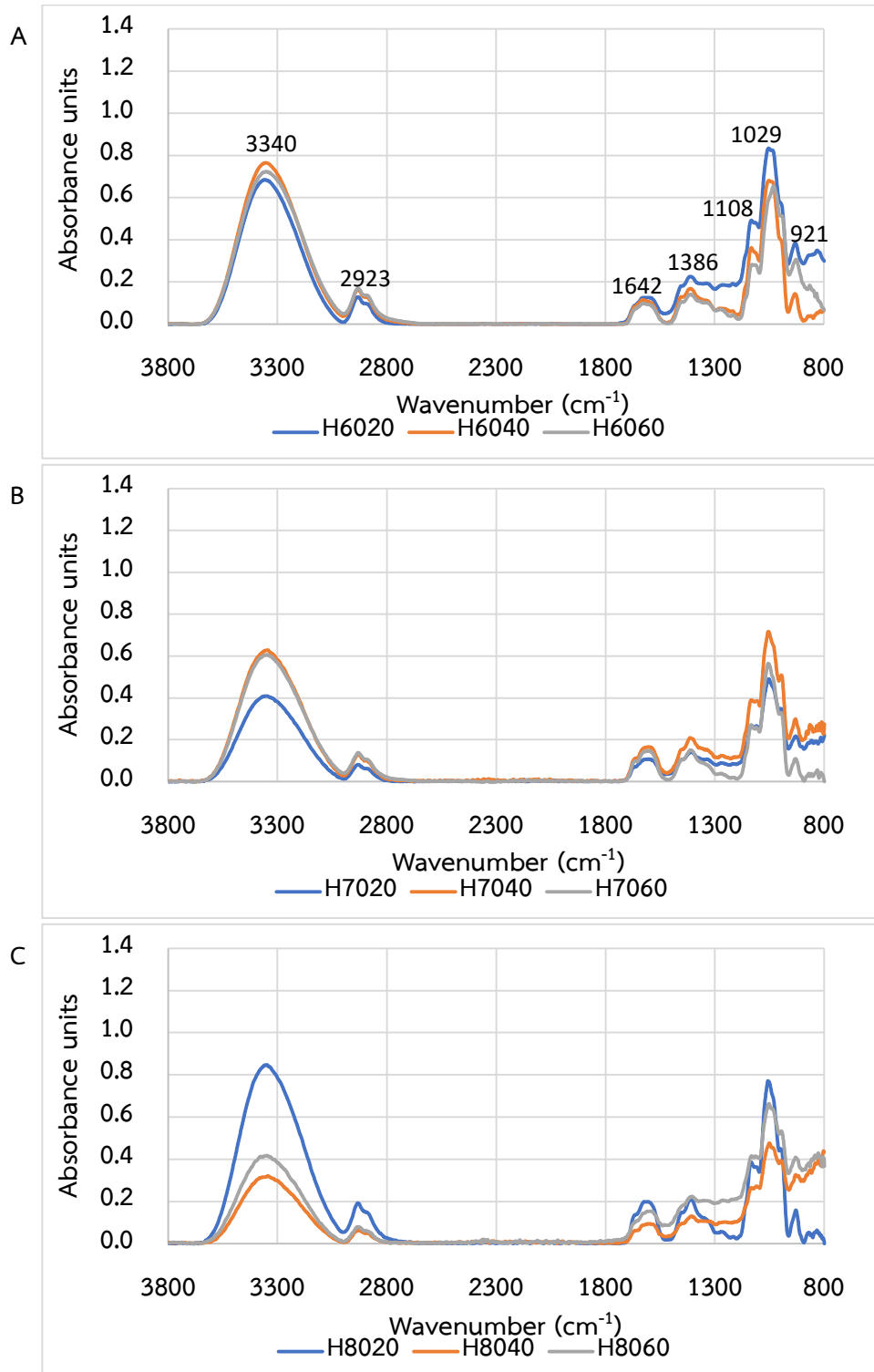
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 60°C เป็น 70 และ 80°C ด้วย HW-extraction ส่งผลให้ปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มระยะเวลาในการสกัด (HW-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอินนูลิน ผลผลิตอินนูลิน และความสามารถในการสกัดอินนูลิน อย่างไรก็ตาม การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิ 60°C การเพิ่มระยะเวลาการสกัดจาก 5 min เป็น 15 min มีผลทำให้ปริมาณอินนูลินในสารสกัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญในการสกัดอินนูลินด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำร้อน (HW-extraction) แต่ระยะเวลาในการสกัดเป็นตัวแปรต้นที่สำคัญต่อปริมาณอินนูลินของสารสกัดด้วยด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (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

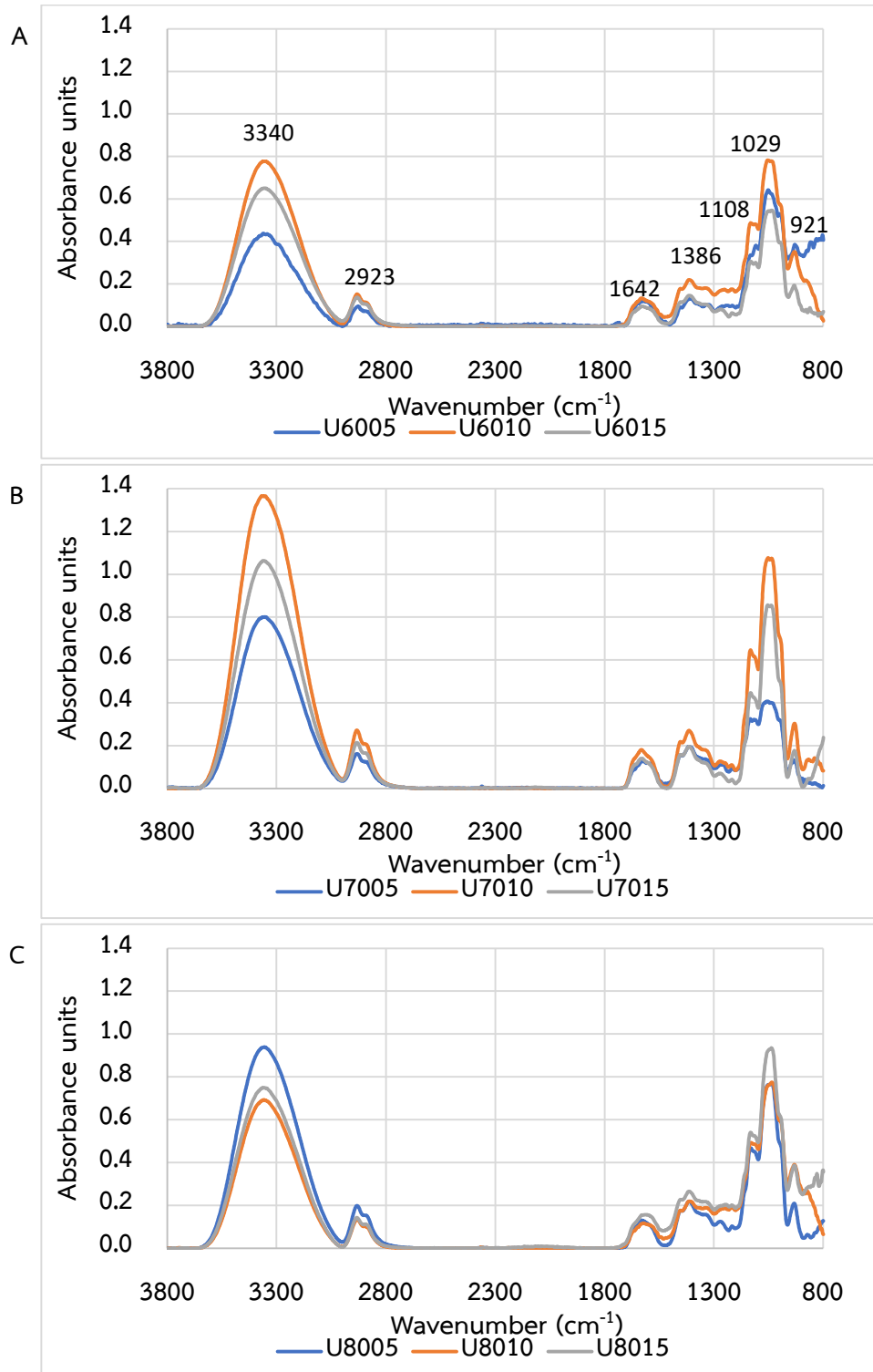
งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared absorption, IR) เพื่อศึกษาการสั่นของพันธะเคมีในโมเลกุล ทั้งการสั่นแบบยืด (Stretching) และการสั่นแบบงอ (Bending) โดยการศึกษาการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดที่ความถี่เลขคลื่น (Wavenumber) เฉพาะสามารถบ่งบอกชนิดของหมู่หน้าที่ (Functional group) ในโครงสร้างของสารอินทรีย์ได้ การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงแกล่นตะวัน 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

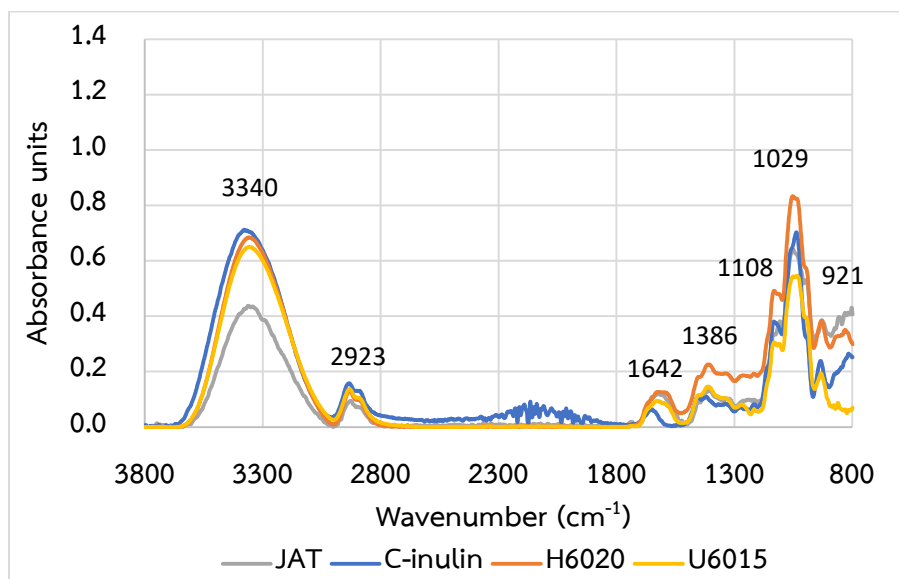
20, 40 และ 60 min และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสกัด (UAE-extraction) ที่อุณหภูมิในการสกัดเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และระยะเวลาในการสกัด 5, 10 และ 15 min ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3800 – 800 cm^{-1} พบว่าสเปกตร้า SR-FTIR ของสารสกัดจากวิธี HW-extraction และ UAE-extraction ที่อุณหภูมิและระยะเวลาการสกัดที่ต่างกัน มีลักษณะโดยรวมคล้ายกันและมีพีคการดูดกลืนที่ชัดในเลขคลื่น 3340, 2923, 1642, 1386, 1108, 1029 และ 921 cm^{-1} อย่างไรก็ตาม ความเข้มของการดูดกลืนที่บางตำแหน่งของเลขคลื่นมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของหมู่น้ำที่ทางเคมีต่าง 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 สเปกตรา 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



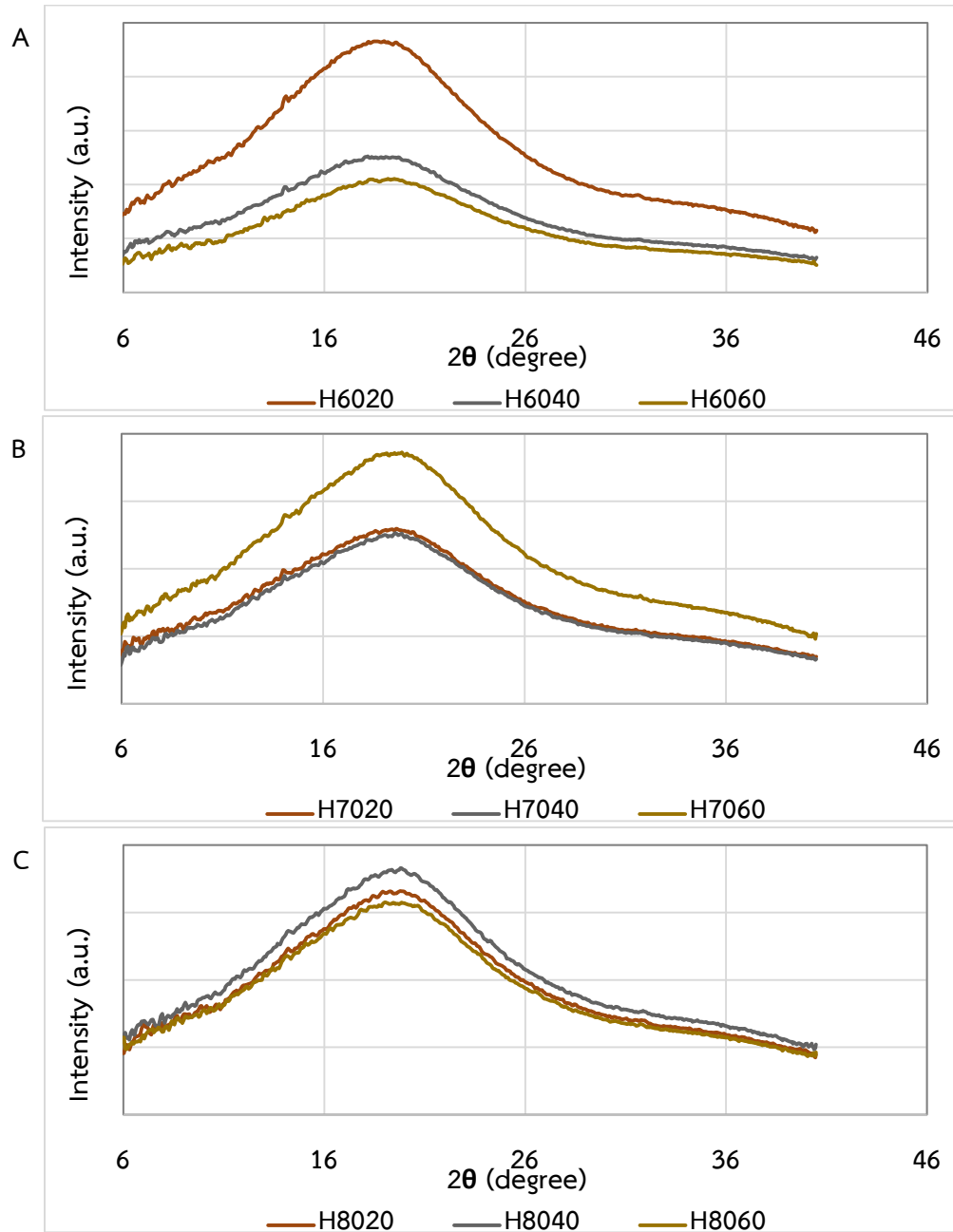
รูปที่ 4.7 สเปกตร้า SR-FTIR ของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) ผงสารสกัดด้วย HW-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 20 min, H6020) และผงสารสกัดด้วย UAE-extraction (อุณหภูมิ 60°C นาน 15 min, U6015)

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

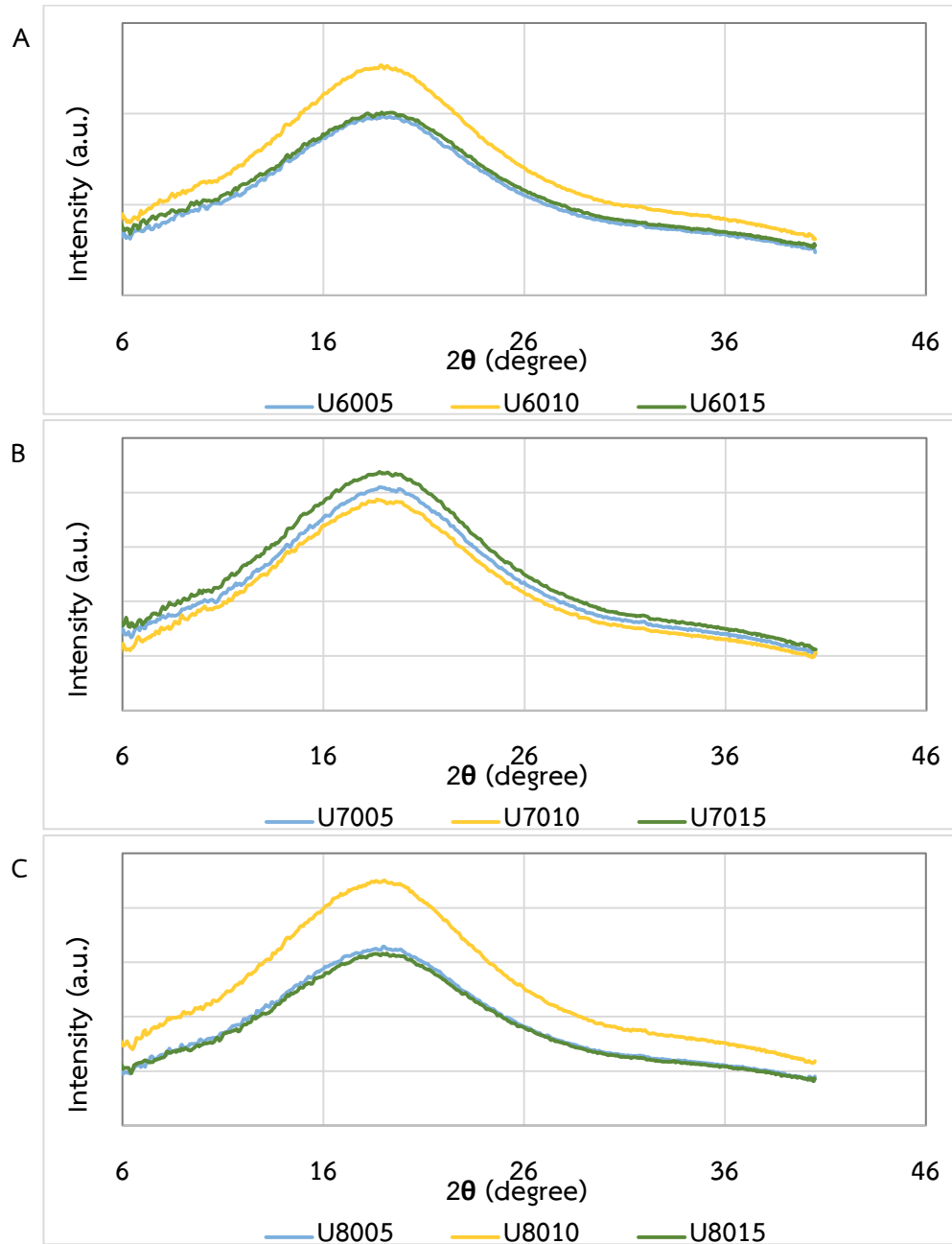
วิเคราะห์ปริมาณอินนูลินด้วยวิธีการเคมี (โดยชุดทดสอบ Fructan Assay Kit) สามารถให้ข้อมูลเชิงปริมาณที่แม่นยำได้

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกของผงอินนูลินด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์

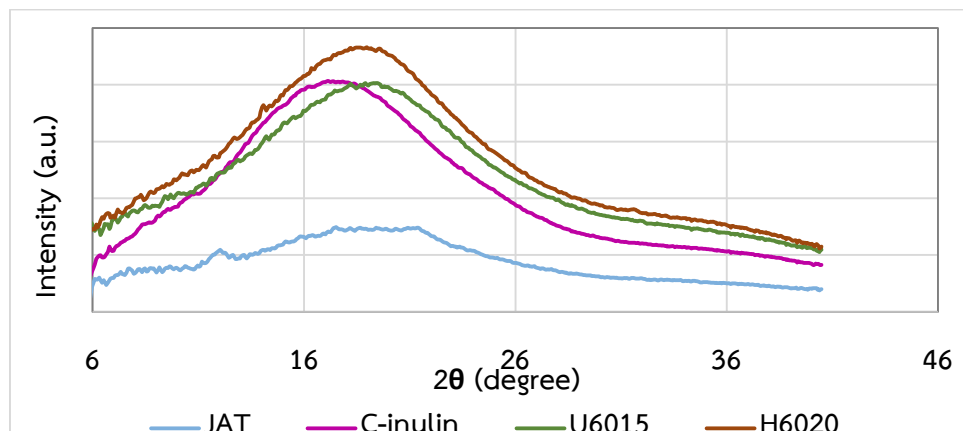
งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของผงแก่นตะวัน ผงอินนูลินทางการค้า และผงสารสกัดอินนูลิน ด้วยแสงซินโครตรอนกับเทคนิคการกระเจิงรังสีเอกซ์มุมกว้าง ((Synchrotron-radiation-based wide angle X-ray scattering, SR-WAXS) โดยการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกช่วยบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างภายในของแต่ละตัวอย่างได้ในรูปที่ 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



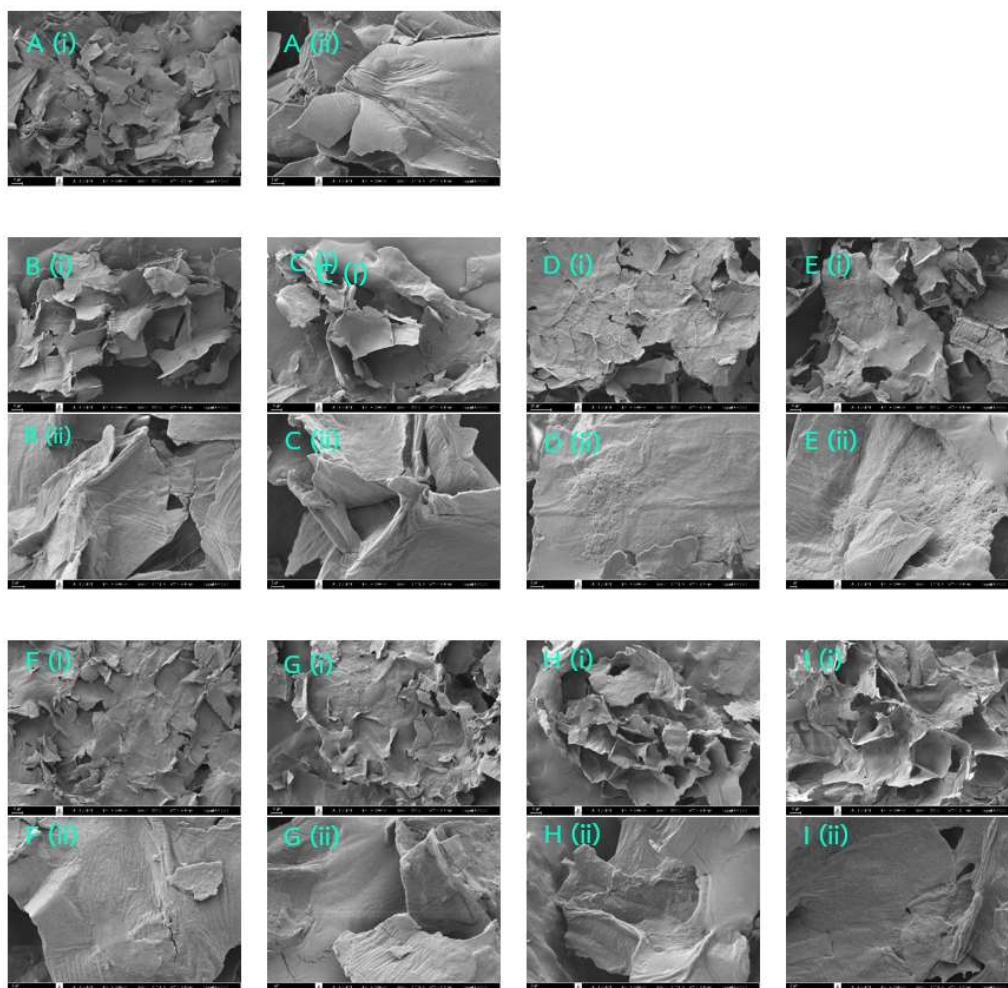
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของสารสกัดด้วย UAE-extraction (A) อุณหภูมิ 60°C (B) อุณหภูมิ 70°C (C) อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาการสกัดนาน 5, 10 และ 15 min



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) ของปรากฏการณ์แคปพิเทชัน (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) ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) 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 หลังการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินชนิด 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.

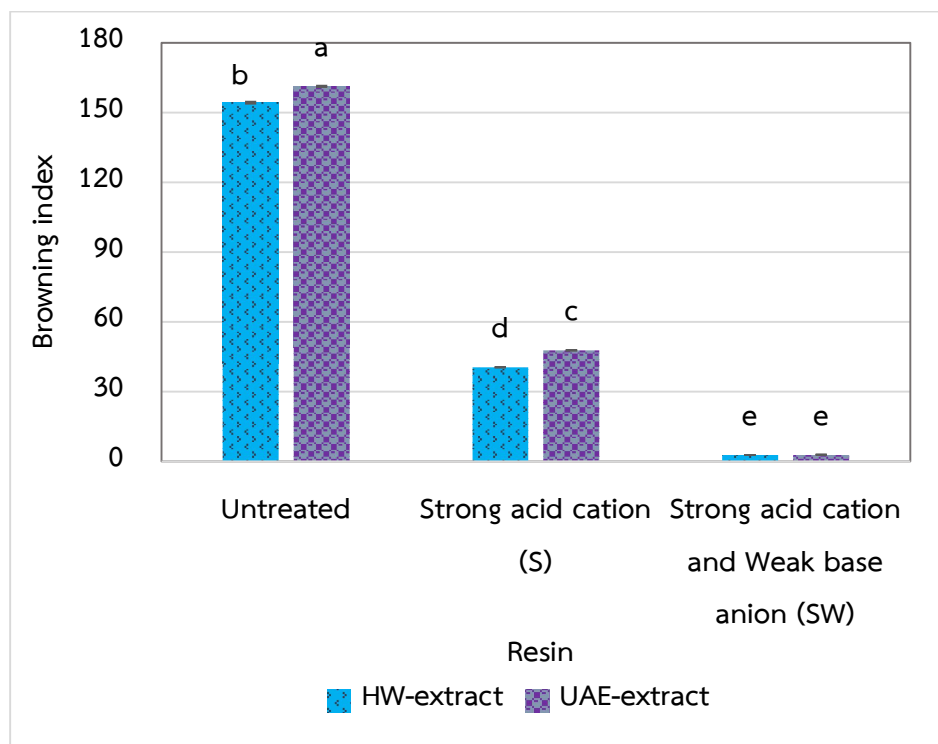
TSS และปริมาณของแข็งของสารสกัด H6020-U และ U6015-U (ไม่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออน) มีค่า 15.08 และ 15.07°Brix และ 16.68 และ 16.15% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) หลังผ่านการทำบริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด Strong acid cation ค่า TSS และปริมาณของแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยค่า TSS ลดลงเป็น 5.05 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 ผงอินูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยมีค่าความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นที่อัดตัวสูงกว่า ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงขนาดอนุภาคของผงอินูลินที่เล็กลง 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 ของผงอินูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (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 ผงอินูลินที่ได้จากการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง (FH6020-SW และ FU6015-SW) และแบบพ่นฝอย (SH6020-SW และ SU6015-SW) มีความสามารถในการไหลระหว่างต่ำถึงต่ำมาก โดยเฉพาะ FH6020-SW ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผงอินูลินสามารถดูดความชื้นได้ดีเป็นผลทำให้ความสามารถในการไหลต่ำ ทั้งนี้การสารเติมตัวพา เช่น มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin) อาจช่วยทำให้ผงอินูลินมีความคงตัวและความสามารถในการไหลที่ดีขึ้น (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

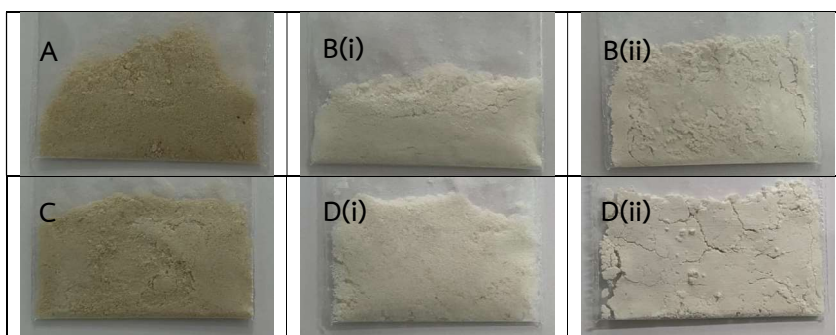
^{1,2} The values represent as the means of three replicates ± standard deviations. Different lowercase letters within the same row indicate statistically significant differences between treatments (p<0.05). FH6020-SW and FU6015-SW denote freeze-dried inulin powders after hot water extraction (H6020) 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 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าขนาดของอนุภาคมีผลต่อดัชนีความขาวของผง โดยขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้ผงมีความขาวมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ดัชนีความขาวของผงอินนูลินต่ำกว่าของ Díaz et al. (2022) ซึ่งมีดัชนีความขาวของผงอินนูลินที่สกัดได้จากหัวแก่นตะวันอยู่ระหว่าง 61.5 – 67.3 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการผลิตและชนิดของเรซินที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Rubel et al. (2018) รายงานว่า ผงอินนูลินที่สกัดได้จากหัวแก่นตะวัน เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า ผงมีขนาดอนุภาคเล็กและมีลักษณะเป็นผงสีขาวที่สามารถสังเกตได้ด้วยสายตา ขณะที่ผงอินนูลินที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีลักษณะผงที่ยึดเกาะกันเป็นกลุ่ม และเมื่อสังเกตด้วยสายตาสังเกตเห็นว่าผงอินนูลินที่ได้มีสีออกน้ำตาลเล็กน้อย

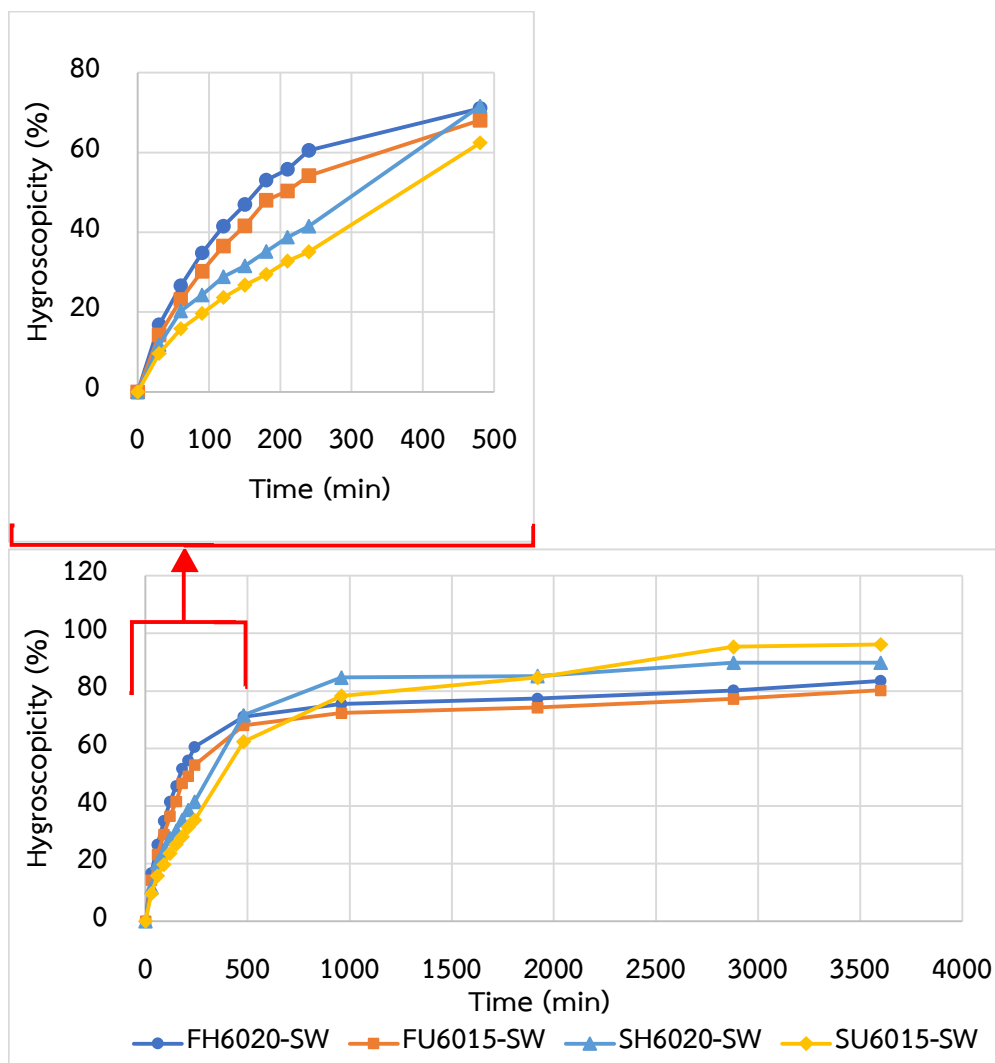
ความสามารถในการละลายของผง (Solubility) ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ผงควรจะเปียกและละลายได้เร็วโดยไม่มีการเกิดการจับตัวเป็นก้อน Taengsopha et al. (2023) กล่าวว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคส่งผลให้ความสามารถในการละลายและการไหลของผงดีขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการละลายของผงอินนูลินทั้ง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

Tontul and Topuz (2017) รายงานว่า ความสามารถในการดูดความชื้น (Hygroscopicity) แสดงถึงความสามารถของผงในการดูดซับความชื้นจากสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ความสามารถในการดูดความชื้นของผงอินนูลินที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (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

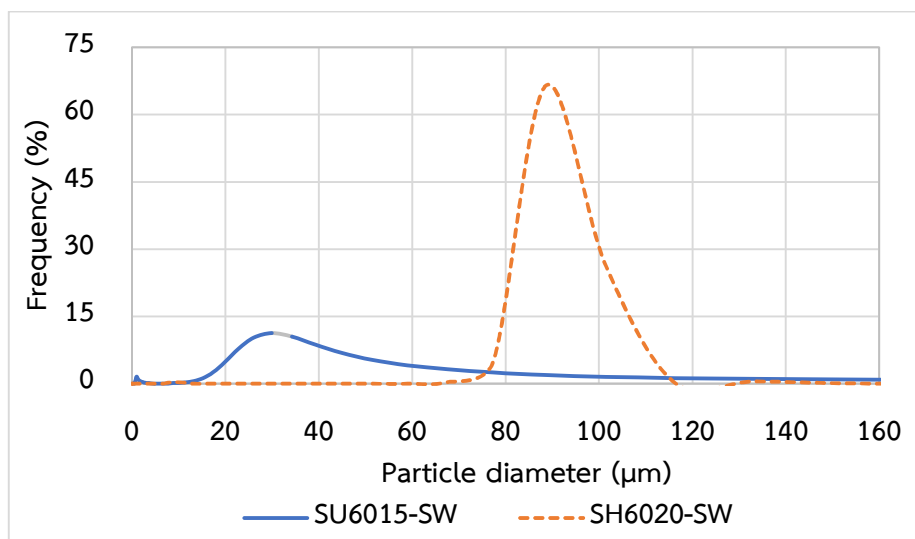
Tontul และ Topuz (2017) รายงานว่า ชนิดและความเข้มข้นของสารตัวพา (Carrier agent) รวมถึงความหนืดของสารตั้งต้นมีผลต่อขนาดของอนุภาคผง โดยที่ความเข้มข้นสูงขึ้นและความหนืดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขนาดอนุภาคส่งผลให้ความสามารถในการละลายและการไหลของผงดีขึ้น (Koc et al. 2014; Taengsopha 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

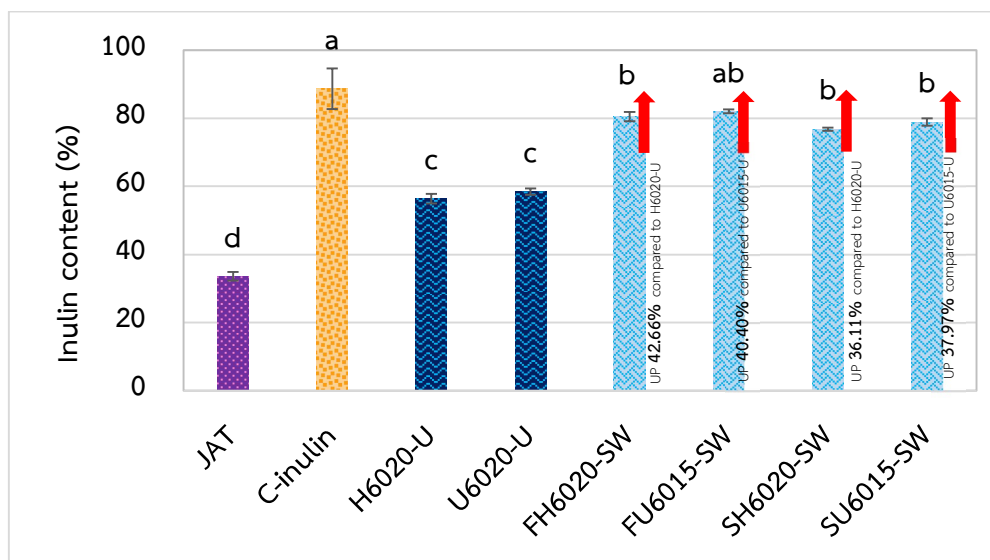
4.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณอินนูลิน

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%

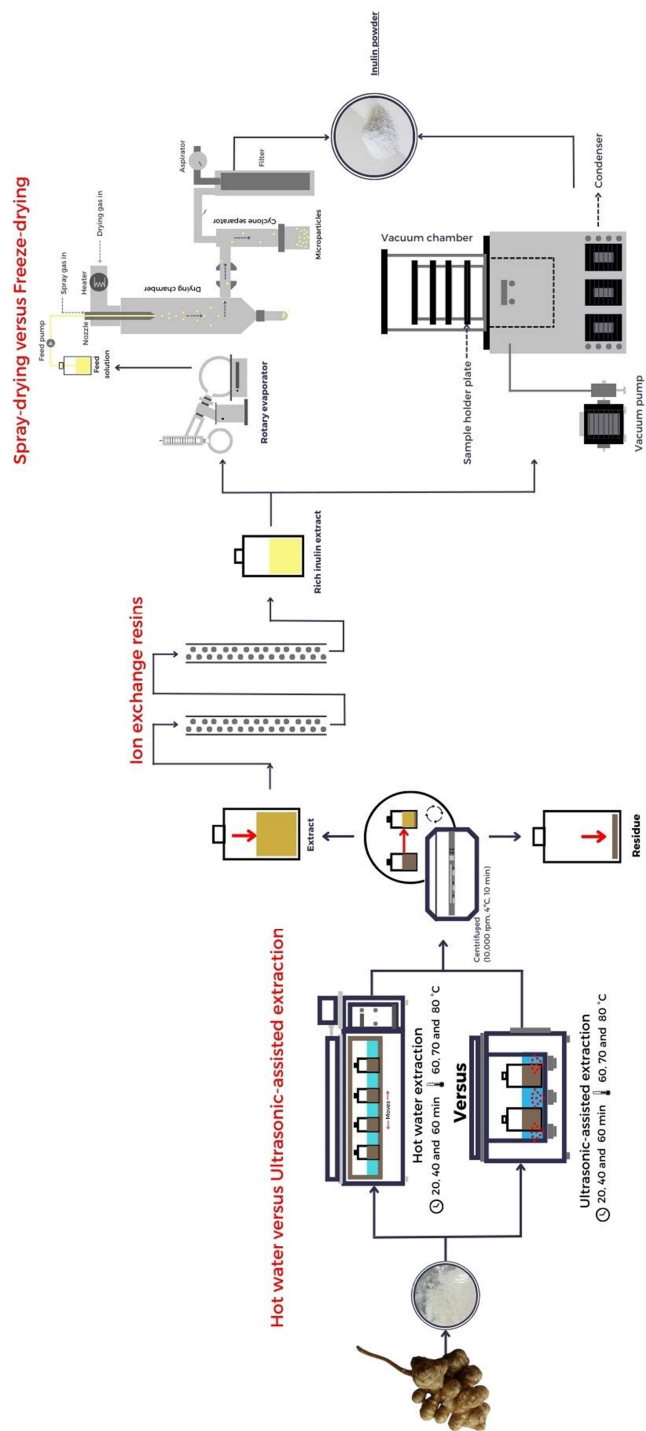
ปริมาณผลผลิตทั้งหมดที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและแบบพ่นฝอยของ FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW และ SU6015-SW มีค่า 6.38%, 6.87%, 2.89% และ 3.18% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) เมื่อเทียบกับผงแก่่นตะวันเริ่มต้น เมื่อคำนวณปริมาณผลผลิตอินนูลินทั้งหมด (Total inulin yield) ของ FH6020-SW, FU6015-SW, SH6020-SW 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

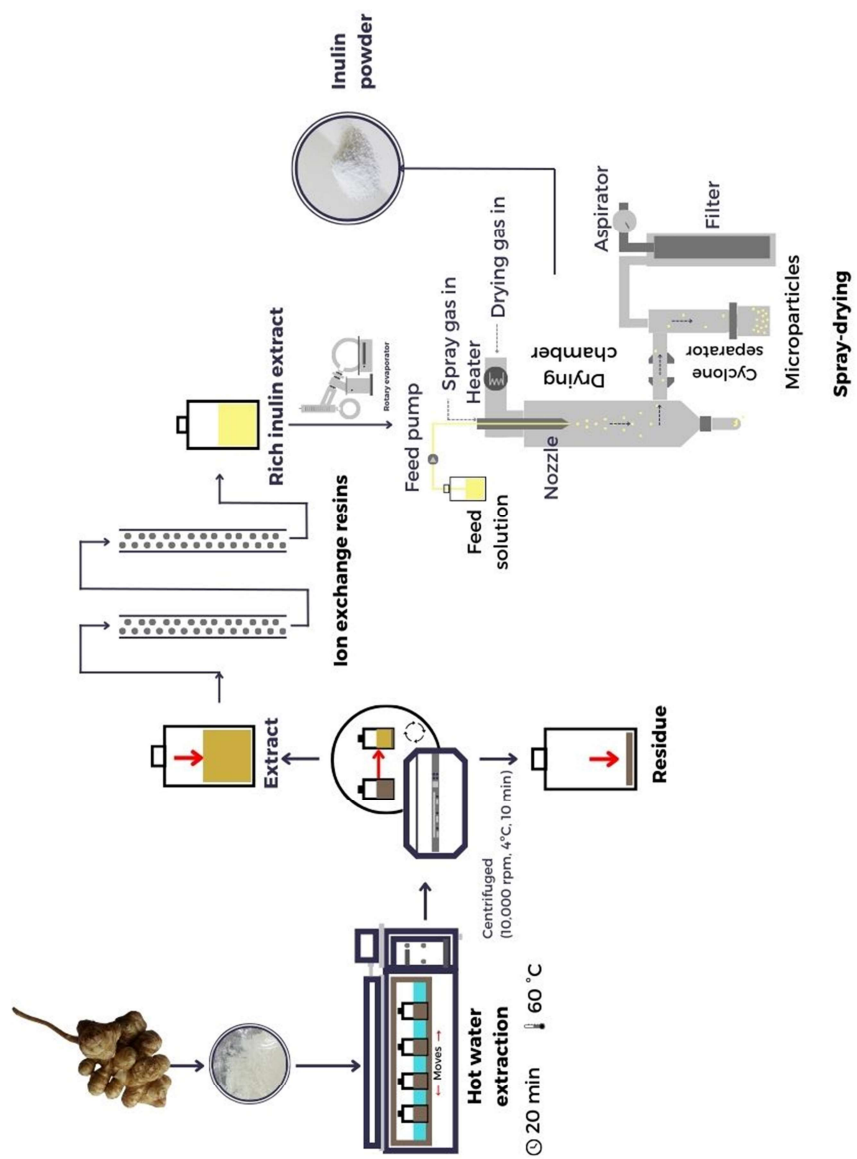


รูปที่ 4.17 ปริมาณอินนูลินของผงแก่นตะวัน (JAT) อินนูลินทางการค้า (C-inulin) อินนูลินจากผงสารสกัดด้วยน้ำร้อน (H6020-U) อินนูลินจากผงสารสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (U6015-U) อินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านเรซินและทำแห้งแบบแช่เยือก (FH6020-SW และ FU6015-SW) และอินนูลินจากสารสกัดที่ผ่านเรซินและทำแห้งแบบพ่นฝอย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

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



รูปที่ 4.18 ขั้นตอนในการวิจัยกระบวนการผลิตอินูลินจากหัวแ่ก่นตะวัน



รูปที่ 4.19 กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตอินูลินจากหัวแค้นตะวัน