



อิทธิพลของชนิดน้ำตาลต่อกระบวนการออสโมซิสของมะม่วง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของชนิดน้ำตาลต่อกระบวนการออสโมซิสของมะม่วง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF TYPE OF SUGAR ON OSMOTIC DEHYDRATION PROCESS OF
MANGO



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021
Copyright of Silpakorn University

| | |
|----------------------|--|
| หัวข้อ | อิทธิพลของชนิดน้ำตาลต่อกระบวนการออสโมซิสของมะม่วง |
| โดย | นางสาวคณางค์ ลิขิตวิวัฒน์ |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีอาหาร แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(อาจารย์ ดร. สุภาภรณ์ คล้ายเครือญาติ)



60403202 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : ซูโครส, กลูโคส, ฟรุคโตส, ไฮโคส, การแพร่

นางสาว คคนางค์ ลิขิตวิวัฒน์: อิทธิพลของชนิดน้ำตาลต่อกระบวนการออสโมซิสของมะม่วง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกชนิดเดียวที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix ไปยังชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้นโดยใช้น้ำตาล 4 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ และน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไฮโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมาศึกษาการแพร่ของน้ำตาล และการศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไฮโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม โดยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่นำมาเปรียบเทียบในการศึกษานี้ ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และฟรุคโตส ในสารละลายผสมที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ในการศึกษาจะใช้มะม่วงแก้วขมิ้นที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix เตรียมชิ้นมะม่วงให้มีขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร นำชิ้นมะม่วงแต่ละชิ้นซึ่งน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำชิ้นมะม่วงแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดที่ 24 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาการแพร่ของสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด และสุ่มตัวอย่างขึ้นมาทุกๆ 30 นาที ซึ่งน้ำหนัก วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำตาล เพื่อนำค่าที่ได้มาหาปริมาณน้ำในชิ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) และปริมาณของแข็งในชิ้นมะม่วงแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Peleg's พบว่า การแพร่ของน้ำตาลฟรุคโตส กลูโคส และไฮโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้นได้เร็วกว่าสารละลายน้ำตาลซูโครส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ สำหรับทุกสภาวะ โดยสารละลายน้ำตาลฟรุคโตส และสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำตาลฟรุคโตสสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วที่สุด เนื่องจากเป็นน้ำตาลที่พบมากในมะม่วงแก้วขมิ้น ถัดมาเป็นสารละลายน้ำตาลไฮโคส หรือสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำตาลไฮโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีความสัมพันธ์กับน้ำตาลฟรุคโตสเป็นอีพิเมอร์ (Epimer) กัน ในส่วนของปริมาณน้ำตาลไฮโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตส ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม เมื่อมีการผสมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเข้าไปในระบบจะช่วยลดระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ และน้ำตาลไฮโคสสามารถแพร่เข้าไปในชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้นได้มากกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นเพียงเล็กน้อยสำหรับทุกสภาวะ



60403202 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : Sucrose, Glucose, Fructose, Psicose, diffusion

MISS KAKANANG LIKITWIWAT : EFFECT OF TYPE OF SUGAR ON OSMOTIC DEHYDRATION PROCESS OF MANGO THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D.

The objective of this research was to study the diffusion behaviors (diffusion property and diffusion time) of sugar in osmotic dehydrated mango prepared with different osmotic solutions. Four types of sugar including sucrose (disaccharide), glucose, fructose and psicose which are monosaccharide were used to prepare single osmotic solutions at concentration of 30, 40 and 50°Brix. In addition, mixed solutions of sucrose and monosaccharides at 10, 20, 30% sucrose substitution were also prepared at 30°Brix. Mangoes cv. Keaw Kamin with a total soluble solids (TSS) of 16.5-17.5°Brix were cut into cube shape (2x2x1 cm) and were weight for each piece prior dipping in osmotic solutions. A total of 24 mango cubes were used for each treatment. Mango cubes were immersed in a controlled temperature osmotic solution at 30°C and were taken to determine weight, TSS, moisture content (MC) and individual sugar contents in every 30 min. and subsequently Normalized water content, NWC, and Normalized solid content, NSC, were calculated according to Peleg (Ref.). The results showed that monosaccharides namely glucose, fructose and psicose have higher diffusion rate than sucrose in all conditions. Fructose and osmotic solution contained fructose required shortest time to reach the diffusion equilibrium followed by psicose due to the epimer structure. For the mixed sugar osmotic solutions, it was found that mixing monosaccharides can reduce the equilibrium time. Psicose has slightly higher diffusion rate than other monosaccharides in all conditions

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ต้องกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี ผู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนวความคิดในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบเล่ม วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์จนกระทั่งงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังให้โอกาสในการทำงานใน โครงการวิจัยต่างๆ ทำให้เพิ่มพูนประสบการณ์ในการทำงานมากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาสูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการใช้น้ำตาลไซโคสใน ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเพื่อเพิ่มมูลค่า จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร โดยมีผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี เป็นหัวหน้าโครงการ ดิฉันจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่าน อาจารย์มากที่ให้โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี สมรรถนะสูง รวมทั้งตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุภาภรณ์ คล้ายเครือญาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพมหานคร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ภาริกา รุ่งพิชยพิเชฐ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำ และความรู้ดีๆ สำหรับแนวทางการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ และงานธุรการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ขอขอบคุณพี่ก้อย แท็งค์ ใบเตย เพียง โอ น้องแซนด์ น้องเมย์ น้องดริม น้องมินท์ และหลายๆ ท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ณ ที่นี้ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และมีประสบการณ์ทำงาน ร่วมกันที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบุคคลในครอบครัว สำหรับแรงสนับสนุน กำลังใจที่สำคัญที่สุดในการ การศึกษาเล่าเรียน การทำวิจัย การดำเนินชีวิตที่ดี และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดมา

นางสาว คคนางค์ ลิขิตวิวัฒน์



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ..... | ณ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญภาพ..... | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐาน..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 มะม่วง..... | 4 |
| 2.2 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (Osmotic dehydration)..... | 5 |
| 2.3 น้ำตาล..... | 10 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 17 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 19 |
| 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติก..... | 19 |
| 3.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ..... | 19 |
| 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ..... | 20 |
| 3.4 มะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษา..... | 20 |

| | |
|---|----|
| 3.5 การบ่มมะม่วง | 22 |
| 3.6 วิธีการทดลอง..... | 22 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล..... | 33 |
| 4.1 ผลการศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุล ที่ความเข้มข้นของ สารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลชนิดเดียว.... | 33 |
| 4.2 ผลการศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ใน ระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม | 46 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... | 59 |
| รายการอ้างอิง..... | 60 |
| ภาคผนวก | 64 |
| ประวัติผู้เขียน | 87 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1 ระดับความหวานของน้ำตาลบางชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลซูโครส..... | 14 |
| ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลไซโคส..... | 17 |
| ตารางที่ 3 ข้อมูลของแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา | 21 |
| ตารางที่ 4 การเตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส น้ำหนัก 500 กรัม | 28 |
| ตารางที่ 5 การเตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ความเข้มข้น 30 °Brix น้ำหนัก 500 กรัม..... | 31 |
| ตารางที่ 6 คุณภาพเริ่มต้นของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกชนิดเดียว | 34 |
| ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติจากการสร้างสมการการแพร่ของไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix..... | 37 |
| ตารางที่ 8 ค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส | 37 |
| ตารางที่ 9 คุณภาพเริ่มต้นของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม | 47 |
| ตารางที่ 10 ค่าทางสถิติจากการสร้างสมการการแพร่ของน้ำตาล ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม | 50 |
| ตารางที่ 11 ค่าความหนืดสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส | 50 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 1 การถ่ายเทมวลสารละลายความเข้มข้นสูงไปสารละลายความเข้มข้นต่ำ..... | 7 |
| ภาพที่ 2 โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส (Glucose) | 11 |
| ภาพที่ 3 โครงสร้างของน้ำตาลฟรุกโตส (Fructose)..... | 12 |
| ภาพที่ 4 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส (Sucrose)..... | 13 |
| ภาพที่ 5 ผลิตภัณฑ์ไซรัปที่มีส่วนผสมของน้ำตาลไซโคส..... | 15 |
| ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลฟรุกโตสกับไซโคสที่แสดงตำแหน่ง Epimer กัน..... | 16 |
| ภาพที่ 7 การบ่มมะม่วงที่อุณหภูมิ 21.4 ± 0.1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 72.3 ± 2.2 | 22 |
| ภาพที่ 8 การเตรียมชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด $2 \times 2 \times 1$ เซนติเมตร | 23 |
| ภาพที่ 9 แสดงการวัดสีชิ้นตัวอย่างมะม่วงแก้วขมิ้น | 24 |
| ภาพที่ 10 ขั้นตอนการศึกษาการแพร่ของสารละลายน้ำตาลไปยังชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้น..... | 29 |
| ภาพที่ 11 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และ ซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30°Brix | 38 |
| ภาพที่ 12 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และ ซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 40°Brix | 39 |
| ภาพที่ 13 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และ ซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 50°Brix | 40 |
| สำหรับชิ้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 30°Brix ใน ภาพที่ 14 (ข) จะมี ปริมาณน้ำตาลน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้น ปริมาณ น้ำตาลซูโครสจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 60 นาทีแรกและค่อยๆ ลดลงจนมีปริมาณต่ำสุดที่เวลา 180 นาที ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสจะลดลงจากตัวอย่างเริ่มต้นตั้งแต่เวลา 90 นาทีเป็นต้นไป | 41 |
| ในส่วนของชิ้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายน้ำตาลฟรุกโตสความเข้มข้น 30°Brix ภาพที่ 15 (ค) มี ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้นในช่วง 90 | |

| | |
|--|----|
| นาที่แรก และลดลงมาเพียงเล็กน้อยในช่วงท้าย ส่วนน้ำตาลซูโครสและกลูโคสมีปริมาณเพิ่มขึ้นใน ระยะแรก และลดลงจนคงที่..... | 41 |
| ความสามารถในการแพร่ของน้ำตาลไฮโดรคอสเข้าไปในชั้นมะม่วง สังกัดได้จากชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ใน สารละลายน้ำตาลไฮโดรคอสที่ความเข้มข้น 30 °Brix ภาพที่ 16 (ง) มีปริมาณน้ำตาลไฮโดรคอสเพิ่มขึ้นอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตสมีปริมาณเพิ่มขึ้นใน ระยะแรก และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป | 41 |
| ภาพที่ 17 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุคโตส และ (ง) น้ำตาลไฮโดรคอสที่ความเข้มข้น 30 °Brix..... | 43 |
| ภาพที่ 18 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุคโตส และ (ง) น้ำตาลไฮโดรคอสที่ความเข้มข้น 40 °Brix..... | 44 |
| ภาพที่ 19 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุคโตส และ (ง) น้ำตาลไฮโดรคอสที่ความเข้มข้น 50 °Brix..... | 45 |
| ภาพที่ 20 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไฮโดรคอสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ใน ระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 10 ความเข้มข้น 30 °Brix 51 | |
| ภาพที่ 21 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไฮโดรคอสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ใน ระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 20 ความเข้มข้น 30 °Brix 52 | |
| ภาพที่ 22 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไฮโดรคอสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ใน ระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 30 ความเข้มข้น 30 °Brix 53 | |
| ภาพที่ 23 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ทดแทนน้ำตาล ซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุคโตส และ (ค) ไฮโดรคอส ร้อยละ 10 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix | 56 |
| ภาพที่ 24 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ทดแทนน้ำตาล ซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุคโตส และ (ค) ไฮโดรคอส ร้อยละ 20 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix | 57 |
| ภาพที่ 25 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ทดแทนน้ำตาล ซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุคโตส และ (ค) ไฮโดรคอส ร้อยละ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix | 58 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งมีทั้งนำมาจำหน่ายแบบบริโภคสด และแปรรูป โดยมะม่วงถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น มะม่วงแช่เยือกแข็ง มะม่วงแช่เย็น น้ำมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง ในปี พ.ศ. 2564 มีสถิติการผลิตฝักและผลไม้แช่แข็ง 45,867 ตัน และมีการส่งออกต่างประเทศ 40,674 ตัน นอกจากนี้ยังมีการแปรรูปเป็นฝักและผลไม้อบแห้ง โดยมีสถิติการผลิต 59,126 ตัน และมีการส่งออกต่างประเทศ 51,576 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) ทั้งนี้ในการผลิตมะม่วงอบแห้งนั้นมีการอบแห้งแบบธรรมชาติ และมะม่วงอบแห้งแบบแช่อบแห้ง โดยมะม่วงสายพันธุ์ที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นมะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติ เช่น มะม่วงพันธุ์มหาชนก และมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ ในขณะที่มะม่วงโชคอนันต์ และมะม่วงแก้วขมิ้น (Khuwijitjaru, Somkane, Nakagawa, & Mahayothee, 2022) นิยมนำมาแปรรูปเป็นมะม่วงแช่อบแห้ง ทั้งนี้ในการแช่อบแห้งนั้น โดยทั่วไปในประเทศไทยมีการใช้ระดับความหวานที่แตกต่างกัน โดยการแช่อบแห้งนี้เป็นการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส (osmosis) ซึ่งสารละลายออสโมติกที่นิยมใช้จะเตรียมจากสารละลายน้ำตาล ทั้งนี้ความเข้มข้นของน้ำตาลสัมพันธ์กับระดับความหวานของผลิตภัณฑ์

ในการเตรียมสารละลายออสโมติกสำหรับการแช่อบแห้งก่อนการทำแห้งเตรียมจากน้ำตาลหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตส ซึ่งน้ำตาลแต่ละชนิดมีมวลโมเลกุลที่ต่างกัน แต่ให้ค่าพลังงาน 4 กิโลแคลอรีเท่ากัน ซึ่งความเข้มข้นที่มีการใช้จะมีตั้งแต่ 30 – 70 °Brix (García-Segovia, Mognetti, Andrés-Bello, & Martínez-Monzó, 2010) นอกจากนี้เพื่อลดพลังงานก็มีการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ลงในผลิตภัณฑ์ (Cichowska, Figiel, Stasiak-Rozanska, & Witrowa-Rajchert, 2019) ได้ศึกษากระบวนการออสโมซิสที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสในสูตร และมีการน้ำตาลชนิดอื่นเพื่อลดแคลอรีของผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมหรือทดแทนด้วยสารให้ความหวานซึ่งเป็นทางเลือกอื่นนอกจากน้ำตาลซูโครส เช่น การเติมหญ้าหวาน การเติมน้ำตาลแอลกอฮอล์ หรือการเติมน้ำตาลชนิดอื่นที่ให้แคลอรีต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม น้ำตาลแอลกอฮอล์ส่งผลเสียต่อรสชาติ ทำให้เสียรสชาติของผลิตภัณฑ์แบบธรรมชาติไป

จากการศึกษาการแพร่ของน้ำตาล (El-Aouar, Azoubel, Barbosa, & Xidieh Murr, 2006) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งแบบออสโมติกในมะละกอโดยใช้น้ำตาล 2 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส และ ไซรัปข้าวโพด เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่า weight reduction (WR), water loss (WL) และ solid gain (SG) พบว่ามะละกอที่แช่ในสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลซูโครสให้ค่า WR, WL และ SG สูงกว่าสารละลายออสโมติกที่ใช้ไซรัปข้าวโพด

น้ำตาลไซโคสเป็นน้ำตาลหายากที่ให้พลังงานต่ำ (0.2 กิโลแคลอรี) ในขณะที่ให้คุณลักษณะอื่นๆคล้ายกับน้ำตาลทั่วไป โดยเฉพาะด้านความหวาน มีความหวานเป็นร้อยละ 70 ของน้ำตาลซูโครส (SAVANNA Ingredients GmbH, Germany) ปัจจุบันได้มีการผลิตในเชิงการค้าทั้งในรูปแบบไซรัป และผงและมีความแพร่หลายในการใช้ในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น โยเกิร์ต นม พุดดิ้ง (Mijailovic, Nesler, Perazzoli, Ait Barka, & Aziz, 2021) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำตาลไซโคสมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์แช่อิ่ม

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการประยุกต์ใช้น้ำตาลหายากในผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง จึงยังไม่มีการศึกษาสมบัติการแพร่ รวมไปถึงการใช้น้ำตาลหายากร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ ในการเตรียมสารละลายออสโมติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสในระหว่างกระบวนการออสโมซิสของชิ้นมะม่วงเปรียบเทียบกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างๆ

1.2.1 ศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกชนิดเดียว

1.2.2 ศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 น้ำตาลแต่ละชนิดมีการแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยน้ำตาลซูโครสมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า ทำให้เข้าสู่สมดุลช้ากว่าน้ำตาลชนิดอื่นเนื่องจากมีแรงดันออสโมติกต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่สูญเสีย และประมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น

1.3.2 น้ำตาลแต่ละชนิดที่ใช้ทดแทนน้ำตาลซูโครสส่งผลต่อการแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกไปยังชิ้นมะม่วง โดยสารละลายออสโมติกที่ทดแทนด้วยน้ำตาลฟรุกโตสซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีมากในมะม่วงเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าสารละลายออสโมติกที่ทดแทนด้วยน้ำตาลชนิดอื่น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 วัตถุดิบที่ใช้คือมะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้นดิบแก่ น้ำหนักต่อผล 550 – 650 กรัม

1.4.2 ทดสอบความบริสุทธิ์ของมะม่วงด้วยการลอย – จมน้ำ และน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยเลือกมะม่วงที่จมน้ำ และลอยในน้ำเกลือมาใช้ในการศึกษา

1.4.3 ชิ้นตัวอย่างมะม่วงที่ใช้ในการศึกษาควบคุมระดับการสุกโดยตรวจสอบค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid, TSS) ที่ 16.5 – 17.5 °Brix และตัดแต่งชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 2×2×1 เซนติเมตร

1.4.4 ตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักผล ค่าสี และคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่า TSS ค่าปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (Titratable acidity, TA) ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำตาลในชิ้นมะม่วง

1.4.5 ศึกษาสมบัติการแพร่และระยะเวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากสารละลายน้ำตาลชนิดเดียวที่ความเข้มข้น 30, 40, 50 °Brix ที่อุณหภูมิ 30 °C

1.4.6 ศึกษาสมบัติการแพร่และระยะเวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากสารละลายน้ำตาลผสมของน้ำตาลซูโครส กับ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลไซโคส ในอัตราส่วนน้ำตาลซูโครส:น้ำตาลชนิดอื่นที่ 90:10, 80:20 และ 70:30 โดยกำหนดให้สารละลายมีค่า TSS เท่ากับ 30 °Brix ที่อุณหภูมิ 30 °C

1.4.7 ตรวจสอบการแพร่เข้าสู่สมดุลโดยวิเคราะห์ค่าการสูญเสีย น้ำ (Water loss) ปริมาณของแข็งที่ได้รับ (Solid gain) ค่า TSS ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดในชิ้นตัวอย่าง และคำนวณจลนพลศาสตร์ของการแพร่

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะม่วง

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นไม้ผลยืนต้นอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและพม่า ซึ่งในปัจจุบันในประเทศไทยมีการปลูกมะม่วงกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่ปลูกไว้บริเวณบ้านไปจนถึงระดับสวนขนาดใหญ่ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศและดินฟ้าอากาศของประเทศไทยเหมาะสำหรับปลูกมะม่วงเป็นอย่างมาก มะม่วงจึงเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทย ซึ่งเป็นที่นิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลายทั้งคนไทยและชาวต่างชาติ (นันทสิทธิ์, 2559) จึงมีการส่งออกต่างประเทศ โดยมีตลาดการส่งออกที่สำคัญอยู่ที่ประเทศญี่ปุ่น ทวีปยุโรป และอเมริกา จะเห็นว่าการส่งออกในปัจจุบันมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้ แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีโอกาสพัฒนาศักยภาพในการผลิตและการตลาดในการส่งออกสูง (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2564) สำหรับการส่งออกมะม่วงจะต้องมีการคัดผลผลิตผลที่มีลักษณะดีสำหรับขนส่งระยะไกล ขนาดและสีส้มเป็นที่ต้องการของตลาด และสำหรับการส่งออกมะม่วงนั้นจึงจำเป็นต้องมีการส่งเสริมการปลูกมะม่วงในพื้นที่ต่างๆ (วังไฉน, 2529) จึงต้องมีการกำหนดดัชนีการเก็บเกี่ยวจากการทดลองเพื่อให้สามารถบอกความแก่อ่อนของผลมะม่วงได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการสังเกตจากมวลของผลเมื่อมีความแก่ที่ผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหรือการนับอายุของผลมะม่วงซึ่งจะเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสามารถวัดความแก่ได้ผลค่อนข้างแน่นอน นอกจากนี้ยังสามารถใช้การลอยจมน้ำบ่งบอกถึงความแก่อ่อนได้ เนื่องจากผลมะม่วงที่มีอายุต่างกันจะมีลักษณะการลอยและจมน้ำไม่เหมือนกัน เพราะมีความถ่วงจำเพาะต่างกัน โดยที่ผลที่แก่จัดมักจะจมน้ำและผลที่อ่อนจะลอยน้ำ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงเมื่อมีอายุมากขึ้น และมีช่วงว่างระหว่างเมล็ดกับเปลือกหุ้มเมล็ดชั้นนอกน้อย อย่างไรก็ตามการใช้ความถ่วงจำเพาะโดยอาศัยการลอยและจมน้ำของผลมะม่วงไม่สามารถใช้ได้กับมะม่วงทุกสายพันธุ์ สำหรับผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ จะนับอายุของผลโดยนับจำนวนวันหลังดอกบานร้อยละ 50 ซึ่งอายุของมะม่วงอยู่ในช่วง 85 – 99 วัน เมื่อทดสอบการลอยและจมน้ำ และลอยและจมน้ำเกลือร้อยละ 1 – 2 พบว่าผลมะม่วงที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80 ลอยน้ำ และผลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 85 จมน้ำ แต่ลอยในน้ำเกลือร้อยละ 1 สำหรับผลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 จมน้ำเกลือร้อยละ 1 แต่ลอยน้ำเกลือร้อยละ 2 ดังนั้นการคัดเลือกความบริสุทธิ์โดยการลอยและจมน้ำ และลอยและจมน้ำเกลือร้อยละ 1 – 2 จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสำหรับเกษตรกรและผู้ซื้อในการนำไปประยุกต์ใช้ (บุญศิริ & ศิริพานิช, 2550) มะม่วงเป็นผลไม้ตามฤดูกาลที่เกิดการเน่าเสียได้ง่ายมาก หลังจากการเก็บเกี่ยวมะม่วงจะสุก

เร็วมาก จึงมีข้อจำกัดในด้านของการขายส่งออกในลักษณะผลสด มะม่วงสายพันธุ์ที่มีความสำคัญทางการค้า ได้แก่ น้ำดอกไม้ แก้ว เขียวสวย และอร่อง เนื่องจากเนื้อสัมผัสมีความแน่นเนื้อมาก และมีผลผลิตตลอดปี โดยที่มะม่วงแก้วเป็นผลิตภัณฑ์หลักในอุตสาหกรรมอาหาร (Mahayothee, 2005) มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีรสหวานเมื่อสุก เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลซูโครสราว 10 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม ฟรุกโตส 3.2 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม และกลูโคส 1.1 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย, 2557) จะเห็นว่าในมะม่วงมีปริมาณน้ำตาลซูโครสมากที่สุด ตามด้วยฟรุกโตส และกลูโคส ตามลำดับ ซึ่งน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดเป็นน้ำตาลที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ

2.1.1 มะม่วงแก้ว

มะม่วงแก้วเป็นมะม่วงพื้นบ้านทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง เป็นพันธุ์ที่นำไปแปรรูปอย่างกว้างขวางมากที่สุด ลำต้นเจริญเติบโตเร็วพุ่มต้นกลมสวยงาม ใบค่อนข้างใหญ่ ใบยาวสีเขียวเข้ม ทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดี ให้ผลดกมาก ขนาดผลเล็กจนถึงขนาดปานกลาง ผลดิบใช้รับประทานอย่างกว้างขวาง มะม่วงแก้วหลายต้นออกทะวายนอกฤดูขายได้ราคาดี เปลือกค่อนข้างหนาและเหนียว ที่ผลมีต่อมน้ำมันใหญ่มองเห็นได้ชัด เมื่อผลดิบผิวเปลือกสีเขียวเข้ม เนื้อสีนวล หยาบ มีเปอร์เซ็นต์แป้งในผลมาก รสเปรี้ยว แต่เมื่อแก่จัดๆมีรสมันอมเปรี้ยว ผลลักษณะกลมป้อมๆ เมื่อสุกผิวเปลือกสีเขียวปนเหลือง สีเนื้อเหลือง ลักษณะเนื้อหยาบ รสออกหวานอมเปรี้ยว เมล็ดใหญ่มีเนื้อในเมล็ดเต็ม นิยมเพาะเป็นต้นตอในการขยายพันธุ์ เพราะเจริญเติบโตเร็ว แข็งแรง ทั้งสามารถต่อต้านได้ดีกับมะม่วงหลายพันธุ์ ให้คุณค่าทางเศรษฐกิจสูงมากทั้งขายผลสุก มีการส่งออกด้วยเช่นกัน และแปรรูปเป็นมะม่วงกวนและมะม่วงแผ่นมากที่สุด ทำมะม่วงดองก็เหมาะสมอย่างยิ่ง เพราะเนื้อผลมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูง เมื่อดองแล้วให้เนื้อแน่นและกรอบอร่อย มะม่วงแก้วมีชื่อเรียกอีกหลายชนิดพันธุ์ตามคุณลักษณะผลและแหล่งปลูกแต่ยังคงเรียกชื่อว่า “แก้ว” นำหน้าอยู่ทุกพันธุ์ เช่น แก้วดำ, แก้วแดง, แก้วขาว, แก้วเขียว, และแก้วจุก (กาญจนพิสุทธิ์, 2547)

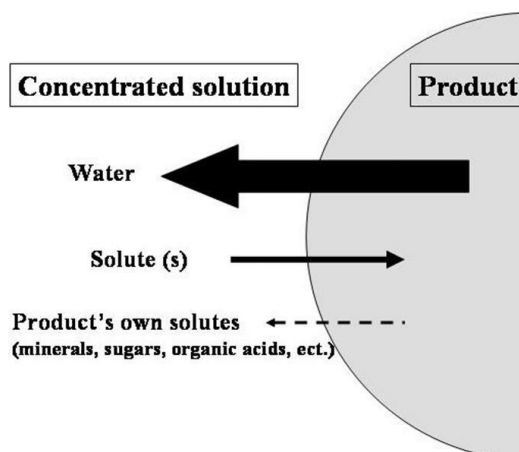
2.2 การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration)

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสเป็นวิธีการรักษาผลิตภัณฑ์สดก่อนที่จะนำมาอบแห้ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส (Lombard, Oliveira, Fito, & Andrés, 2008) ซึ่งจะมีทั้งการออสโมซิสด้วยสารละลายเกลือ และออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาล โดยการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการออสโมซิส และกระบวนการทำแห้ง

2.2.1 หลักการออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิส (osmosis) เป็นกระบวนการแพร่ (diffusion process) อย่างหนึ่งในสารละลายที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (semi-permeable) การออสโมซิสจะเกิดขึ้นได้สารละลายต้องแยกกันอยู่สองส่วนที่กั้นด้วยเยื่อเลือกผ่าน ตัวอย่างเช่น ส่วนหนึ่งเป็นสารละลายน้ำตาลและอีกส่วนหนึ่งเป็นน้ำ โมเลกุลของน้ำจะซึมผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าไปในส่วนของสารละลายน้ำตาล ทำให้สารละลายน้ำตาลเจือจางลงและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า ออสโมซิส เมื่อมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำผ่านเยื่อเลือกผ่านทั้งสองทางในอัตราที่เท่ากันจะเกิดจุดสมดุลของออสโมซิส Hydrostatic pressure ของน้ำตาลต่อเยื่อเลือกผ่านจะมีมากกว่าความดันของน้ำต่อเยื่อเลือกผ่านอีกด้านหนึ่ง แสดงว่าความดันอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่เข้าไปยังด้านของสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงกว่า เมื่อการแพร่ของโมเลกุลน้ำทั้งสองทางเท่ากัน ระบบจะอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งแรงดันที่ต้านการแพร่ของน้ำมายังสารละลายน้ำตาล เรียกว่า แรงดันออสโมซิสของสารละลายน้ำตาล (รัตนานพนธ์, 2545)

การออสโมซิสเป็นการขจัดน้ำออกจากเซลล์หรือเนื้อเยื่ออาหาร โดยการแช่ชิ้นตัวอย่างลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ระหว่างการเกิดออสโมซิสภาพที่ 1 จะเกิดกระบวนการถ่ายเทมวลน้ำภายในเซลล์ของชิ้นตัวอย่างจะเคลื่อนออกสู่สารละลาย ขณะเดียวกันตัวถูกละลายในสารละลายจะเคลื่อนไปสู่ภายในเซลล์ของชิ้นตัวอย่างและกระบวนการถ่ายเทมวลสารระหว่างน้ำกับตัวถูกละลายนี้จะดำเนินไปจนถึงสภาวะสมดุล (บรรจงสินศิริ, พิศพันธ์, & แซ่ไคว่ว, 2550) แสดงดังภาพที่ 1. โดยส่วนใหญ่กระบวนการดังกล่าวมักจะใช้กับผักและผลไม้ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบสูง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เช่นการเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ (Corrêa, Pereira, Vieira, & Hubinger, 2010) อีกทั้งผลิตภัณฑ์สุดท้ายต้องมีความชื้นไม่เกิน 15-20% (Mudambi และคณะ, 2006) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกระบวนการออสโมซิสเป็นการลดปริมาณน้ำลงได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง เป็นวิธีการลดปริมาณน้ำในผักผลไม้ที่ไม่รุนแรง จึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพจากของสดมากนัก ในกระบวนการออสโมซิสมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่หลายประการซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสาร และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (ยีนยงพุทธกาล, 2013)



ภาพที่ 1 การถ่ายเทมวลสารละลายความเข้มข้นสูงไปสารละลายความเข้มข้นต่ำ
ที่มา: ดัดแปลงจาก (Raoult-Wack, 1994)

จากภาพที่ 1 พบว่าเป็นการถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายความเข้มข้นจากต่ำหรือน้ำจากภายในเซลล์ไปยังสารละลายความเข้มข้นสูงหรือสารละลายที่มีส่วนผสมของเกลือ น้ำตาล หรือสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลกันของทั้งสองด้านโดยต้องผ่านเยื่อเลือกผ่าน เป็นการเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นทั้งสองทำให้เกิดแรงดันรักษาสภาพไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายต่อไป

2.2.1.1 การถ่ายโอนมวลในระหว่างการออสโมซิส

การถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) ระหว่างการออสโมซิส คือ เกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์ผักและผลไม้ไปยังสารละลายออสโมติก (osmotic solution) และตัวถูกละลายจากสารละลายซึมเข้าสู่ผักและผลไม้ ทำให้ผักและผลไม้มีปริมาณน้ำลดลง (water loss, WL) และปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น (solid gain, SG) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (Ditudompo & Pittarate, 2007)

$$\text{Water loss} = \frac{w_i X_i - w_f X_f}{w_i} \times 100$$

$$\text{Solid gain} = \frac{\left(\frac{X_{sf}}{100 \times w_f} \right) - \left(\frac{X_{si}}{100 \times w_i} \right)}{w_i \times 100}$$

เมื่อให้ W_i = น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (g)

W_f = น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่สารละลายออสโมติก (g)

X_i = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเริ่มต้น (g water/g sample)

X_f = ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการแช่สารละลายออสโมติก (g water/g sample)

X_{Si} = ปริมาณของแข็งของตัวอย่างเริ่มต้น (g total solid/g sample)

X_{Sf} = ปริมาณของแข็งของตัวอย่างหลังการแช่สารละลายออสโมติก (g total solid/g sample)

การดึงน้ำด้วยวิธีการออสโมซิสอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ของน้ำจากเนื้อเยื่อของชิ้นอาหาร ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดัน (driving force) ระหว่างภายในเซลล์อาหารและสารละลายออสโมติก ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติก ในลักษณะการเดินทางที่สวนกัน โดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน

สำหรับผักและผลไม้ ผนังเซลล์สามารถยืดขยายตัวได้ เมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นภายในเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์จะทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยยอมให้น้ำแพร่ผ่านได้มากกว่าตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส ได้แก่

- 1) น้ำภายในเซลล์ของผักและผลไม้จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก
- 2) ตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก จะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ผักและผลไม้
- 3) สารบางอย่างที่มีอยู่ในเซลล์ผักและผลไม้ตามธรรมชาติ จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก

ทั้งนี้การถ่ายโอนมวลสารหลักที่เกิดขึ้นคือการเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเซลล์ของผักและผลไม้ที่เกิดสวนทางกับการเคลื่อนย้ายของตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก โดยการถ่ายโอนมวลสารนี้จะเกิดขึ้นจนเข้าสู่สมดุลของสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ส่วนการเคลื่อนย้ายของสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเซลล์ผักและผลไม้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจะทำให้ปริมาณน้ำในผักและผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น และ

ทำให้น้ำหนักสูญหตุลดลงได้ รวมถึงทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity; a_w) ของผักผลไม้ลดลงด้วย (Raoult-Wack, 1994)

2.2.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการออสโมซิสในผักและผลไม้

- ความแตกต่างของชนิด พันธุ์ และระดับความสุกของผลไม้

ชนิด พันธุ์ และระดับความสุกของผักผลไม้ที่แตกต่างกันส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมี ความเป็นรุกรุน การจัดเรียงตัวและโครงสร้างของเซลล์ ลักษณะเส้นใยและผิว สัดส่วนของโปรโตพลาสตต่อพลาสตที่ละลายได้ ช่องว่างภายในเซลล์และการยึดติดกันของเซลล์ (Kowalska et al., 2019) นำแอปเปิ้ล ฟักทองและแครอทมาทำการทดลองโดยแช่ในสารละลายออสโมติกในสภาวะเดียวกัน พบว่า ฟักทองมีการถ่ายเทปริมาณน้ำสูงแต่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งต่ำ จึงเป็นผลให้ฟักทองมีน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุด ส่วนแอปเปิ้ลมีการถ่ายเทปริมาณน้ำสูงแต่มีการเพิ่มขึ้นของของแข็งสูงที่สุดเนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของแอปเปิ้ลมีความเป็นรุกรุนสูง ทำให้น้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นแอปเปิ้ลได้ง่ายที่สุด จึงทำให้แอปเปิ้ลมีน้ำหนักที่ลดลงสุทธิน้อยที่สุด และ (García-Segovia et al., 2010) พบว่า การออสโมซิสโดยใช้มะละกอดิบทำให้มีปริมาณน้ำหนักรลดลงและปริมาณน้ำที่สูญเสียมากกว่ามะละกอสุก เนื่องจากมะละกอดิบมีลักษณะความเป็นรุกรุนในเซลล์มากกว่ามะละกอสุก จึงยอมให้น้ำที่อยู่ในเซลล์ถ่ายเทออกจากช่องว่างในเซลล์ได้มากกว่า

- อุณหภูมิ

สารละลายออสโมติกที่มีอุณหภูมิสูงส่งผลต่อองค์ประกอบภายในของผักและผลไม้ และสารละลายออสโมติกสามารถเกิดการแตกตัวของน้ำตาลซูโครสกลายเป็นน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรุกโตส ซึ่งมีผลต่อผลิตภัณฑ์แช่แข็ง โดยในงานวิจัยของ (Allahdad, Nasiri, Varidi, & Varidi, 2019) ได้ทำการศึกษาการทำแห้งแบบออสโมซิสในเนื้อทับทิมโดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายออสโมติกที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อลดการแตกตัวของน้ำตาลซูโครส ร่วมกับการใช้เครื่อง ultrasonic ในระยะเวลาต่างกัน เพื่อเร่งการซึมผ่านของสารละลายออสโมติกและให้การซึมผ่านนี้เป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ (García-Segovia et al., 2010) ยังทำการศึกษาการทำแห้งแบบออสโมติกในวุ้นหนทางจระเข้โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายออสโมติกที่อุณหภูมิต่างกัน ได้แก่ 25 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการซึมผ่านของสารละลายได้มากกว่า

- ชนิดของตัวถูกละลายออสโมติกและเวลาในการแพร่สารละลายออสโมติก

สารหรือตัวถูกละลายที่แตกต่างกัน จะมีมวลโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างกระบวนการออสโมซิส เช่น (Ditudompo & Pittarate, 2007) ได้ทำการทดลองแช่มะเขือเทศในสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้น 60 °Brix พบว่ามอลทิทอลทำให้มะเขือเทศมีการสูญเสียน้ำมากที่สุด และการใช้ซอร์บิทอลทำให้มีของแข็งเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากซอร์บิทอลมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงทำให้มีของแข็งเพิ่มขึ้นมากและอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียน้ำและการเพิ่มของแข็งน้อย ระยะเวลาในการแช่ยาวนานขึ้นทำให้มะเขือเทศสูญเสียน้ำมากขึ้นและมีของแข็งเพิ่มขึ้น

2.3 น้ำตาล

น้ำตาล (sugar) เป็นสารให้ความหวานที่เป็นคาร์โบไฮเดรต ประเภทน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลคู่ น้ำตาลที่ใช้ในอาหาร ได้แก่ น้ำตาลซูโครส (sucrose) น้ำตาลกลูโคส (glucose) และ น้ำตาลฟรุกโตส (fructose)

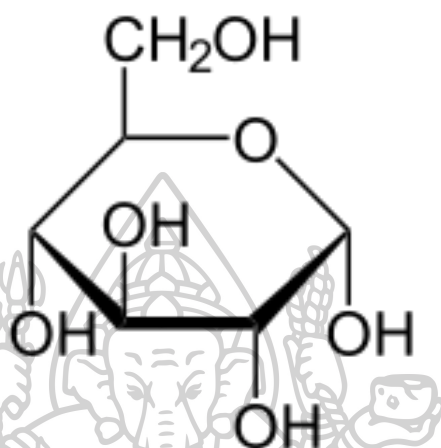
2.3.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide)

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กที่สุด ไม่สามารถถูกไฮโดรไลซิสให้เล็กลงได้อีก มีสูตรทั่วไปคือ $(\text{CH}_2\text{O})_n$ จะมีค่าตั้งแต่ 3 – 7 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลมีทั้งที่เป็นพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ และพอลิไฮดรอกซีคีโตน จึงเรียกว่าเป็นน้ำตาลแอลโดส (aldose) และน้ำตาลคีโตส (ketose) ตามลำดับ น้ำตาลที่คาร์บอนอะตอมในโมเลกุลที่อยู่ถัดจากหมู่คาร์บอนิล ($-\text{CH}_2\text{OH}$) ขึ้นไปเป็นคาร์บอนอะตอมไม่สมมาตร หมู่ทุกหมู่ที่จับกับคาร์บอนอะตอมนี้แตกต่างกัน ทำให้ $-\text{OH}$ สามารถเรียงตัวได้ทั้งทางขวาและซ้าย หมู่ $-\text{OH}$ อยู่ทางขวาเรียกว่า D-form และหมู่ $-\text{OH}$ อยู่ทางซ้ายเรียกว่า L-form สำหรับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบมากในอาหารจะเป็นพวกน้ำตาลที่มีหมู่คาร์บอนิลเป็นแอลดีไฮด์ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม (Pentose) และที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ซึ่งน้ำตาลเพนโทสที่สำคัญ คือ น้ำตาลอาราบินอส และน้ำตาลเฮกโซสที่สำคัญ คือ น้ำตาลฟรุกโตส น้ำตาลกลูโคส (รัตนานพนนท์, 2545)

2.3.1.1 น้ำตาลกลูโคส (Glucose)

น้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลอัลโดสที่พบได้ทั่วไปในรูปอิสระ โดยเฉพาะส่วนต่างๆของพืชเช่น ผลไม้สุก ดอกไม้ ใบไม้และรากพืช และเป็นน้ำตาลที่สำคัญในเลือดของคนด้วย

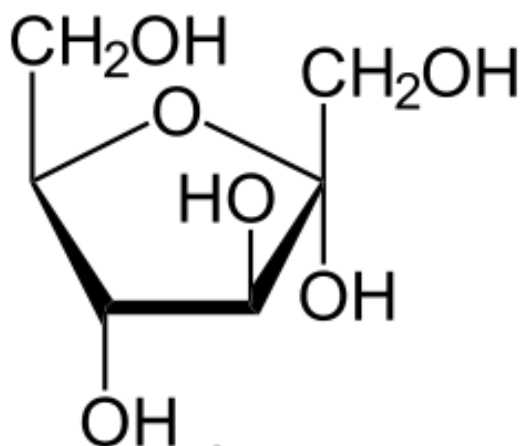
น้ำตาลกลูโคสยังเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไดแซ็กคาไรด์ โอลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดต่างๆ เช่น ซูโครส เป็นต้น น้ำตาลกลูโคสที่ผลิตขายทางการค้าจะได้รับการไฮโดรไลซิสสตาร์ชได้เป็นเดกซ์โตรสและน้ำเชื่อมข้าวโพด ซึ่งอาจมีมอลโทสปนอยู่เล็กน้อย (รัตนাপนนท์, 2545) น้ำตาลกลูโคสที่พบอยู่ในรูป D-glucose ซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส (Glucose)

2.3.1.2 น้ำตาลฟรุกโตส (Fructose)

น้ำตาลฟรุกโตสหรือ เลวูโลส (lævulose) เป็นน้ำตาลคีโตสชนิดเดียวที่มีความสำคัญมากในอาหาร ในธรรมชาติพบน้ำตาลฟรุกโตสได้ในผัก ผลไม้ ธัญพืช น้ำผึ้งและได้จากการไฮโดรไลซิสน้ำตาลซูโครสและอินนูลิน (inulin) น้ำตาลฟรุกโตสมีทั้ง D- และ L- form แต่ D-form เท่านั้นที่สามารถถูกเมแทบอลิซึมได้ในร่างกาย พอลิเมอร์ของฟรุกโตสในธรรมชาติคือ ลีแวน (levan) หรืออินนูลิน ซึ่งโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตสต่อกันด้วยพันธะ β -(1 \rightarrow 2) แต่พันธะฟรุกโตสที่พบในหญ้า (grass fructosan) ต่อกันด้วยพันธะ β -(1 \rightarrow 6) ผลึกของน้ำตาลฟรุกโตสที่ผลิตเป็นการค้าจะอยู่ในรูปปราศจากน้ำ (รัตนাপนนท์, 2545)



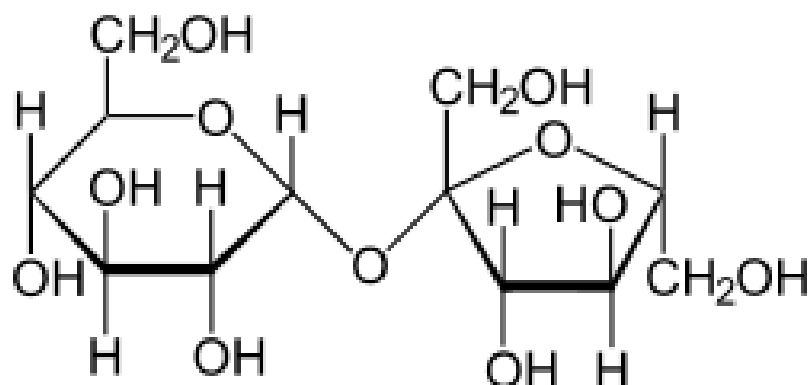
ภาพที่ 3 โครงสร้างของน้ำตาลฟรุกโตส (Fructose)

2.3.2 น้ำตาลโมเลกุลคู่ (Disaccharide)

น้ำตาลโมเลกุลคู่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุล ซึ่งอาจจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ สูตรทั่วไปของน้ำตาลโมเลกุลคู่คือ $C_{12}(H_2O)_{11}$ ตัวอย่างเช่น น้ำตาลซูโครส มอลโทส และแล็กโตส ซึ่งน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่นิยมใช้ในอาหารมากที่สุดคือน้ำตาลซูโครส

2.3.2.1 น้ำตาลซูโครส

น้ำตาลซูโครสหรือแซ็กคาไรส (saccharose) เป็นน้ำตาลที่พบอยู่ทั่วไปในพืช มีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0.1 – 25 โดยเฉพาะอ้อย และบีต (beets) มีน้ำตาลซูโครสมาก ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลซูโครสในระดับอุตสาหกรรม และยังสามารถพบน้ำตาลซูโครสได้ในผลไม้สุกด้วย น้ำตาลซูโครสมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกับน้ำตาลฟรุกโตสด้วยพันธะ α -(1 \rightarrow 2) ทำให้ไม่มีหมู่แอลดีไฮด์และหมู่คีโตนอิสระ ซึ่งเป็น functional group เหลืออยู่ น้ำตาลซูโครสจึงเป็น non reducing sugar เพียงชนิดเดียวที่ไม่สามารถรีดิวซ์สารละลาย Fehling ได้และไม่เกิด mutarotation เมื่ออยู่ในรูปสารละลาย น้ำตาลซูโครสไม่คงตัวในกรด จะถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส และถ้าได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวเป็นคาราเมลมีสีน้ำตาล (รัตนাপนนท์, 2545)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของน้ำตาลซูโครส (Sucrose)

2.3.3 สมบัติของน้ำตาล

2.3.3.1 อีพิเมอร์ (Epimer)

น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกือบทุกชนิดจะมีคาร์บอนอะตอมที่ไม่สมมาตรกันจึงมีความสามารถในการหมุน plane of polarized light ได้ เรียกว่า optical rotation ดังนั้นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจะเกิด stereoisomerism มีไอโซเมอร์ที่เป็น mirror image ซึ่งกันและกัน แต่มีสมบัติในการหมุน plane of polarized light ได้ต่างกัน รูปหนึ่งจะหมุนไปทางขวาเรียกว่า Dextrorotatory (D) หรือใช้เครื่องหมายเป็น (+) ส่วนอีกรูปหนึ่งหมุนไปทางซ้ายเรียกว่า Levorotatory (L) หรือใช้เครื่องหมายเป็น (-) การจัดโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและไอโซเมอร์จัดได้เป็นแบบ D และแบบ L นั้น ถือหลักการเขียนตามแบบของ Fischer ซึ่งจะดูตำแหน่งของหมู่ -OH ที่คาร์บอนตัวที่ 2 นับจากล่างสุดขึ้นไป ถ้าหมู่ -OH อยู่ทางขวาจะเป็นแบบ D และถ้าหมู่ -OH ของทางซ้ายจะเป็นแบบ L น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวส่วนใหญ่ที่พบในร่างกายมนุษย์จะอยู่ในรูปแบบ D (รัตนาปนนท์, 2545)

อีพิเมอร์ (Epimer) หมายถึง น้ำตาล 2 ชนิดซึ่งแตกต่างกันที่คาร์บอนเพียงตำแหน่งเดียว เช่น น้ำตาลกาแล็กโทสกับน้ำตาลกลูโคสจะต่างกันที่ C-4 ปฏิกริยาการเปลี่ยนอีพิเมอร์ เรียกว่า Epimerization

2.3.3.2 การละลาย

น้ำตาลทุกชนิดทั้งโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่สามารถละลายได้ดีในน้ำ แต่ น้ำตาลบางชนิดละลายได้ดีในน้ำร้อน นอกจากนี้ยังละลายได้บ้างในแอลกอฮอล์ แต่น้ำตาลส่วนใหญ่ ไม่ละลายในอีเทอร์

2.3.3.3 ความหวาน

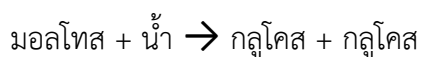
น้ำตาลทุกชนิดมีรสหวาน แต่มีระดับความหวานแตกต่างกัน ถ้าพิจารณา ระดับความหวานของน้ำตาลซูโครสเป็น 100 น้ำตาลชนิดอื่นๆ จะมีระดับความหวานแตกต่างจาก น้ำตาลซูโครส ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับความหวานของน้ำตาลบางชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลซูโครส

| ชื่อน้ำตาล | ระดับความหวาน |
|-----------------|---------------|
| น้ำตาลฟรุกโตส | 170 |
| น้ำตาลอินเวิร์ต | 130 |
| น้ำตาลซูโครส | 100 |
| น้ำตาลกลูโคส | 75 |
| น้ำตาลมอลโทส | 30 |
| น้ำตาลกาแล็กโตส | 30 |
| น้ำตาลแล็กโตส | 15 |

2.3.3.4 การไฮโดรไลซิส

น้ำตาลโมเลกุลคู่สามารถเกิดไฮโดรไลซิสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุล ได้ และปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสต้องมือน้ำร่วมด้วย เช่น



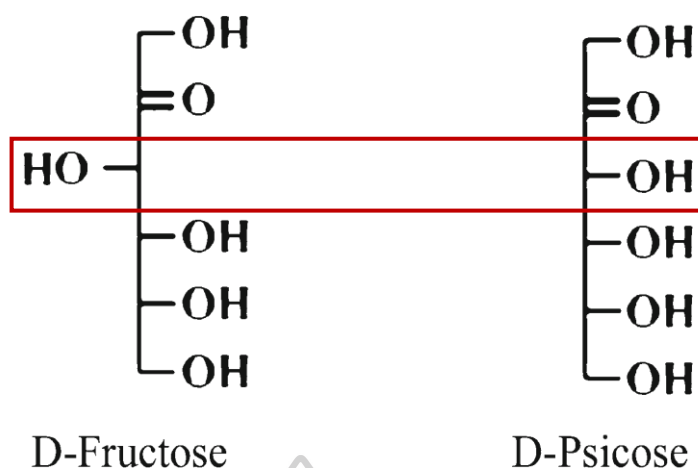
2.3.4 น้ำตาลหายาก (Rare Sugar)

น้ำตาลหายาก (rare sugar) โดยทั่วไปหมายถึงน้ำตาลประเภทโมเลกุลเดี่ยวหรือโมโนแซคคาไรด์ที่พบได้น้อยในธรรมชาติ โดยพบว่ามีย่าน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ที่พบได้ในปริมาณมากในธรรมชาติเพียง 7 ชนิด ได้แก่ glucose, galactose, mannose, fructose, xylose, ribose และ L-arabinose ในขณะที่น้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ประเภท hexose จำนวน 20 ชนิด และน้ำตาล pentose อีก 9 ชนิดถูกจัดเป็น rare sugar ซึ่งส่วนใหญ่คือน้ำตาลที่เป็น isomer หรือ epimer และน้ำตาลในรูปแบบ L-form หรือ D-form ที่พบได้น้อย แม้ว่าน้ำตาลหายากจะไม่ใช้สารชนิดใหม่แต่เนื่องจากพบได้ยากทำให้การศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ และประโยชน์ของน้ำตาลหายากเหล่านี้มีอย่างจำกัด อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีความพยายามจากนักวิจัยจำนวนมากในการศึกษาการผลิตน้ำตาลหายากบางชนิดด้วยวิธีการต่างๆ โดยเฉพาะการใช้เอนไซม์ ซึ่งในอนาคตมีความเป็นไปได้สูงในการที่จะมีการผลิตน้ำตาลหายากเหล่านี้เชิงพาณิชย์ต่อไป



ภาพที่ 5 ผลิตภัณฑ์ไซรัปที่มีส่วนผสมของน้ำตาลไซโคส

ปัจจุบันน้ำตาลหายากที่มีการผลิตเชิงพาณิชย์ในระดับอุตสาหกรรมคือน้ำตาลไซโคส (D-psicose) ($C_6H_{12}O_6$) หรือชื่อในทางการค้าเรียกว่า อัลลูโลส (allulose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่ตำแหน่ง C-3 เป็น epimer ของน้ำตาลฟรุคโตส ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลฟรุกโตสกับไซโคสที่แสดงตำแหน่ง Epimer กัน

น้ำตาลไซโคสพบได้ในธรรมชาติในพืชและแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้น มีคุณสมบัติที่สำคัญคือการเป็นสารให้ความหวานที่ให้พลังงานน้อยมาก (0.2 kcal/g) ในขณะที่ให้คุณลักษณะอื่นๆ คล้ายกับน้ำตาลทั่วไป ได้แก่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ละลายน้ำได้ดี ให้ความหวานประมาณ 70% ของซูโครส หลอมเหลวที่ 90 องศาเซลเซียส และเกิดคาราเมลได้ เนื่องจากเป็นน้ำตาลรีดิวซ์จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ให้สารสีน้ำตาลได้แต่น้อยกว่ากลูโคสและฟรุกโตส (Hossain et al., 2015) และไซโคสยังมีฤทธิ์ในการลดระดับน้ำตาลในเลือดได้อีก ซึ่งจากการทดสอบจึงมีการสันนิษฐานว่าน้ำตาลไซโคสมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำตาลฟรุกโตสในการดูดซึมกลูโคสจากตับ (Granström, Takata, Morimoto, Leisola, & Izumori, 2005)

จากการค้นพบเอนไซม์ D-tagatose 3-epimerase ซึ่งสามารถเปลี่ยนน้ำตาลฟรุกโตสให้เป็นไซโคสได้ ทำให้เริ่มมีการผลิตในปริมาณมาก (Granström et al., 2005) อย่างไรก็ตามปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำตาลไซโคสด้วยวิธีทางเคมีทำให้สามารถผลิตน้ำตาลชนิดนี้ได้ในราคาถูกลงอย่างมาก ในประเทศญี่ปุ่นมีการเติมน้ำตาลไซโคสในผลิตภัณฑ์อาหารโดยมักจะเรียกว่าการใช้ rare sugar ทั้งในรูปของไซรัป และผลิตภัณฑ์อื่นๆ องค์การอาหารและยา (FDA) ของสหรัฐอเมริกาจัดให้น้ำตาลไซโคส (Psicose) หรืออัลลูโลส (allulose) นี้เป็นวัตถุเจือปนอาหารที่ปลอดภัย (GRAS)

2.3.4.1 คุณสมบัติของน้ำตาลไซโคส

น้ำตาลไซโคสเป็นน้ำตาลหายากที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจในการใช้เป็นสารให้ความหวานพลังงานต่ำ (low calorie sweetener) มีคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำตาลไซโคส

| Property | Value |
|---------------------|--|
| Chemical family | Carbohydrate ketose monosaccharide, 3-epimer of D-fructose |
| CAS No. | 551-68-8 |
| Molecular formula | C ₆ H ₁₂ O ₆ |
| Molecular weight | 180.156 g/mol |
| Physical form | White crystalline solid |
| Odor | None |
| Melting temperature | 96 °C |
| Optical rotation | [α] ²⁰ /D=-85° (c=1, H ₂ O) |
| Solubility | 74 % w/w at 25 °C and 83 % w/w at 50 °C |
| Relative sweetness | 70 % of sucrose in 10 % (w/w) solution |
| Caloric effect | 0.007 kcal/g (with rat experiment) |
| Maillard reaction | Yes |
| Toxicity | No (with rat experiments) |
| Regulation state | GRAS approved as an ingredient in sugar substitutes |

ที่มา: (Mu, Zhang, Feng, Jiang, & Zhou, 2012)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าน้ำตาลไซโคสเป็นน้ำตาลที่อยู่ในรูปผลึก ละลายน้ำได้ดี มีการศึกษาการใช้น้ำตาลไซโคสเพื่อประโยชน์ในการควบคุมน้ำหนักป้องกันโรคเบาหวาน (Hossain et al., 2015) จึงนับว่าเป็นน้ำตาลที่เป็น functional ingredient ที่น่าสนใจมากในปัจจุบัน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(García-Segovia et al., 2010) ได้ศึกษาการทำแห้งแบบออสโมซิสในวุ้นหางจระเข้แบบทั้งเปลือกและแบบไม่มีเปลือก โดยแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 35, 40 และ 50 °Brix โดยใช้อัตราส่วนของสารละลายออสโมติกต่อชิ้นผลไม้เป็น 20:1 จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่ได้รับ พบว่าอุณหภูมิ และความเข้มข้นของ

สารละลายออสโมติกมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านของสารละลายออสโมติกผ่านกระบวนการ mass reduction ในชั้นวุ้นทางจระเข้

(Khuwjitjaru et al., 2022) ได้ศึกษาการแช่เยือกแข็งมะม่วงแบบช้าและแบบเร็วก่อนเข้าสู่กระบวนการออสโมซิส โดยศึกษาสมดุลการแพร่ของสารละลายออสโมติกไปยังชั้นมะม่วงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแช่ชั้นตัวอย่างในสารละลายออสโมติกที่ระดับความเข้มข้น 38 °Brix พบว่าในการแช่เยือกแข็งนี้ช่วยเพิ่มค่าปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส โดยค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเปลี่ยนแปลงจาก 13 – 15 °Brix ไปเป็น 38 °Brix ที่เวลา 2 – 4 ชั่วโมง ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Peleg ในการอธิบายปริมาณน้ำที่ลดลง และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น

(Giraldo, Talens, Fito, & Chiralt, 2003) ได้ศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในสารละลายออสโมติกที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในมะม่วง โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ศึกษาที่ความเข้มข้น 35, 45, 55 และ 65 °Brix ที่ความดันบรรยากาศ และการใช้พัลส์สุญญากาศ (50 mbar เป็นเวลา 10 นาที) พบว่า กระบวนการเหล่านี้ส่งผลต่อเนื้อเยื่อของชั้นมะม่วงในกระบวนการออสโมซิส สำหรับตัวอย่างที่อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ และที่สารละลายซูโครสความเข้มข้น 45 °Brix พบว่ามีค่าปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่สูญเสียมีค่าสูง ในสภาวะความเข้มข้นสารละลายนี้จึงเหมาะกับการผลิตมะม่วงแช่อิ่มอบแห้งที่มีความหวานมาก



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติก

- น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ยี่ห้อน้ำตาลทรายมิตรผล บริษัท น้ำตาลสิงห์บุรี จำกัด (ประเทศไทย) จำกัด
- กลูโคสชนิดผง บริษัท ยูโทเปียน จำกัด
- น้ำตาลฟรุกโตสชนิดผง Fructofin C 99.5% บริษัท รามาโปรดักชั่น จำกัด
- น้ำตาลไซโคสชนิดผง D-Psicose (Allulose) 99.0% (SAVANNA Ingredients GmbH, Germany)

3.2 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล (0.1 N sodium hydroxide solution) (Merck, Germany)
- น้ำตาลฟรุกโตสมาตรฐาน เกรด HPLC 98.0% (Kemaus, Australia)
- น้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน เกรด HPLC 99.0% (Sigma Aldrich™ Chemie GmbH, Switzerland)
- น้ำตาลซูโครสมาตรฐาน เกรด HPLC 99.5% (Sigma Aldrich™ Chemie GmbH, Switzerland)
- น้ำตาลไซโคสชนิดผง D-Psicose (Allulose) 99.0% (SAVANNA Ingredients GmbH, Germany)
- น้ำกลั่น (distilled water, Vunique, Thailand)
- อะซิโตนไนไตรล์บริสุทธิ์ เกรด HPLC (absolute acetonitrile HPLC 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- อะซิโตนไนไตรล์บริสุทธิ์ เกรด AR (absolute acetonitrile AR 99.7%, RCI Labscan, Thailand)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องวัดสี (Hunter lab รุ่น Colorflex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc, USA)
- เครื่องวัดค่าความหวานแบบดิจิตอล (digital refractometer, รุ่น Pal- α (ALPHA), Atago, Japan)
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter รุ่น S220 SevenCompact™ pH/Ion, USA)
- เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer รุ่น Ultra Turrax T25 Basic, IKA labortechnik, Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital balance รุ่น BP 221S, Sartorius, Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง (Digital balance, TE 3102S Sartorius, Germany)
- เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น Sorvall RC 6, USA)
- เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic baths, รุ่น Sonorex digital 10P, BANDELIN electronic, Germany)
- ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (hot air oven, รุ่น FED53, Binder, Germany)
- เครื่องผสมแบบวอร์เทกซ์ (vortex mixer รุ่น Vortex-Genie2, Scientific Industries, USA)
- กระดาษกรอง whatman เบอร์ 4 ขนาด 70 มิลลิเมตร (filter paper, circles 70 nm, Whatman, UK)
- กระดาษกรอง ชนิด Nylon 0.45 μm ขนาด 47 มิลลิเมตร (Nylon Membrane Filters, 0.45 μm , Whatman, UK)
- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, รุ่น Shimadzu model RID-10A, degassing unit (DGU-20A3R); LC-20AD, Shimadzu, Japan)
- คอลัมน์ (column) รุ่น COSMOSIL Sugar-D (4.6 mm I.D. x 250 mm, Nacalai tesque, Japan)

3.4 มะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษา

มะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้น ที่เก็บเกี่ยวจากสวนในอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา และรับจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี และตลาดปทุมมงคล จังหวัดนครปฐม ในตารางที่ 3 ลักษณะดิบแก่ผลสี

เขียวไม่มีรอยช้ำ เลือกเฉพาะผลที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 550 – 650 กรัมต่อผล หลังจากขนส่งมายังห้องปฏิบัติการ นำมะม่วงมาทดสอบความบริสุทธิ์ของผลด้วยวิธีการลอย-จมในน้ำ เลือกมะม่วงที่จมน้ำ (ความถ่วงจำเพาะ >1) มาทดสอบการลอย-จมอีกครั้งในสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เพื่อคัดเลือกความแก่อ่อนของผลมะม่วง คัดเฉพาะผลที่ลอยในน้ำเกลือมา ผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 60 นาที มาใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3 ข้อมูลของแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา

| ชุดการทดลองที่ | วัน เดือน ปี ที่รับมะม่วง | แหล่งที่มา | สำหรับชุดการทดลอง |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|---|
| 1 | 18 มี.ค. 63 | สวนเนรัฐชรา จ.ฉะเชิงเทรา | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 40 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 1) |
| 2 | 3 เม.ย. 63 | สวนเนรัฐชรา จ.ฉะเชิงเทรา | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 40 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 2) |
| 3 | 4 พ.ค. 63 | สวนเนรัฐชรา จ.ฉะเชิงเทรา | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 50 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 1) |
| 4 | 12 พ.ค. 63 | ตลาดไท จ.ปทุมธานี | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 50 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 2) |
| 5 | 4 มิ.ย. 63 | ตลาดไท จ.ปทุมธานี | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 30 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 1) |
| 6 | 16 มิ.ย. 63 | ตลาดไท จ.ปทุมธานี | เพื่อศึกษาผลของชนิดน้ำตาลต่อการแพร่ของน้ำตาลในชั้นมะม่วงที่ความเข้มข้น 30 °Brix (การทดลองซ้ำที่ 2) |
| 7 | 9 ธ.ค. 63 | ตลาดปทุมมงคล จ.นครปฐม | เพื่อศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ร้อยละ 10 และ 20 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ |
| 8 | 7 มี.ค. 64 | ตลาดปทุมมงคล จ.นครปฐม | เพื่อศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ร้อยละ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ |

3.5 การบ่มมะม่วง

นำมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการคัดเลือกในข้อ 3.4 มาบ่มในห้องที่อุณหภูมิ 21.4 ± 0.1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 72.3 ± 2.2 (ภาพที่ 7) ทำการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของมะม่วงในระหว่างการบ่มทุกวัน โดยสุ่มวันละ 3 ผล จนกระทั่งมะม่วงมีลักษณะสุกเนื้อแข็ง และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง $16.5 - 17.5$ °Brix



ภาพที่ 7 การบ่มมะม่วงที่อุณหภูมิ 21.4 ± 0.1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 72.3 ± 2.2

3.6 วิธีการทดลอง

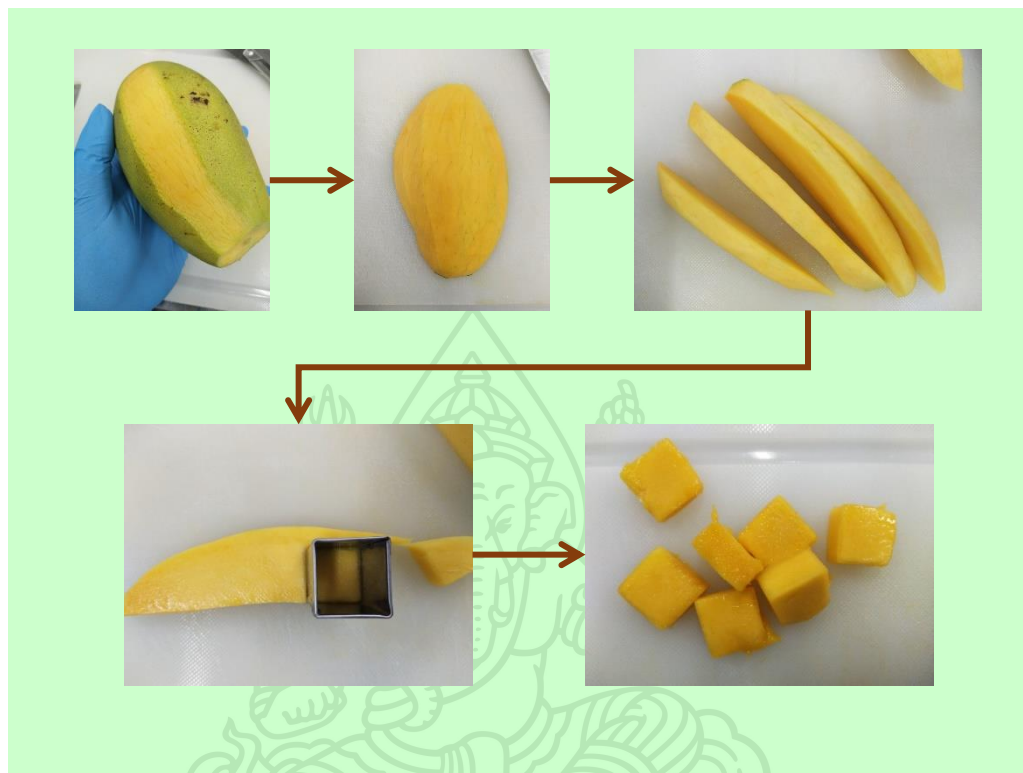
การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง ได้แก่ (1) การศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลชนิดเดียว โดยศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix และ (2) การศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม โดยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่นำมาเปรียบเทียบในการศึกษานี้ ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และฟรุคโตส ในสารละลายผสมที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

3.6.1 การศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลชนิดเดียว

3.6.1.1 การเตรียมตัวอย่างชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้น

นำผลมะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้นที่ผ่านการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งมีลักษณะสุกเนื้อแข็ง มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid: TSS) อยู่ในช่วง $16.5 - 17.5$ °Brix มา

ปอกเปลือก และตัดแต่งเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด $2 \times 2 \times 1$ เซนติเมตร (ดังภาพที่ 8) และสุ่มตัวอย่าง ผลละ 10 ชิ้น (ด้านละ 5 ชิ้น) ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเริ่มต้น



ภาพที่ 8 การเตรียมชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด $2 \times 2 \times 1$ เซนติเมตร

3.6.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของมะม่วงสดที่ใช้ในการศึกษา

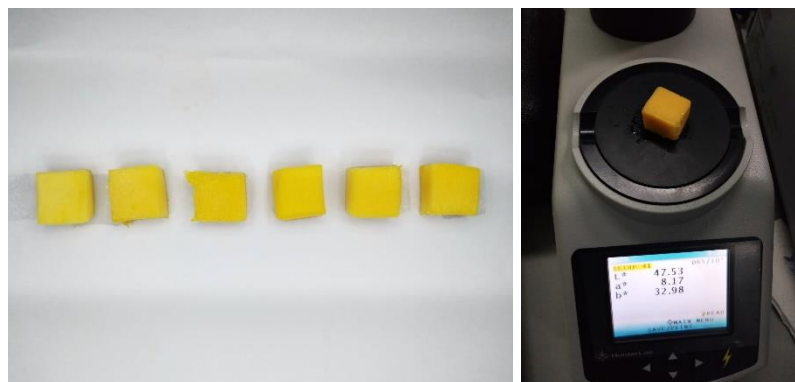
3.6.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

1) น้ำหนักของวัตถุดิบ

ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นมะม่วงทุกชิ้นที่เตรียมในข้อ 3.6.1.1 โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และจดบันทึก

2) ค่าสี

จากตัวอย่างที่สุ่มไว้ในข้อ 3.6.1 เลือกชิ้นตัวอย่างมาด้านละ 1 ชิ้น มาทำการวัดสี โดยใช้ระบบ CIE L^*, a^*, b^* โดยทำการวัดขึ้นละ 2 ครั้ง แสดงดังภาพที่ 9 และบันทึกค่า L^* , a^* และ b^* ที่ได้



ภาพที่ 9 แสดงการวัดสีขึ้นตัวอย่างมะม่วงแก้วขมิ้น

คำนวณหาค่าความเข้มของสี (Chroma: C^*) และค่ามุมของสี (hue angle: h°) จากสมการที่ (1) และ (2) (ภาคผนวก ก)

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$h^\circ = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

3.6.1.2.2 คุณสมบัติน้ำคั้น

นำตัวอย่างที่สุ่มไว้ในข้อ 3.6.1.1 ด้านละ 5 ชิ้น มาปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องโฮมจีไนซ์เซอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่

1) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids; TSS)

นำตัวอย่างที่ปั่นละเอียดไว้มารองผ่านผ้าขาวบาง เพื่อแยกส่วนใสออกมา จากนั้นนำส่วนใสมาวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ด้วยมาตรวัดดัชนีหักเห (Digital refractometer, รุ่น Pal- α (Atago, Japan) และบันทึกผล ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

2) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

วัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter รุ่น S220 SevenCompact™ pH/Ion, USA) โดยนำตัวอย่างที่ปั่นละเอียดแล้วมารองผ่านผ้าขาวบาง แล้วนำส่วนใสมาวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยจุ่มหัววัดลงในน้ำคั้นมะม่วง ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

3) ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (titratable acidity; TA)

วิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ตามวิธี AOAC (2000) โดยชั่งตัวอย่างที่ปั่นละเอียดแล้วจำนวน 5 ± 0.0200 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งชนิดละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร หยดสารฟีนอล์ฟทาลีน ประมาณ 2-3 หยด ทำการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่ใกล้เคียงกัน บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปทั้งหมด และนำไปคำนวณหาค่า TA เทียบกับกรดซิตริกดังสมการ ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ (ภาคผนวก ก)

$$TA(\%) = \frac{ml(0.1N NaOH) \times 0.007 \times 100}{g(sample)} \quad (3)$$

เมื่อ 0.007 คือ citric acid equivalent

4) ปริมาณความชื้น (Moisture content)

นำมะม่วงที่ถูกปั่นละเอียดไว้มาชั่งน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาปริมาณความชื้น (moisture can) พร้อมบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระป๋องอลูมิเนียมหลังอบ (AOAC, 2000) บันทึกน้ำหนัก พร้อมทั้งคำนวณความชื้นในฐานเปียก ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ (ภาคผนวก ก)

5) วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography; HPLC)

- ขั้นตอนการสกัดตัวอย่าง

นำชิ้นตัวอย่างมาปั่นละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกัน และชั่งน้ำหนักจำนวน 1.0 ± 0.05 กรัม ใส่หลอดทดลองสำหรับปั่นเหวี่ยง ขนาด 50 มิลลิลิตร พร้อมบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน และเติม 80% อะซิโตนไตรลปริมาณ 9 มิลลิลิตร นำไปปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำส่วนใสกรองผ่านกระดาษกรอง และสกัดกากซ้ำโดยผสม 80% อะซิโตนไตรลปริมาณ 9 มิลลิลิตร อีกครั้ง และนำไปผสมเขย่าด้วยเครื่อง vortex ก่อนจะนำไปปั่นเหวี่ยงซ้ำ จากนั้นนำส่วนใสที่ได้มา

รวมกัน แล้วทำการปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร และนำไปเจือจางให้มีความเข้มข้นลดลง 50% ด้วย 80% อะซิโตนไตรลล์ นำสารสกัดที่ได้ไปผ่านตัวกรองในลอนขนาด 0.45 ไมครอนใส่ในขวดสีชา

- วิธีการวิเคราะห์

สำหรับวิเคราะห์น้ำตาลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) โดยใช้คอลัมน์ (column) รุ่น COSMOSIL Sugar-D (4.6 mm I.D. × 250 mm, Japan) และคอลัมน์ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส โดยเฟสเคลื่อนที่คือ อะซิโตนไตรลล์ความเข้มข้นร้อยละ 80 และน้ำกลั่นร้อยละ 20 และอัตราการไหลเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที โดยน้ำตาลแต่ละชนิดจะถูกตรวจสอบด้วย refractive index detector (RID-10A, Shimadzu, Japan) ซึ่งการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานน้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลไซโคส จากนั้นคำนวณให้อยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม ตัวอย่างแห้ง (mg/g dry solid) โดยการคำนวณปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดจะเริ่มจากการนำพื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลแต่ละชนิดแทนลงในสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานของน้ำตาลแต่ละชนิด

3.6.1.3 การศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix

3.6.1.3.1 การศึกษาระยะเวลาที่เกิดสมมูลของการแพร่

นำชิ้นมะม่วงที่เตรียมไว้ (ข้อที่ 3.6.1.1) มาทำการศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix เริ่มจากชั่งน้ำหนักชิ้นมะม่วงแต่ละชิ้นพร้อมจดบันทึกก่อนจะนำมาแช่ลงในสารละลายน้ำตาล 4 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ ได้แก่ 30, 40 และ 50 °Brix (

ตารางที่ 4) โดยแบ่งชิ้นมะม่วงลงแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละทริตเมนต์ๆ ละ 24 ชิ้น กำหนดอัตราส่วนชิ้นมะม่วงต่อสารละลายน้ำตาลเท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก และควบคุมสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นทำการสุ่มชิ้นมะม่วงทริตเมนต์ละ 3 ชิ้น ที่เวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, และ 240 นาที นำชิ้นมะม่วงที่สุ่มขึ้นมาสะเด็ดน้ำบน

ตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งน้ำหนักแห้งของแต่ละชั้น จากนั้นนำแต่ละชั้นมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณความชื้น (ดังแสดงในข้อ 3.6.1.2.2) แบบแยกแต่ละชั้นพร้อมจดบันทึกทุกค่าที่วัดได้ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยชั้นตอนแสดงดังภาพที่ 10 จากนั้นวิเคราะห์การแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมิ้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.6.1.3.2 การศึกษาผลของการแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นต่อจลนพลศาสตร์การออสโมซิส

การศึกษาค้นคว้าผลของการแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นต่อจลนพลศาสตร์การออสโมซิส โดยนำค่าน้ำหนักและปริมาณความชื้นของชั้นมะม่วงในแต่ละจุดๆ ละ 3 ชั้น ที่ถูกเก็บทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลาที่ 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที สำหรับแต่ละหริตเมนต์ที่ได้จากการศึกษาการในข้อ 3.6.1.3.2 มาคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการที่เลือกใช้เป็นสมการของพีเลจ (Peleg's) (Kowalska et al., 2019) ซึ่งจะเป็นการคำนวณจากปริมาณน้ำในชั้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) และปริมาณของแข็งในชั้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ดังสมการ

$$NWC = \frac{(1-S_t) \times m_t}{(1-S_0) \times m_0} \quad (4)$$

$$NSC = \frac{S_t \times m_t}{S_0 \times m_0} \quad (5)$$

เมื่อให้ S_0 = ปริมาณวัตถุแห้งเริ่มต้น (g/g)

S_t = ปริมาณวัตถุแห้งหลังแช่ในสารละลายออสโมติกที่แต่ละเวลา (g/g)

m_0 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

m_t = น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่ในสารละลายออสโมติกที่แต่ละเวลา (g)

ตารางที่ 4 การเตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส น้ำหนัก 500 กรัม

| Treatment | Water (g) | Sucrose (g) | Glucose (g) | Fructose (g) | Psicose (g) |
|-----------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 30°Brix | | | | | |
| Sucrose | 350.00 | 150.00 | - | - | - |
| Glucose | 331.46 | - | 168.54 | - | - |
| Fructose | 345.36 | - | - | 154.64 | - |
| Psicose | 343.75 | - | - | - | 156.25 |
| 40°Brix | | | | | |
| Sucrose | 300.00 | 200.00 | - | - | - |
| Glucose | 275.28 | - | 224.72 | - | - |
| Fructose | 293.81 | - | - | 206.19 | - |
| Psicose | 291.67 | - | - | - | 208.33 |
| 50°Brix | | | | | |
| Sucrose | 250.00 | 250 | - | - | - |
| Glucose | 219.10 | - | 280.90 | - | - |
| Fructose | 242.27 | - | - | 257.73 | - |
| Psicose | 239.58 | - | - | - | 260.42 |

ชิ้นมะม่วงที่เตรียมไว้



แช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส ที่ระดับความเข้มข้น
30, 40 และ 50 °Brix ดังแสดงใน

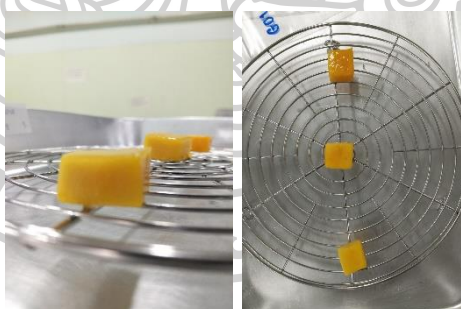
ตารางที่ 4

ความคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ



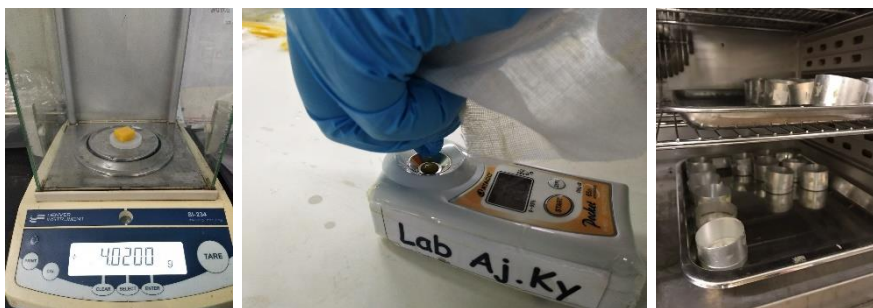
↓

สุ่มขึ้นมาวางจากถาดชั้นมาสะเด็ดน้ำกล่องละ 3 ชิ้น ทุกๆ 30 นาที จนครบ 240 นาที



↓

ชั่งน้ำหนักแต่ละชิ้น วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และวัดปริมาณความชื้น



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการศึกษาการแพร่ของสารละลายน้ำตาลไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมิ้น

3.6.1.4 การศึกษาปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคสในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกชนิดเดี่ยวที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix

ทำการศึกษาเช่นเดียวกับในข้อ 3.6.1.3 โดยแช่ชั้นมะม่วงในสารละลายออสโมติกที่เตรียมใน

ตารางที่ 4 เมื่อนำชั้นมะม่วงที่สุ่มขึ้นมาสะอาดตัดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแต่ละชิ้น จากนั้นนำชั้นมะม่วงทุกชิ้นไปสกัดน้ำตาลเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคสด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (ดังแสดงในข้อ 3.6.1.2.2)

3.6.2 การศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

3.6.2.1 การเตรียมตัวอย่างชั้นมะม่วงแก้วขมิ้น

นำผลมะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้นที่ผ่านการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งมีลักษณะเนื้อเหลืองแข็ง มี TSS อยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix มาเตรียมด้วยวิธีการเดียวกันกับในข้อ 3.6.1.1 และสุ่มตัวอย่างผลละ 10 ชิ้น (ด้านละ 5 ชิ้น) ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเริ่มต้น

3.6.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของมะม่วงสดที่ใช้ในการศึกษา

นำตัวอย่างที่สุ่มไว้ผลละ 10 ชิ้น ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักวัตถุดิบและค่าสีเช่นเดียวกับในข้อ 3.6.1.2.1 และคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำตาลซูโครส

กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงเช่นเดียวกับในข้อ 3.6.1.2.2

3.6.2.3 การศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

3.6.2.3.1 การศึกษาระยะเวลาที่เกิดสมมูลของการแพร่

เตรียมสารละลายออสโมติกน้ำตาลผสมที่ถูกทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ในอัตราส่วน 70:30, 80:20 และ 90:10 (%w/w) ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยกำหนดให้สารละลายมีค่า TSS เท่ากับ 30 °Brix จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 3.6.1.3.1 โดยนำชิ้นมะม่วง แช่ในสารละลายน้ำตาลผสมทรีตเมนต์ ละ 24 ชิ้น อัตราส่วนชิ้นมะม่วงต่อสารละลายน้ำตาลเท่ากับ 1:2 โดยน้ำหนัก ความคุมสภาวะการทดลองที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการสุ่มชิ้นมะม่วงจำนวน 3 ชิ้น ขึ้นมาสะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแต่ละชิ้น วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และปริมาณความชื้น (ดังวิธีการแสดงในข้อ 3.6.1.2.2) แบบแยกแต่ละชิ้นพร้อมจดบันทึกทุกค่าที่วัดได้ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ขึ้นตอนแสดงดังภาพที่ 10

ตารางที่ 5 การเตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ความเข้มข้น 30 °Brix น้ำหนัก 500 กรัม

| Treatment | Water (g) | Sucrose (g) | Glucose (g) | Fructose (g) | Psicose (g) |
|--------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 70:30 (%w/w) | | | | | |
| Su:Glu | 314.44 | 135.00 | 50.56 | - | - |
| Su:Fruc | 318.61 | 135.00 | - | 46.39 | - |
| Su:Psi | 318.13 | 135.00 | - | - | 46.88 |
| 80:20 (%w/w) | | | | | |
| Su:Glu | 331.29 | 135.00 | 33.71 | - | - |
| Su:Fruc | 334.07 | 135.00 | - | 30.93 | - |
| Su:Psi | 333.75 | 135.00 | - | - | 31.25 |
| 90:10 (%w/w) | | | | | |
| Su:Glu | 348.15 | 135.00 | 16.85 | - | - |

| Treatment | Water (g) | Sucrose (g) | Glucose (g) | Fructose (g) | Psicose (g) |
|-----------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Su:Fruc | 349.54 | 135.00 | - | 15.46 | - |
| Su:Psi | 349.38 | 135.00 | - | - | 15.63 |

Su หมายถึง น้ำตาลซูโครส

Glu หมายถึง น้ำตาลกลูโคส

Fruc หมายถึง น้ำตาลฟรุกโตส

Psi หมายถึง น้ำตาลไซโคส



3.6.2.3.2 การศึกษาผลของการแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นต่อจลนพลศาสตร์การออสโมซิส

นำค่าน้ำหนักและปริมาณความชื้นของชิ้นมะม่วงในแต่ละจุดๆ ละ 3 ชิ้น ที่ถูกเก็บทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลาที่ 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที สำหรับแต่ละทรีตเมนต์ที่ได้จากการศึกษาการในข้อ 3.6.2.3.1 มาคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการที่เลือกใช้เป็นสมการของ Peleg (Kowalska et al., 2019) เช่นเดียวกับในข้อ 3.6.1.3.2

3.6.2.4 การศึกษาปริมาณน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่น ในชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ศึกษาในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix

ทำการศึกษาเช่นเดียวกับในข้อ 3.6.1.4 โดยแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายออสโมติกที่เตรียมในตารางที่ 5 เมื่อนำชิ้นมะม่วงที่สุ่มขึ้นมาสะอาดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแต่ละชิ้น จากนั้นนำชิ้นมะม่วงทุกชิ้นไปสกัดน้ำตาล เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (ดังแสดงในข้อ 3.6.1.2.2)

3.6.3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติของวัตถุดิบ ในการศึกษาครั้งนี้วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงแก้วขมิ้นแต่ละชุดการทดลอง โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) โดยกำหนดให้ block คือ ชุดการทดลอง เนื่องจากมีความแตกต่างของช่วงเวลาในการศึกษา ประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม IBM SPSS statistics 23.0 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุล ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลชนิดเดียว

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ศึกษา

มะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษามีจำนวน 6 ชุดการทดลอง ก่อนนำมาศึกษามะม่วงแต่ละผลจากแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาศึกษาเพื่อควบคุมวัตถุดิบเริ่มต้นให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของมะม่วงแก้วขมิ้นอยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix แสดงดังตารางที่ 6 สำหรับคุณภาพทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้คือค่าสีของชิ้นมะม่วง ค่าความสว่างหรือ L* อยู่ในช่วง 64.45 – 70.19 ค่าความเป็นสีเหลืองหรือ b* อยู่ในช่วง 52.76 – 68.80 และค่ามุมของสีหรือ Hue angle อยู่ในช่วง 75.74° – 82.26° ซึ่งใกล้เคียงกับ 90° แสดงถึงความเป็นสีเหลือง

สำหรับคุณภาพทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่กำหนดมีค่า 17.0 – 17.6 °Brix ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วง 3.34 – 3.89 โดยมีค่าปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้แตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.74 – 1.29 และมีค่าปริมาณความชื้นฐานเปียกแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วงร้อยละ 77.60 – 83.82 ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณภาพเริ่มต้นของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการแพร่ และระยะเวลาในการแพร่ ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกชนิดเดียว

| Parameter | สำหรับสารทดลองที่ระดับ 40 °Brix | | | ชุดการทดลอง 50 °Brix | | | ชุดการทดลอง 30 °Brix | | |
|--|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|--|--|
| | ชุดการทดลองที่ 1 | ชุดการทดลองที่ 2 | ชุดการทดลองที่ 3 | ชุดการทดลองที่ 4 | ชุดการทดลองที่ 5 | ชุดการทดลองที่ 6 | | | |
| Color | | | | | | | | | |
| L* | 67.10±2.72 ^{ab} | 64.45±6.70 ^b | 65.97±3.98 ^b | 70.19±3.24 ^a | 65.28±4.52 ^b | 65.99±4.48 ^b | | | |
| a* | 15.46±2.49 ^{ab} | 14.11±2.04 ^c | 10.44±1.81 ^d | 7.22±1.32 ^e | 16.69±2.15 ^a | 14.86±1.94 ^{bc} | | | |
| b* | 60.53±3.40 ^b | 60.02±3.78 ^b | 56.56±2.37 ^c | 52.76±3.76 ^d | 68.80±4.69 ^a | 60.62±3.30 ^b | | | |
| Hue angle | 75.74±1.70 ^c | 76.71±2.20 ^c | 79.58±1.49 ^b | 82.26±0.95 ^a | 76.40±1.31 ^c | 76.27±1.27 ^c | | | |
| Chroma | 62.49±3.80 ^b | 61.70±3.62 ^b | 57.53±2.58 ^c | 53.26±3.89 ^d | 70.82±4.91 ^a | 62.44±3.58 ^b | | | |
| Total soluble solid (TSS) ^{ns} | 17.24±1.27 | 17.56±0.71 | 17.20±0.26 | 17.20±0.33 | 17.19±0.24 | 17.11±0.34 | | | |
| Total sugar (mg/g dry solid) | 417.77±137.80 ^b | 361.71±60.58 ^{bc} | 311.99±71.96 ^{bc} | 618.23±205.48 ^a | 332.64±58.98 ^{bc} | 250.94±48.71 ^c | | | |
| Fructose content (mg/g dry solid) | 113.37±30.49 ^{bc} | 128.23±34.93 ^b | 83.16±25.89 ^{cd} | 221.53±61.76 ^a | 135.94±27.92 ^b | 72.22±19.49 ^d | | | |
| Glucose content (mg/g dry solid) ^{ns} | 75.37±136.16 | 52.06±46.10 | 32.38±28.31 | 47.87±25.12 | 39.88±21.57 | 30.96±15.32 | | | |
| Sucrose content (mg/g dry solid) | 229.03±35.22 ^b | 181.43±25.76 ^{bc} | 196.45±46.55 ^{bc} | 348.83±135.93 ^a | 156.81±43.48 ^{bc} | 147.76±41.70 ^c | | | |
| pH | 3.89±0.33 ^a | 3.71±0.20 ^{ab} | 3.61±0.26 ^b | 3.34±0.10 ^c | 3.83±0.18 ^a | 3.41±0.04 ^c | | | |
| Titration acidity (% citric acid) | 1.34±0.28 ^a | 0.82±0.17 ^c | 1.23±0.21 ^a | 1.29±0.12 ^a | 0.92±0.15 ^c | 1.04±0.17 ^b | | | |
| Moisture content (%) | 82.31±1.62 ^{ab} | 78.72±2.13 ^c | 82.76±1.53 ^a | 81.22±0.90 ^{ab} | 80.90±2.05 ^b | 77.60±2.35 ^c | | | |

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.1.2 ผลของการศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix

การแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้นที่ 30, 40 และ 50 °Brix ไปยังชั้นมะม่วงแก้วขมั้น พบว่า ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิดใช้เวลาในการแพร่แตกต่างกัน โดยสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 30 °Brix ภาพที่ 11 (ก) น้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลง 180, 150, 120 และ 120 นาที ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายแต่ละชนิดลดลงมาที่ 28.4, 27.7, 27.7 และ 27.4 °Brix ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชั้นมะม่วงเพิ่มขึ้นมาจาก 17.5 °Brix เป็น 21.5, 22.5, 21.6 และ 21.7 °Brix ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสเป็นน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลเท่ากัน แต่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส จึงทำให้การแพร่เข้าสู่สมดุลงเกิดขึ้นได้เร็วกว่า แต่เนื่องด้วยน้ำตาลฟรุคโตสเป็นน้ำตาลที่พบมากในผลไม้จึงทำให้การแพร่เข้าสู่สมดุลงเร็วกว่าน้ำตาลกลูโคสเล็กน้อย (Marani, Agnelli, & Mascheroni, 2007) ในขณะที่น้ำตาลไซโคสซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นอีพิเมอร์ (Epimer) กับน้ำตาลฟรุคโตสจึงทำให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำตาลฟรุคโตสมากที่สุด ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการแพร่เข้าสู่สมดุลงใกล้เคียงกันกับน้ำตาลฟรุคโตส (Sankat, Castaigne, & Maharaj, 1996) และเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Peleg's ตามวิธีของ (Kowalska et al., 2017) สามารถคำนวณปริมาณน้ำในชั้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) และปริมาณของแข็งในชั้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) เพื่ออธิบายการแพร่ของสารละลายน้ำตาลใน ภาพที่ 11 (ข) การแพร่ของสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้น 30 °Brix จะเห็นได้ว่าชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสเกิดการสูญเสียน้ำในชั้นตัวอย่างน้อยที่สุด ในขณะที่น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นมีการสูญเสียน้ำในตัวอย่างสูงกว่า โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายน้ำตาล ฟรุคโตสจะมีอัตราการสูญเสียน้ำมากกว่าน้ำตาล กลูโคส และไซโคส ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่าการสูญเสียน้ำในชั้นมะม่วงจะสอดคล้องกับการแพร่เข้าสู่สมดุลงของสารละลายน้ำตาลที่ความเข้มข้น 30 °Brix เช่นเดียวกับกับปริมาณของแข็งในชั้นมะม่วงที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองของ Peleg สามารถอธิบายได้ว่า น้ำตาลแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการแพร่ที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 7) โดยการแพร่จะเริ่มที่เวลา 30 – 60 นาที แรก และน้ำตาลแต่ละชนิดจะเริ่มมีพฤติกรรมคงที่ในเวลาต่างกัน โดยสมการนี้จะให้ค่า R^2 ที่ 0.9 ซึ่งทำให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับเวลา และเมื่อพิจารณาจากค่า k_1 ซึ่งแสดงถึงความเร็วในการแพร่ พบว่าค่า k_1 ของน้ำตาลซูโครสมีค่าที่ 30 °Brix มีค่าน้อยที่สุด ทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้เร็วที่สุด

สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 40 °Brix ภาพที่ 12 (ก) น้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลที่ 210, 150, 120 และ 120 นาที ตามลำดับ สารละลายแต่ละชนิดมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงมาที่ 37.2, 36.4, 36.5 และ 35.8 °Brix ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของซึ้นมะม่วงเพิ่มขึ้นมาจาก 17.6 °Brix เป็น 23.3, 25.5, 24.5 และ 25.4 °Brix ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพที่ 12 (ข) ซึ้นมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสเกิดการสูญเสียน้ำ โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสมีการสูญเสียน้ำน้อยที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายน้ำตาลฟรุคโตส กลูโคส และไซโคสมีการสูญเสียน้ำในปริมาณใกล้เคียงกัน

ในส่วนของสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้น 50 °Brix ภาพที่ 13 (ก) น้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุลที่ 210, 180, 150 และ 150 นาที ตามลำดับ สารละลายแต่ละชนิดมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงมาที่ 45.2, 44.9, 44.4 และ 43.6 °Brix ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของซึ้นมะม่วงเพิ่มขึ้นมาจาก 17.3 °Brix เป็น 26.7, 28.0, 28.2 และ 28.1 °Brix ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเพิ่มขึ้น จะเกิดการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกมีความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารลดลงได้ และที่สารละลายน้ำตาลความเข้มข้น 50 °Brix ภาพที่ 13 (ข) พบว่า อัตราการสูญเสียน้ำในซึ้นมะม่วงที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสในสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสลดลงซึ่งเป็นผลมาจากสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นมากจะมีความหนืดมากขึ้น (ตารางที่ 8) ทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่ผิวของซึ้นตัวอย่างมาขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำ และตัวถูกละลายในระหว่างกระบวนการออสโมซิสได้ (Marani et al., 2007) ทำให้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของน้ำตาลแต่ละชนิดเกิดขึ้นในเวลาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติจากการสร้างสมการการแพร่ของไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix

| Treatment | | ความเข้มข้น 30°Brix | | | ความเข้มข้น 40°Brix | | | ความเข้มข้น 50°Brix | | |
|-----------|-----|---------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|
| | | k ₁ | k ₂ | R ² | k ₁ | k ₂ | R ² | k ₁ | k ₂ | R ² |
| Sucrose | NWC | 0.101 | 23.023 | 0.9854 | 49.936 | 3.965 | 0.8246 | 325.764 | 3.583 | 0.8789 |
| | NSC | 4.661 | 0.837 | 0.9688 | 1.863 | 0.967 | 0.7174 | 3.623 | 0.846 | 0.6709 |
| Glucose | NWC | 1364.582 | 2.158 | 0.9475 | 78.017 | 3.188 | 0.9727 | 185.407 | 2.953 | 0.9653 |
| | NSC | 6.952 | 0.770 | 0.9828 | 3.453 | 0.904 | 0.7284 | 4.162 | 0.785 | 0.7572 |
| Fructose | NWC | 980.913 | 2.932 | 0.9227 | 84.511 | 3.112 | 0.9186 | 194.191 | 3.357 | 0.9825 |
| | NSC | 3.536 | 0.816 | 0.8913 | 5.349 | 0.913 | 0.8617 | 4.559 | 0.780 | 0.9808 |
| Psicose | NWC | 407.285 | 5.461 | 0.9423 | 46.282 | 3.311 | 0.8876 | 181.061 | 3.032 | 0.9574 |
| | NSC | 8.263 | 0.759 | 0.9667 | 4.935 | 0.873 | 0.7363 | 5.737 | 0.759 | 0.9253 |

ตารางที่ 8 ค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส

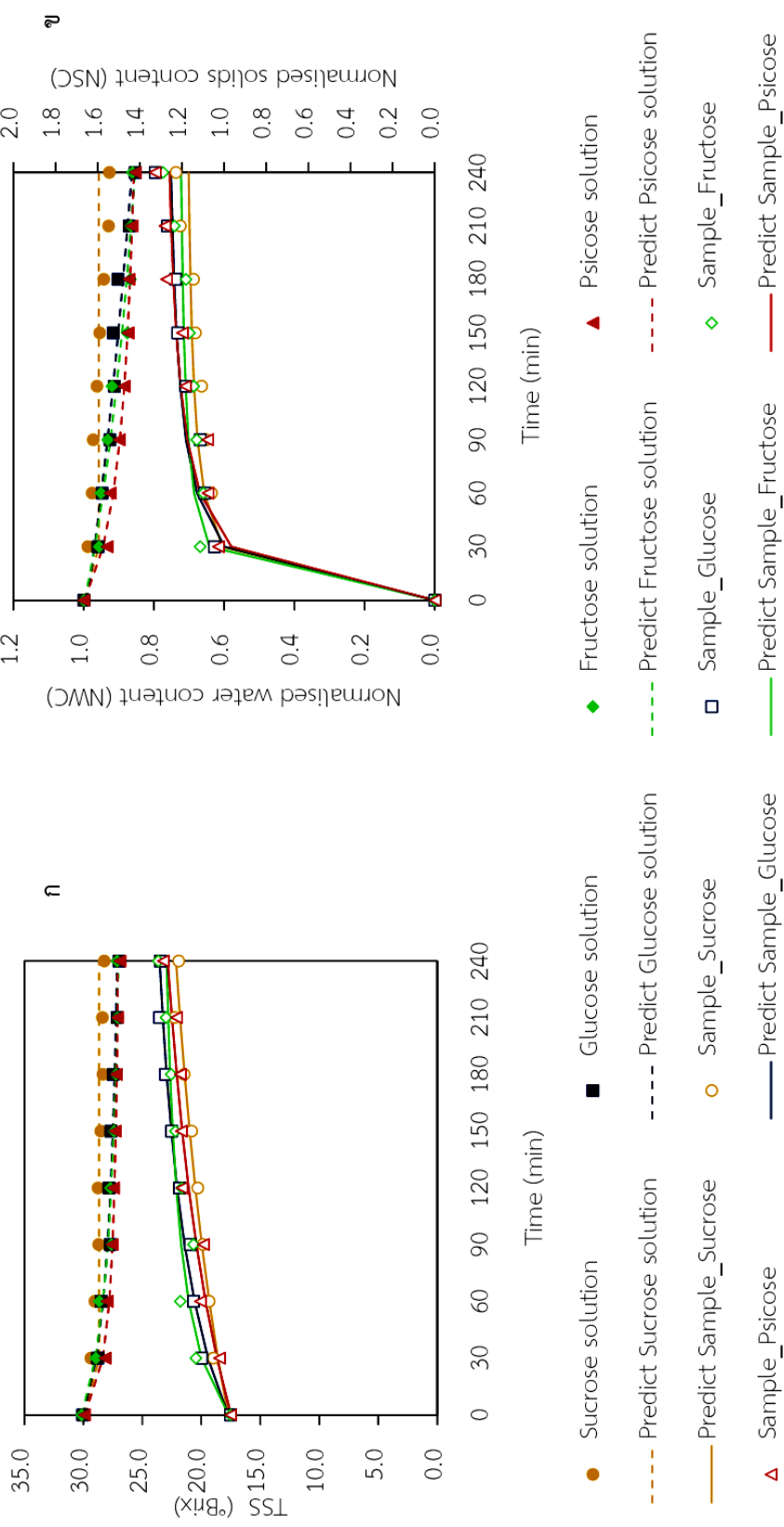
| ความเข้มข้นของ สารละลายน้ำตาล | ซูโครส (cP) | กลูโคส (cP) | ฟรุคโตส (cP) | ไซโคส (cP) |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 30 °Brix | 2.72±0.16 ^{aC} | 2.63±0.24 ^{aC} | 2.40±0.20 ^{bC} | 2.34±0.06 ^{bC} |
| 40 °Brix | 4.89±0.01 ^{aB} | 4.44±0.02 ^{bB} | 3.99±0.03 ^{cB} | 2.80±0.06 ^{dB} |
| 50 °Brix | 11.30±0.01 ^{aA} | 9.55±0.01 ^{bA} | 7.99±0.02 ^{cA} | 7.43±0.03 ^{dA} |

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ (p< 0.05)

เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ (p< 0.05)

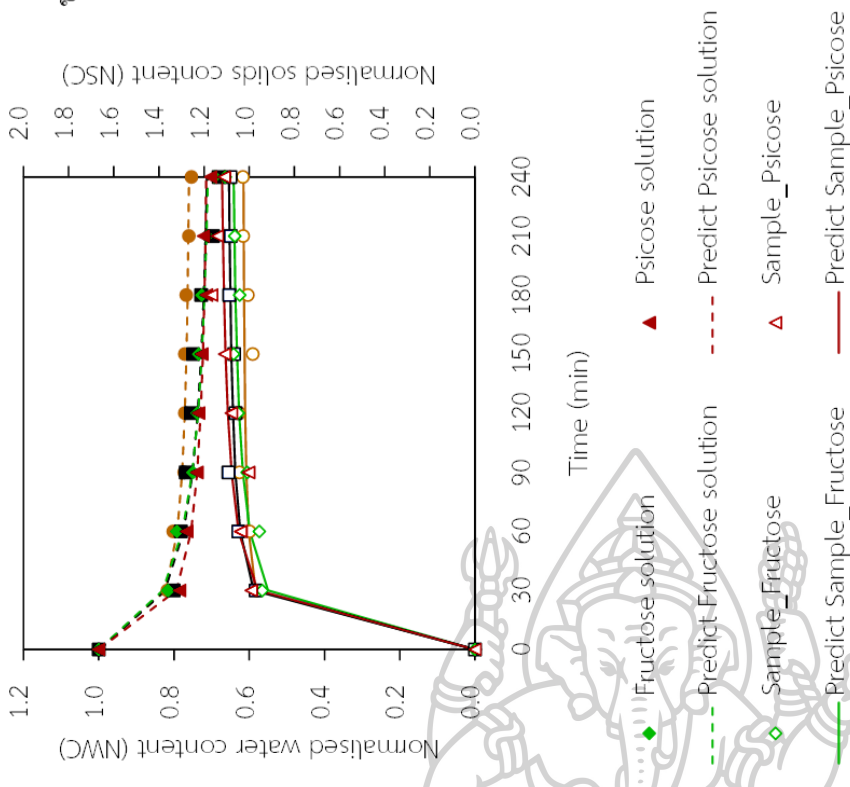
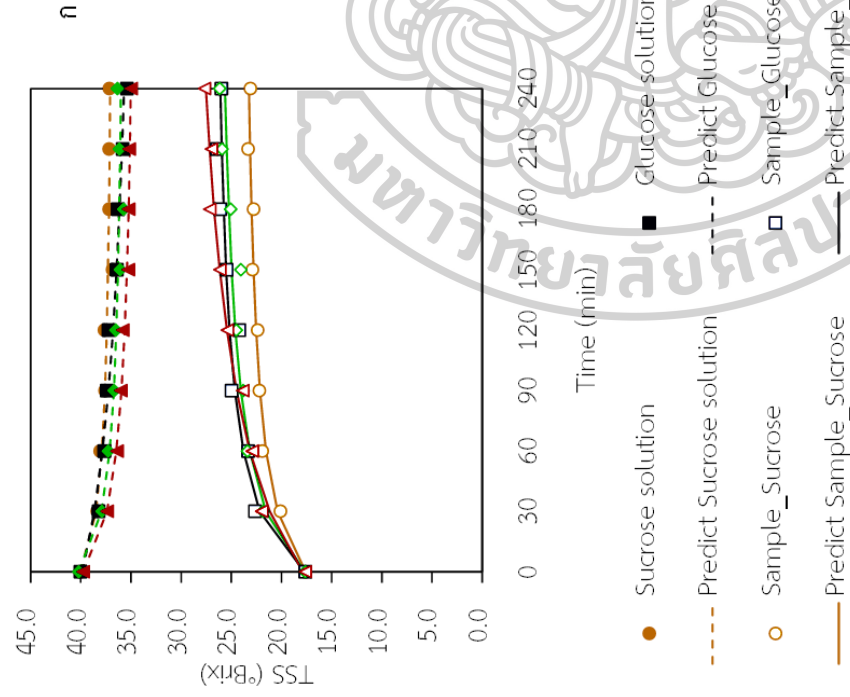
เมื่อเปรียบเทียบกันในแถวเดียวกัน



ภาพที่ 11 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโตสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 30 °Brix

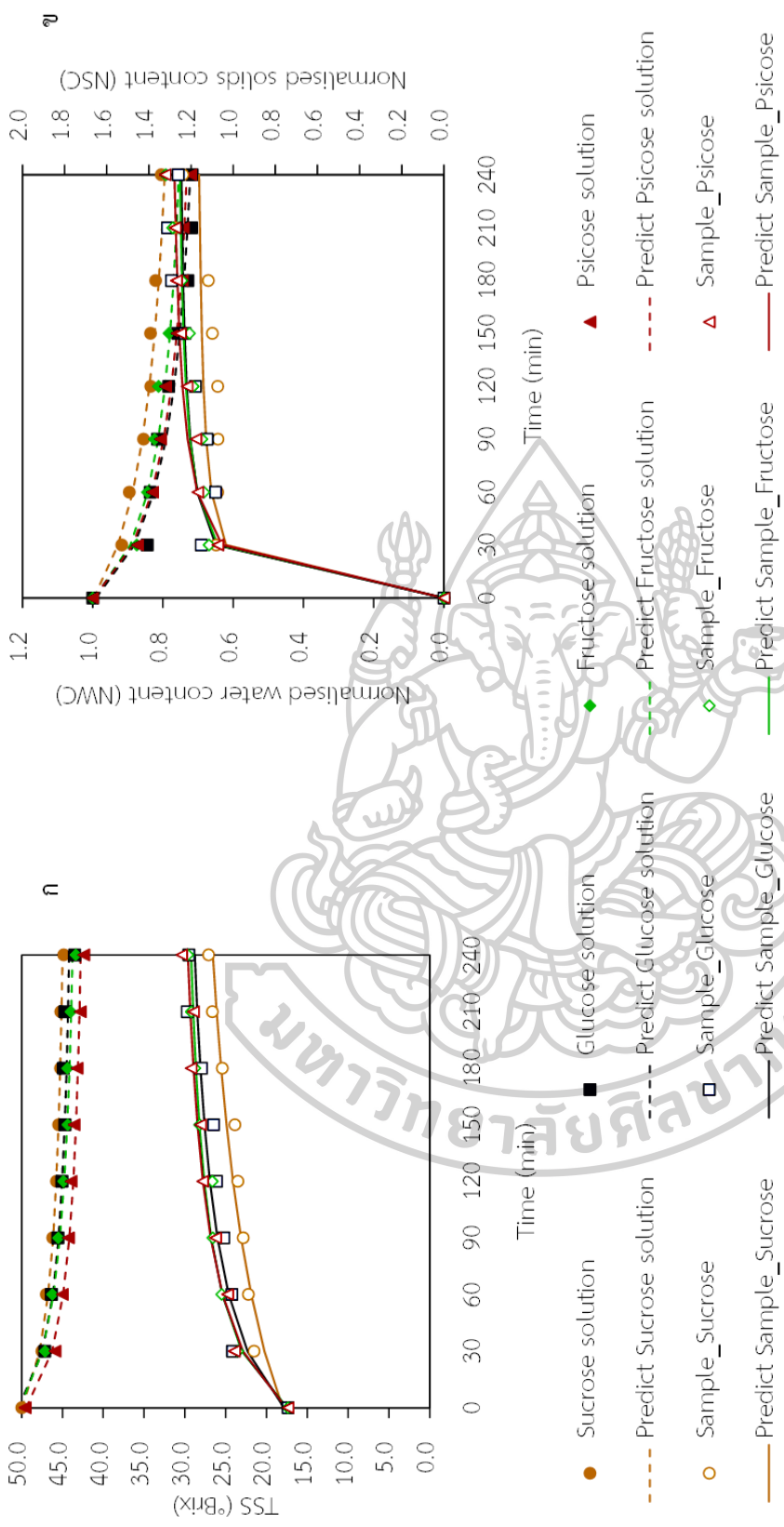
(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติกและซึ้มนมม่วงในระหว่างกาการเกิดสมมูลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์รูปร่างสี่เหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างซึ้มนมม่วง

(ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในซึ้มนมม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และปริมาณของแข็งในซึ้มนมม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์รูปร่างสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 12 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโตสรีบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 40 °Brix

- (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติกและขึ้นมะม่วงในระหว่างการเกิดสมดุลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สีทับ สีทับแสดงการเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์โปร่งใสแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างขึ้นมะม่วง
- (ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในขึ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สีทับ และปริมาณของแข็งในขึ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์โปร่งใส



ภาพที่ 13 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ที่ระดับความเข้มข้น 50 °Brix

(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาตรของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติก และซูโครสในระหว่างที่เกิดสมมูลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สี (สีที่บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์โปร่งใสแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างขึ้นมะม่วง)

(ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในขึ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สีที่บ และปริมาณของแข็งในขึ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์โปร่งใส

4.1.3 ผลการศึกษาปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกชนิดเดียวที่ระดับความเข้มข้น 30, 40 และ 50 °Brix

มะม่วงแก้วขมิ้นเป็นมะม่วงที่มีน้ำตาลโดยธรรมชาติอยู่แล้ว โดยมีปริมาณของน้ำตาลซูโครสมากที่สุด รองลงมาเป็นน้ำตาลฟรุคโตส และน้ำตาลกลูโคส ตามลำดับ และเมื่อนำมะม่วงแก้วขมิ้นสุกมาแช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้น โดยมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่ความเข้มข้น 30 °Brix (

ภาพที่ 17) จะเห็นได้ว่าชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสจะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วง 30 นาทีแรกแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) กับที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที จากนั้นปริมาณน้ำตาลซูโครสลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 150 นาที แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่เวลา 180, 210 และ 240 นาที ในขณะที่น้ำตาลกลูโคสถูกพบในปริมาณน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 180 นาที และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับปริมาณน้ำตาลกลูโคสในตัวอย่างเริ่มต้น เช่นเดียวกับกับน้ำตาลฟรุคโตสที่มีปริมาณลดลงในระหว่างการแช่ชั้นมะม่วงในสารละลายออสโมติก ซึ่งพบว่าชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่เวลา 150 นาที ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสน้อยกว่าตัวอย่างเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

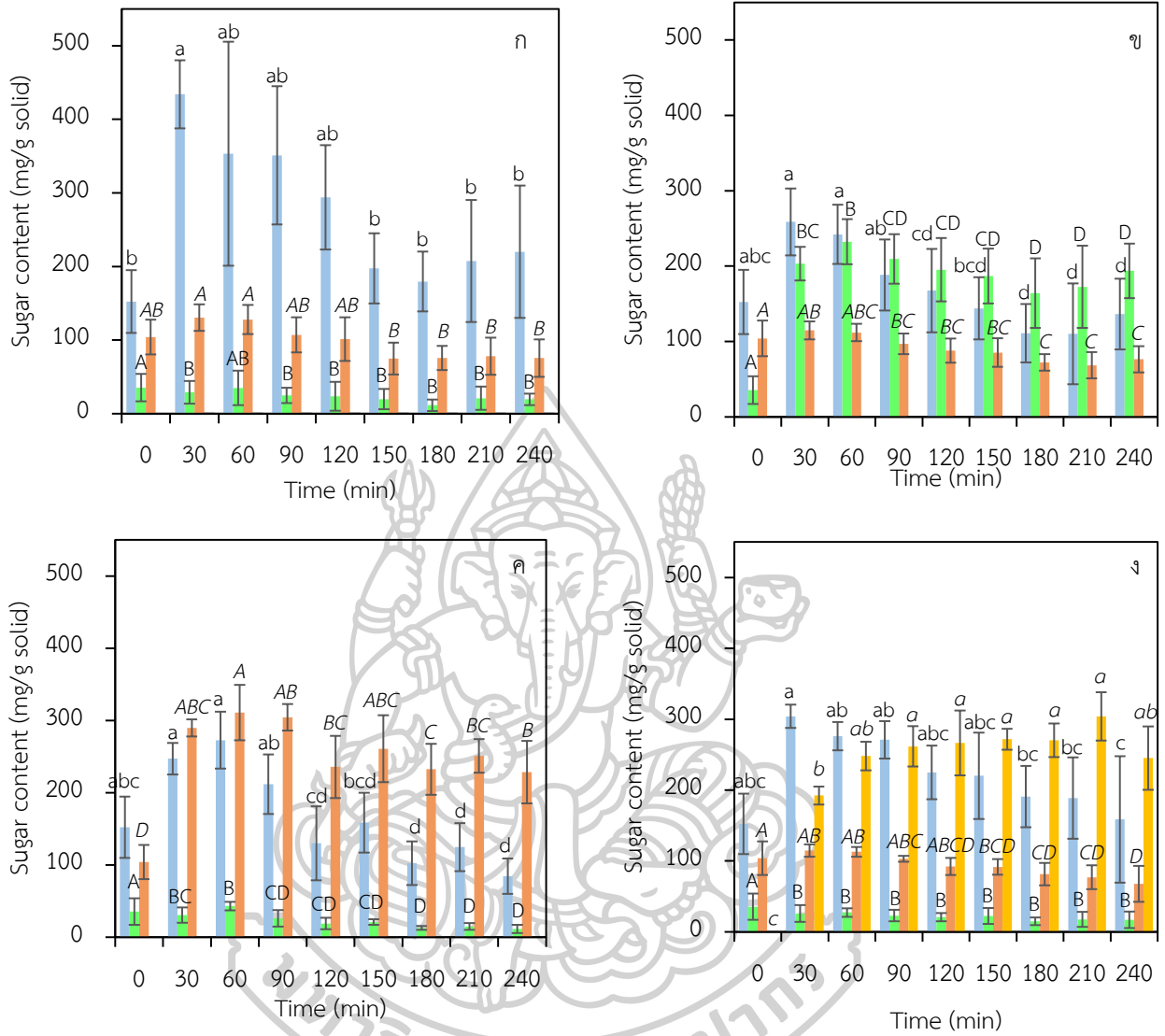
สำหรับชั้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 30 °Brix ใน ภาพที่ 14 (ข) จะมีปริมาณน้ำตาลน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้น ปริมาณน้ำตาลซูโครสจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 60 นาทีแรกและค่อยๆ ลดลงจนมีปริมาณต่ำสุดที่เวลา 180 นาที ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสจะลดลงจากตัวอย่างเริ่มต้นตั้งแต่วเวลา 90 นาทีเป็นต้นไป

ในส่วนของชั้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายน้ำตาลฟรุคโตสความเข้มข้น 30 °Brix ภาพที่ 15 (ค) มีปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเริ่มต้นในช่วง 90 นาทีแรก และลดลงมาเพียงเล็กน้อยในช่วงท้าย ส่วนน้ำตาลซูโครสและกลูโคสมีปริมาณเพิ่มขึ้นในระยะแรก และลดลงจนคงที่

ความสามารถในการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเข้าไปในชั้นมะม่วง สังเกตได้จากชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลไซโคสที่ความเข้มข้น 30 °Brix ภาพที่ 16 (ง) มีปริมาณน้ำตาลไซโคสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่น้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโตสมีปริมาณเพิ่มขึ้นในระยะแรก และเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

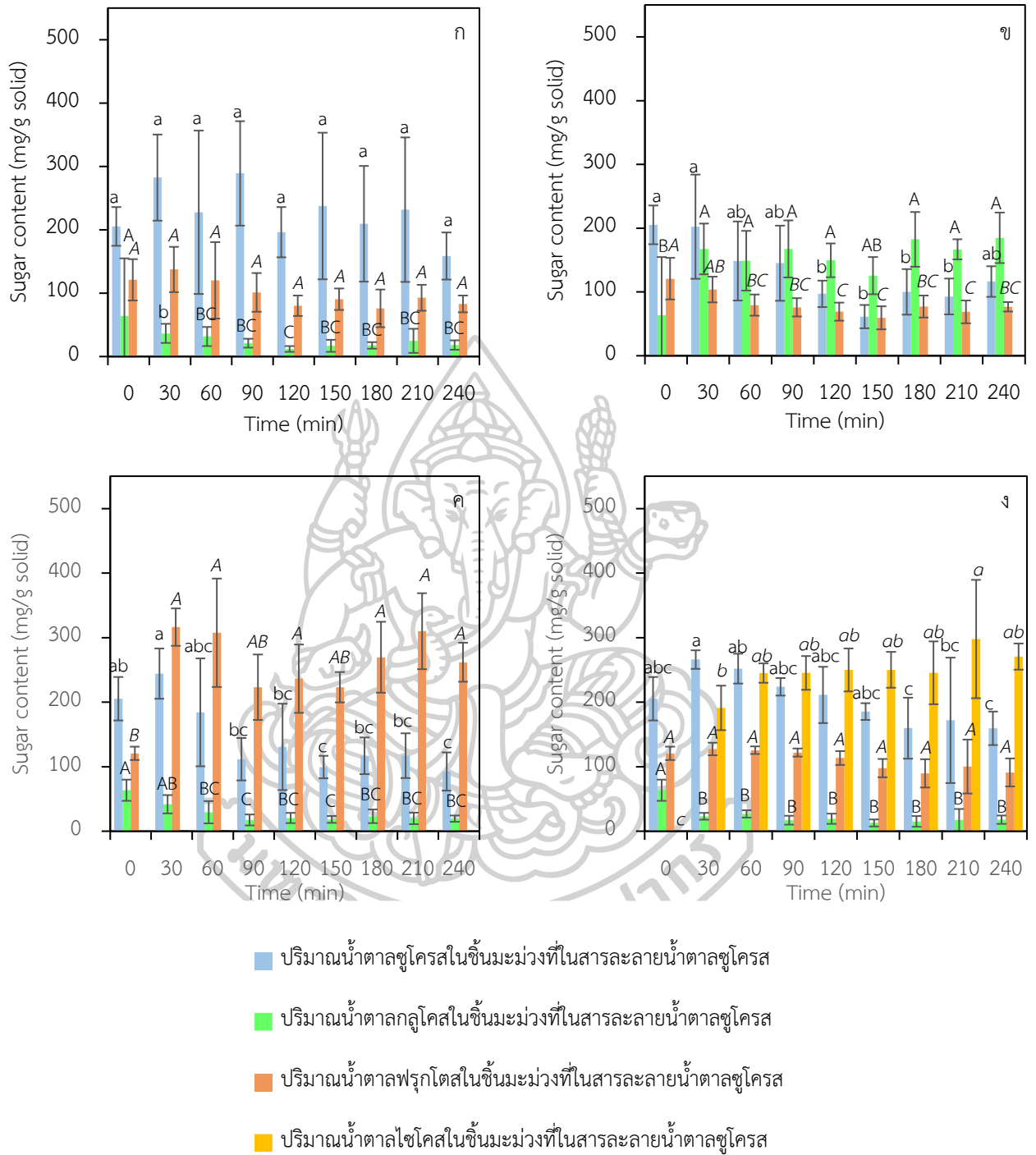
เมื่อทำการศึกษาปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่แช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 40 °Brix (ภาพที่ 18) และ 50 °Brix (ภาพที่ 19) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลไปในทางเดียวกันกับชั้นมะม่วงที่แช่ในสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 30 °Brix แต่จะพบปริมาณน้ำตาลชนิดต่างๆ ในปริมาณที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำตาลที่มีในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นแต่ไม่มีในสารละลายออสโมติกจะแพร่ออกมาสู่สารละลายออสโมติกหรือเกิดการถ่ายโอนมวลสารโดยน้ำตาลชนิดที่ไม่มีอยู่ในสารละลายออสโมติกจะแพร่ออกมาสู่สารละลายออสโมติกจนเกิดภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป เช่นเดียวกับการศึกษาของ (Kowalska et al., 2019) ซึ่งทำการศึกษาการแช่แอปเปิ้ลในสารละลายออสโมติกที่มีส่วนผสมของน้ำตาลแอลกอฮอล์ พบว่าในแอปเปิ้ลสดมีน้ำตาลฟรุกโตสอยู่มากที่สุด น้ำตาลซูโครส และกลูโคสน้อยกว่าตามลำดับ และเมื่อแช่แอปเปิ้ลในสารละลายน้ำตาลซูโครส ซึ่งในระหว่างกระบวนการออสโมติกปริมาณของน้ำตาลซูโครสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที และลดลงที่เวลา 360 นาที และลดลงไปอีกที่เวลา 1440 นาที ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่มีปริมาณที่ลดลงเนื่องจากน้ำตาลกลูโคสละลายไปกับน้ำในระบบในทางกลับกันปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเริ่มต้น แต่ในกรณีของน้ำตาลไซโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่ไม่ได้มีอยู่ในมะม่วงแก้วขมิ้นจึงไม่เกิดเหตุการณ์ที่น้ำตาลไซโคสจะออกมาละลายในน้ำเพื่อให้เกิดภาวะสมดุลได้ แต่เป็นการที่โมเลกุลของน้ำตาลไซโคสแพร่เข้าไปสู่ชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นจนเกิดภาวะสมดุล ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลไซโคสจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนระบบอยู่ในสภาวะสมดุล



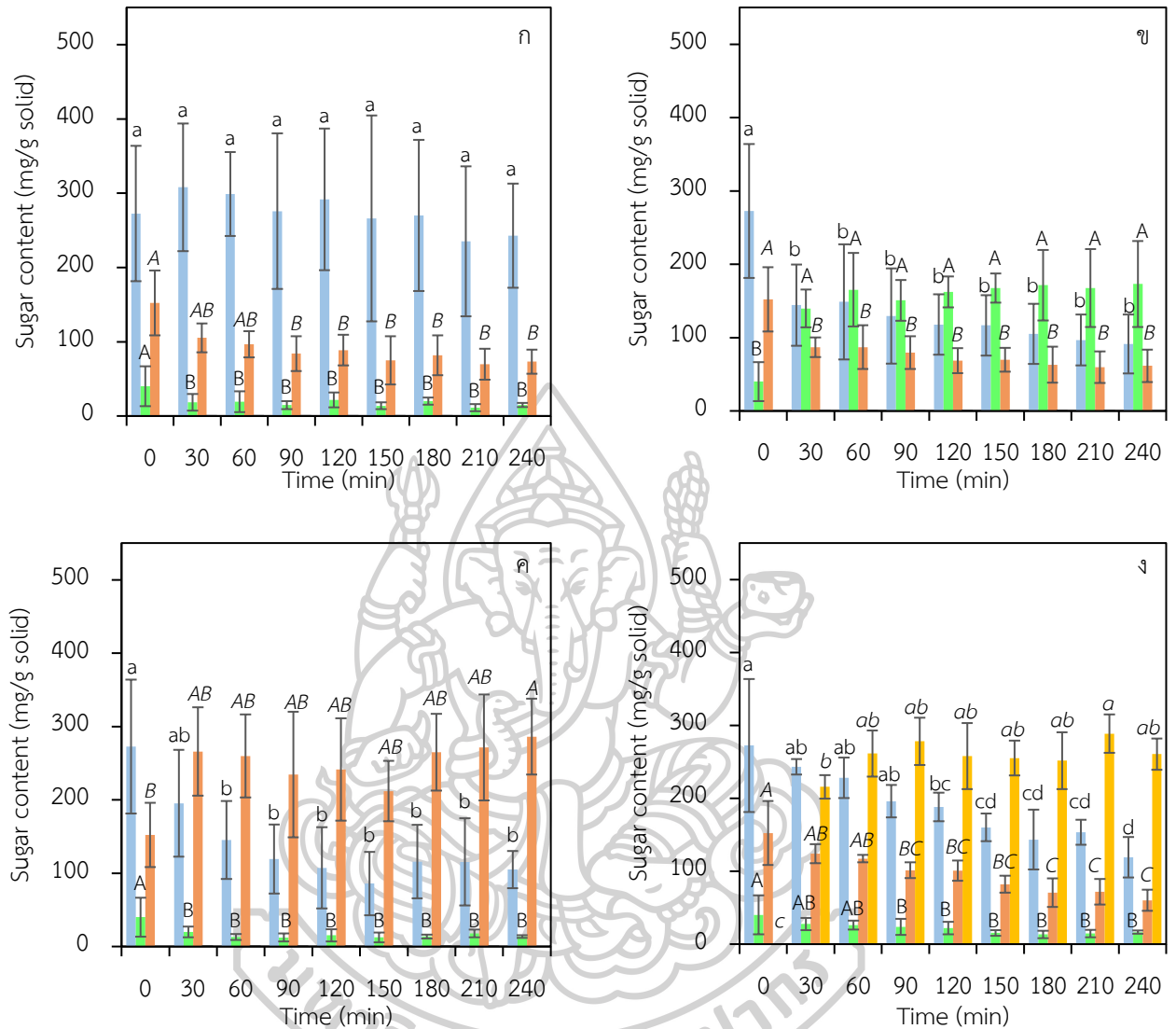


- ปริมาณน้ำตาลซูโครสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลไซโคสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส

ภาพที่ 17 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วมันที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุกโตส และ (ง) น้ำตาลไซโคสที่ความเข้มข้น 30 °Brix



ภาพที่ 18 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุกโตส และ (ง) น้ำตาลไซโคสที่ความเข้มข้น 40 °Brix



- ปริมาณน้ำตาลซูโครสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลกลูโคสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส
- ปริมาณน้ำตาลไซโคสในชั้นมะม่วงที่ในสารละลายน้ำตาลซูโครส

ภาพที่ 19 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วมันที่ผ่านการแช่ในสารละลาย (ก) น้ำตาลซูโครส (ข) น้ำตาลกลูโคส (ค) น้ำตาลฟรุกโตส และ (ง) น้ำตาลไซโคสที่ความเข้มข้น 50 °Brix

4.2 ผลการศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ศึกษา

มะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 2 ชุดการทดลอง มะม่วงแต่ละผลจากแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาศึกษาเพื่อควบคุมวัตถุดิบเริ่มต้นให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของมะม่วงแก้วขมิ้นอยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix แสดงดังตารางที่ 9 สำหรับคุณภาพทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้คือค่าสีของชิ้นมะม่วง ค่าความสว่างหรือ L* อยู่ในช่วง 62.16 – 62.35 ค่าความเป็นสีเหลืองหรือ b* อยู่ในช่วง 61.96 – 63.60 และค่ามุมของสีหรือ Hue angle อยู่ในช่วง 76.29° – 79.04° ซึ่งใกล้เคียงกับ 90° แสดงถึงความเป็นสีเหลือง

สำหรับคุณภาพทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 16.5 – 17.5 °Brix ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่กำหนดมีค่า 17.0 °Brix ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) อยู่ในช่วง 3.34 – 3.89 โดยมีค่าปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.74 – 1.29 และมีค่าปริมาณความชื้นฐานเปียกไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) อยู่ในช่วงร้อยละ 77.60 – 83.82 ดังแสดงในตารางที่ 9



ตารางที่ 9 คุณภาพเริ่มต้นของมะม่วงแก้วขมิ้นที่ใช้ในสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

| Parameter | ชุดการทดลองน้ำตาลผสม | |
|---|----------------------|---------------|
| | Lot 7 | Lot 8 |
| Color | | |
| L* ^{ns} | 62.35±4.13 | 62.16±3.28 |
| a* | 12.35±2.23 | 15.10±1.77 |
| b* | 63.60±4.60 | 61.96±3.30 |
| Hue angle | 79.04±1.66 | 76.29±1.58 |
| Chroma ^{ns} | 64.81±4.76 | 63.79±3.29 |
| Total soluble solid (TSS) ^{ns} | 16.99±0.39 | 16.99±0.36 |
| Total sugar (mg/g dry solid) | 582.27±102.42 | 642.61±102.86 |
| Fructose content (mg/ g dry solid) | 220.91±39.31 | 267.66±29.94 |
| Glucose content (mg/ g dry solid) ^{ns} | 40.32±20.95 | 51.64±323.31 |
| Sucrose content (mg/ g dry solid) ^{ns} | 301.04±70.74 | 323.31±82.70 |
| pH ^{ns} | 3.82±0.39 | 3.70±0.33 |
| Titrate acidity (% citric acid) ^{ns} | 0.74±0.24 | 0.75±0.23 |
| Moisture content (%) ^{ns} | 83.82±4.42 | 83.73±1.40 |

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.2.2 ผลการศึกษาสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

การแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม ที่ความเข้มข้น 30 °Brix พบว่า ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ ร้อยละ 10 ภาพที่ 20 (ก) ในสารละลายที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส ใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมมูล 180, 180 และ 180 นาที ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายแต่ละชนิดลดลงมาที่ 28.3, 28.7 และ 29.0 °Brix ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชั้นมะม่วงเพิ่มขึ้นมาจาก 17.0 °Brix เป็น 20.9, 20.7 และ 21.0 °Brix ตามลำดับ เนื่องจากระดับการทดแทนน้ำตาลซูโครสเพียงแค่ร้อยละ 10 เวลาที่ใช้ในการแพร่เข้าสู่สมมูลจึงไม่แตกต่างกัน และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดไม่ได้มีค่าต่างกันมาก ในส่วนของการแพร่ของสารละลายออสโมติกที่มีการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส ร้อยละ 10 (ภาพที่ 20 ข) จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำในชั้นมะม่วงมีการลดลงค่อนข้างน้อย และจะมีการลดลงของปริมาณน้ำในชั้นมะม่วงน้อยจนเกือบจะเป็นเส้นตรงตั้งแต่เวลา 30 นาทีแรก เนื่องมาจากการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลที่โมเลกุลเล็กกว่าทำให้การถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการออสโมซิส เกิดภาวะของการเข้าสู่สมมูลได้เร็วกว่าการใช้สารละลายออสโมติกที่มีน้ำตาลชนิดเดียว และเนื่องด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่าจึงทำให้เกิดแรงดันออสโมติกที่สูงขึ้น ยิ่งใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพิ่มขึ้นยิ่งทำให้การสูญเสียปริมาณน้ำ และการเพิ่มขึ้นของของแข็งเกิดขึ้นได้เร็ว (Marani et al., 2007) เมื่อพิจารณาจากค่า k_1 ของน้ำตาลไซโคสในตารางที่ 10 พบว่า มีค่าน้อยที่สุด ทำให้การแพร่เกิดได้เร็วที่สุด ดังนั้นในการเติมน้ำตาลชนิดอื่นลงไปจึงส่งผลกระทบต่อถ่ายโอนมวลในระหว่างกระบวนการออสโมซิส ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ (Kowalska et al., 2017) ที่มีการเติมน้ำโซคเบอรี่เข้มข้น และอินนูลินในการทดแทนน้ำตาลซูโครสในกระบวนการออสโมติกสตรอเบอรี่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อถ่ายโอนมวลสาร และยังช่วยเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ และนำไปสู่การใช้งานที่แตกต่างกัน โดยการใช้ น้ำโซคเบอรี่เข้มข้นจะเหมาะกับการแช่ในกระบวนการออสโมติก และการใช้อินนูลินเหมาะกับการแช่เพื่อเป็นอาหารแช่แข็ง

ในส่วนของการทดแทนน้ำตาลซูโครสในปริมาณที่มากขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ภาพที่ 21 (ก) พบว่า ในสารละลายที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส ใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมมูลแตกต่างกันที่ 150, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายแต่ละชนิดลดลงมา 27.7, 27.7 และ 27.8 °Brix ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชั้นมะม่วงเพิ่มขึ้นจาก 14.4 °Brix เป็น 19.8, 19.2 และ 20.4 °Brix ตามลำดับ เนื่องจากน้ำตาลที่ถูกนำมาทดแทนทั้ง 3 ชนิด เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีน้ำหนัก

โมเลกุลใกล้เคียงกันมากจึงเกิดการแพร่เข้าสู่สมดุในเวลาใกล้เคียงกัน แต่เนื่องด้วยน้ำตาลฟรุคโตส เป็นน้ำตาลที่พบมากในผลไม้โดยเฉพาะในมะม่วงจึงทำให้เกิดการแพร่เข้าสู่สมดุเร็วกว่าน้ำตาล กลูโคส และไซโคสเล็กน้อย โดยงานวิจัยของ (Uczciwek, 2008) พบว่า ลูกพลัมที่ผ่านการแช่ใน สารละลายน้ำตาลฟรุคโตสสามารถเกิดการแพร่เข้าสู่ชั้นลูกพลัมได้เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลาย น้ำตาลชนิดอื่น

เมื่อศึกษาที่ระดับร้อยละ 30 ภาพที่ 22 (ก) พบว่า ในสารละลายที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาล กลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส ใช้เวลาในการแพร่เข้าสู่สมดุแตกต่างกันขึ้นที่ 150, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงมา 28.5, 28.5 และ 29.8 °Brix ตามลำดับ และในขณะเดียวกันปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชั้นมะม่วงเพิ่มขึ้นจาก 16.7 °Brix เป็น 21.1, 21.2 และ 20.2 °Brix ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนน้ำตาลที่ถูกทดแทนในสารละลาย ออสโมติกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการแพร่เข้าสู่สมดุ และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในชั้นมะม่วงภาพที่ 22 มี ค่าลดลงตั้งแต่ 30 นาทีแรก และค่อยๆ ลดลงทีละน้อยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาจากค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาลแต่ละชนิด (ตารางที่ 11) พบว่า เมื่อเตรียมสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสที่ระดับความเข้มข้น เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่เมื่อเปรียบกับสารละลายน้ำตาลซูโครสที่เตรียมด้วย น้ำตาลชนิดเดียวจะสังเกตได้ว่าค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาลที่เตรียมด้วยน้ำตาลผสมที่มีค่า น้อยกว่าทำให้มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งทำให้สารละลายออสโมติกที่เตรียมด้วย สารละลายน้ำตาลผสมสามารถเข้าสู่สมดุได้เร็วกว่า เนื่องจากมีส่วนผสมของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ทำ ให้น้ำตาลสามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงได้ง่ายกว่า (Marani et al., 2007)

ตารางที่ 10 ค่าทางสถิติจากการสร้างสมการการแพร่ของน้ำตาล ในระบบที่มีการเตรียมสารละลาย
ออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม

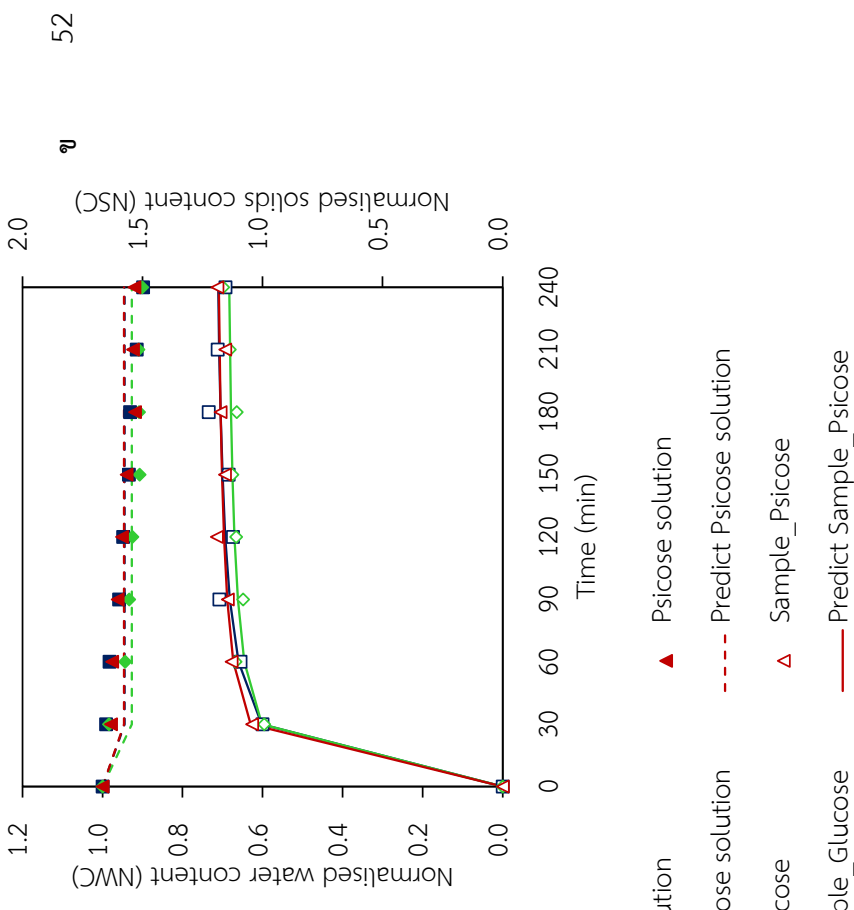
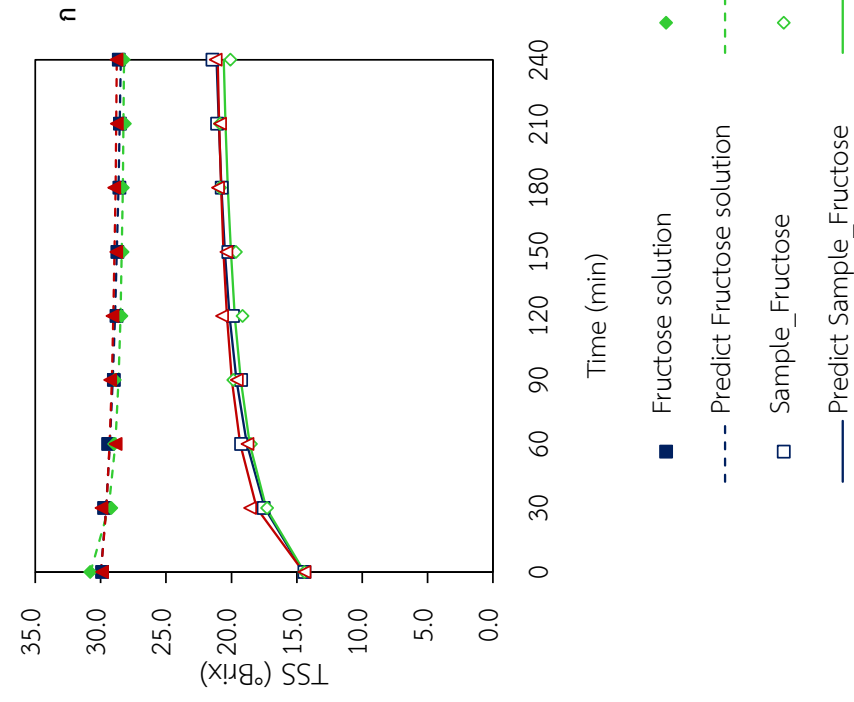
| Treatment | | น้ำตาลซูโครสร้อยละ 90 | | | น้ำตาลซูโครสร้อยละ 80 | | | น้ำตาลซูโครสร้อยละ 70 | | |
|-----------|-----|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|
| | | k_1 | k_2 | R^2 | k_1 | k_2 | R^2 | k_1 | k_2 | R^2 |
| Glucose | NWC | 0.100 | 18.047 | 0.9825 | 938.808 | 5.152 | 0.9278 | 0.101 | 20.805 | 0.9600 |
| | NSC | 5.236 | 0.822 | 0.7422 | 3.194 | 0.853 | 0.7280 | 2.658 | 0.899 | 0.8342 |
| Fructose | NWC | 0.102 | 13.633 | 0.8045 | 0.101 | 20.959 | 0.8211 | 0.103 | 15.192 | 0.9823 |
| | NSC | 4.102 | 0.861 | 0.7337 | 4.321 | 0.810 | 0.7368 | 5.808 | 0.839 | 0.9603 |
| Psicose | NWC | 0.102 | 18.701 | 0.9346 | 0.101 | 20.698 | 0.9861 | 0.101 | 23.617 | 0.9030 |
| | NSC | 3.636 | 0.831 | 0.7315 | 5.703 | 0.803 | 0.8656 | 5.378 | 0.860 | 0.8293 |

ตารางที่ 11 ค่าความหนืดสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคส

| ร้อยละของน้ำตาล ที่นำมาทดแทน | ซูโครส (cP) | ซูโครส:กลูโคส (cP) | ซูโครส:ฟรุคโตส (cP) | ซูโครส:ไซโคส (cP) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| ร้อยละ 10 | 2.72±0.16 ^a | 2.65±0.02 ^{ab} | 2.61±0.13 ^b | 2.61±0.13 ^b |
| ร้อยละ 20 | 2.72±0.16 ^a | 2.60±0.03 ^b | 2.55±0.20 ^b | 2.54±0.20 ^b |
| ร้อยละ 30 | 2.72±0.16 ^a | 2.58±0.06 ^b | 2.58±0.08 ^b | 2.49±0.16 ^c |

หมายเหตุ: ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

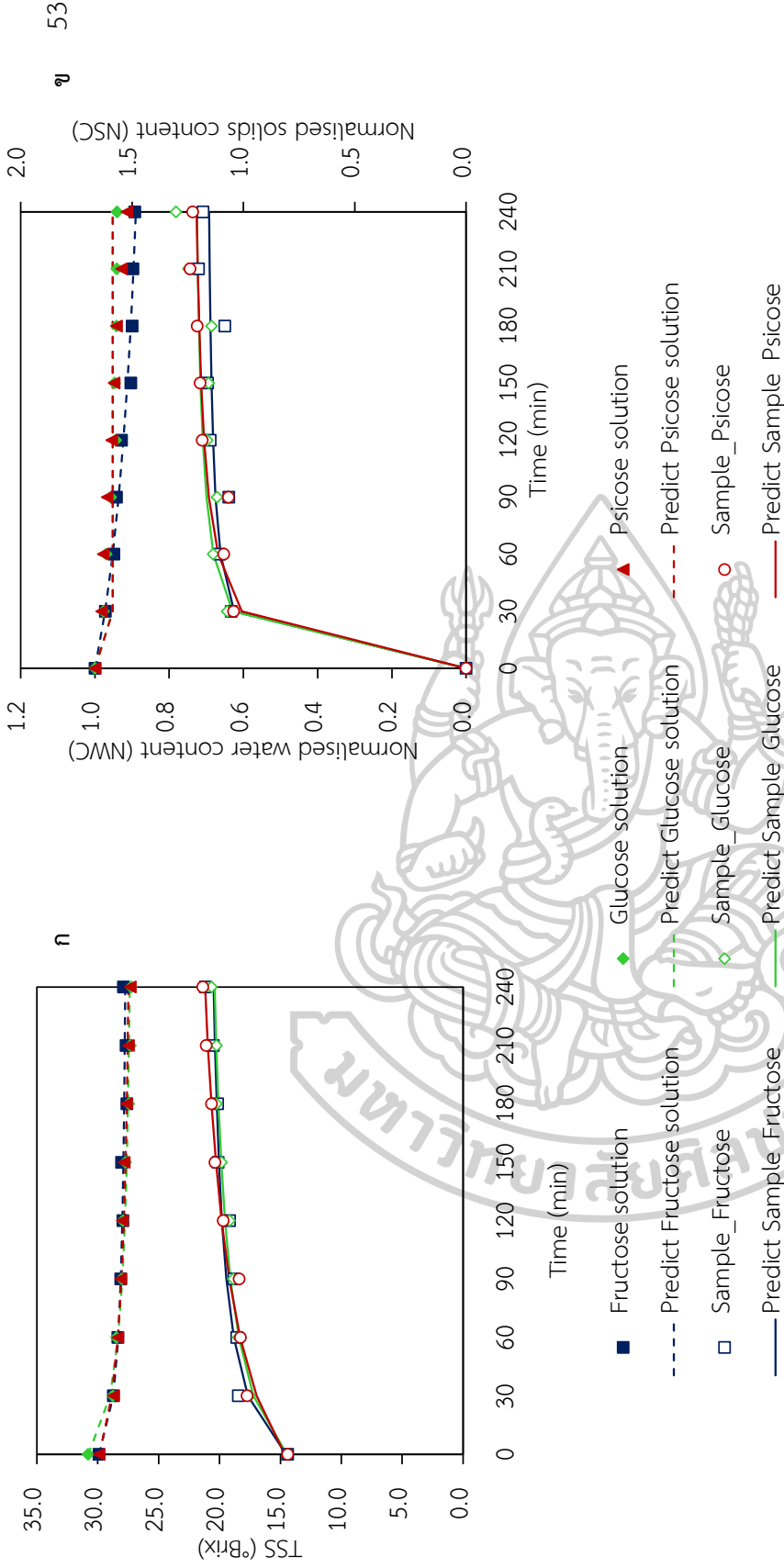
เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน



ภาพที่ 20 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโตสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ 10 ความเข้มข้น 30 °Brix

(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติกและซีรัมในช่วงระยะเวลาของการเกิดสมมูลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์วงรีแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างซีรัม

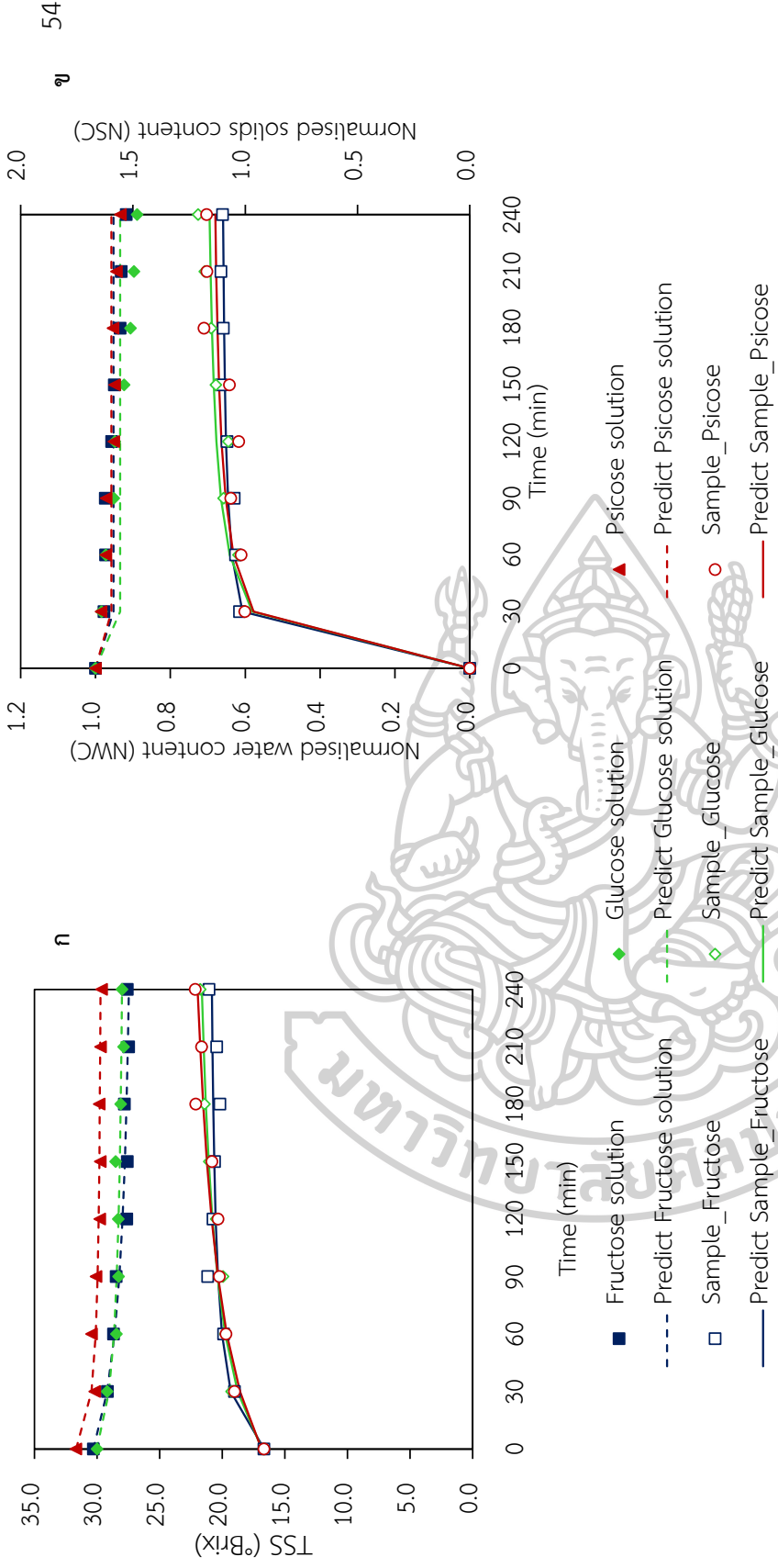
(ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในซีรัมในช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และปริมาณของแข็งในซีรัมในช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์วงรี



ภาพที่ 21 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ 20 ความเข้มข้น 30 °Brix

(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติกและซีรัมในช่วงระยะเวลาของการเกิดสมมูลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์วงรีแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างซีรัมมะม่วง

(ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในซีรัมมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และปริมาณของแข็งในซีรัมมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์วงรี



ภาพที่ 22 แสดงสมมูลของการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 30 ความเข้มข้น 30 °Brix

(ก) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของสารละลายออสโมติกและซีรัมมะม่วงในระหว่างที่เกิดสมมูลของการแพร่ โดยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงการเปลี่ยนแปลงในสารละลายออสโมติก และสัญลักษณ์วงรีแสดงการเปลี่ยนแปลงในตัวอย่างซีรัมมะม่วง

(ข) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงปริมาณน้ำในซีรัมมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized water content: NWC) โดยใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และปริมาณของแข็งในซีรัมมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา (Normalized solids content: NSC) ใช้สัญลักษณ์วงรี

4.2.3 ผลของการศึกษาปริมาณน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่น ในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ศึกษาในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสมที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix

ในการศึกษาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสร้อยละ 10, 20 และ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix พบว่า ในการทดแทนน้ำตาลซูโครสร้อยละ 10 ชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคส (ภาพที่ 23 ก) มีปริมาณน้ำตาลซูโครสที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ถูกทดแทนเข้ามามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นตั้งแต่ 30 นาทีแรก ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจน ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสมีการเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

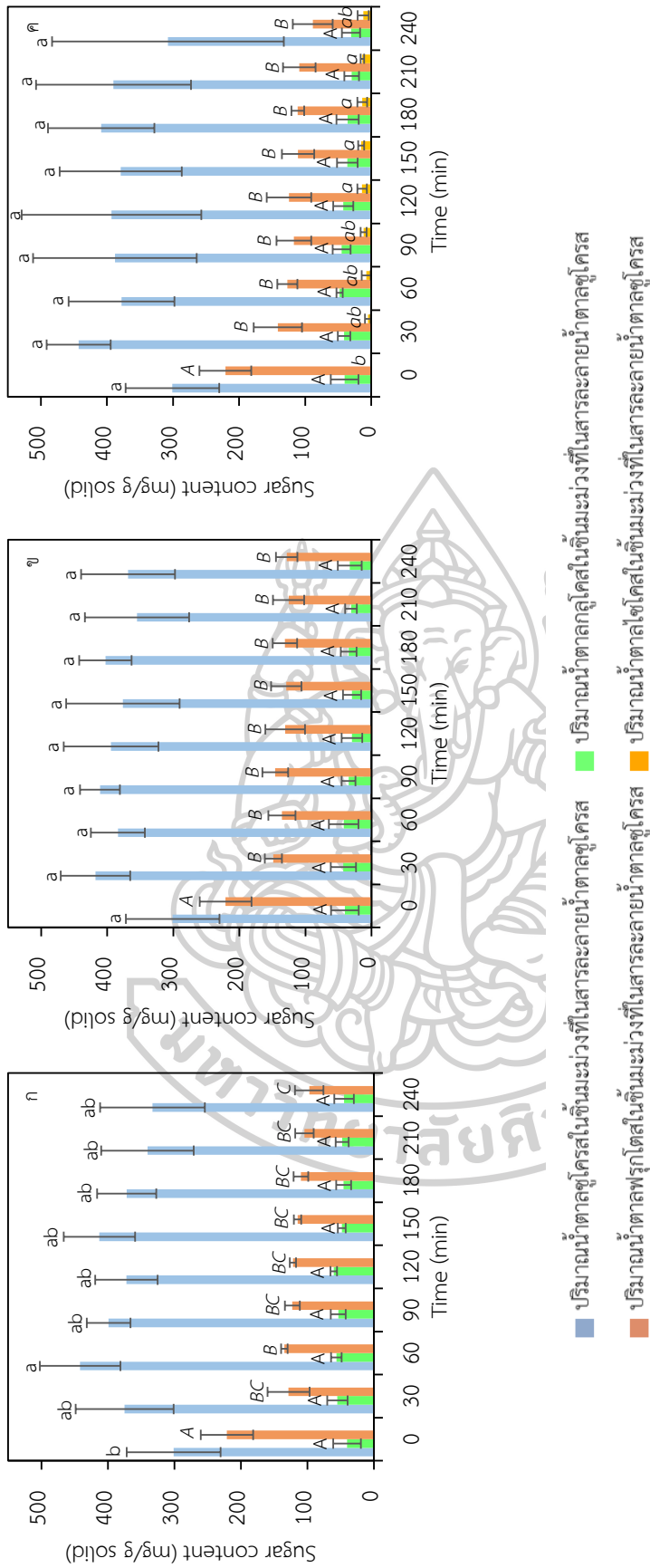
สำหรับชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลฟรุคโตส (ภาพที่ 23 ข) จะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30 นาทีแรกอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และหลังจากนั้นมีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับกับปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสที่เพิ่มขึ้นที่เวลา 30 นาทีแรกและคงที่ และจะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในส่วนของปริมาณน้ำตาลกลูโคสตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 240 นาทีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ส่วนในการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลไซโคส (ภาพที่ 23 ค) มีปริมาณน้ำตาลซูโครสเพิ่มขึ้นในเวลา 30 นาทีแรกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) และปริมาณน้ำตาลไซโคสสามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงอย่างชัดเจน โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่น้ำตาลชนิดอื่นไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากปริมาณเริ่มต้น

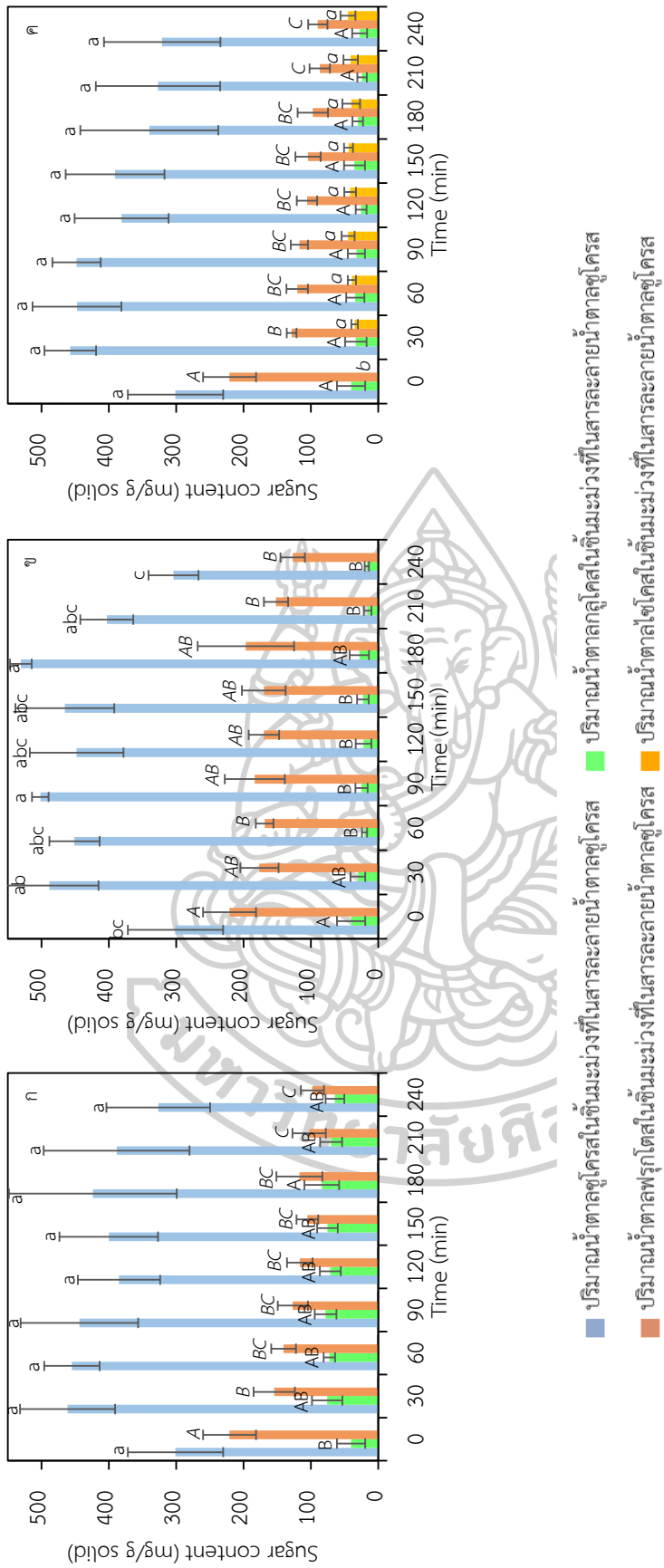
เมื่อพิจารณาการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และไซโคสร้อยละ 20 (ภาพที่ 24) และ 30 (ภาพที่ 25) พบว่า มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลไปในทิศทางเดียวกันกับการทดแทนน้ำตาลซูโครสร้อยละ 10 แต่จะพบปริมาณน้ำตาลที่ถูกนำมาทดแทนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนของน้ำตาลที่นำมาทดแทนเพิ่มขึ้นจึงทำให้น้ำตาลที่ถูกนำมาทดแทนนั้นแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นได้มากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Kowalska et al., 2019) ที่ได้ทำการศึกษาการเติมน้ำตาลแอลกอฮอล์ลงในสารละลายออสโมติกในการแช่ชั้นแอปเปิ้ล ซึ่งพบว่า น้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ทดแทนเข้าไบนั้นสามารถแพร่เข้าไปในชั้นตัวอย่างได้ และมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อ

เวลาผ่านไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทดแทนน้ำตาลส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลในผลไม้แช่อิ่มได้ ซึ่งนั้น
หมายถึงการลดปริมาณน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ได้

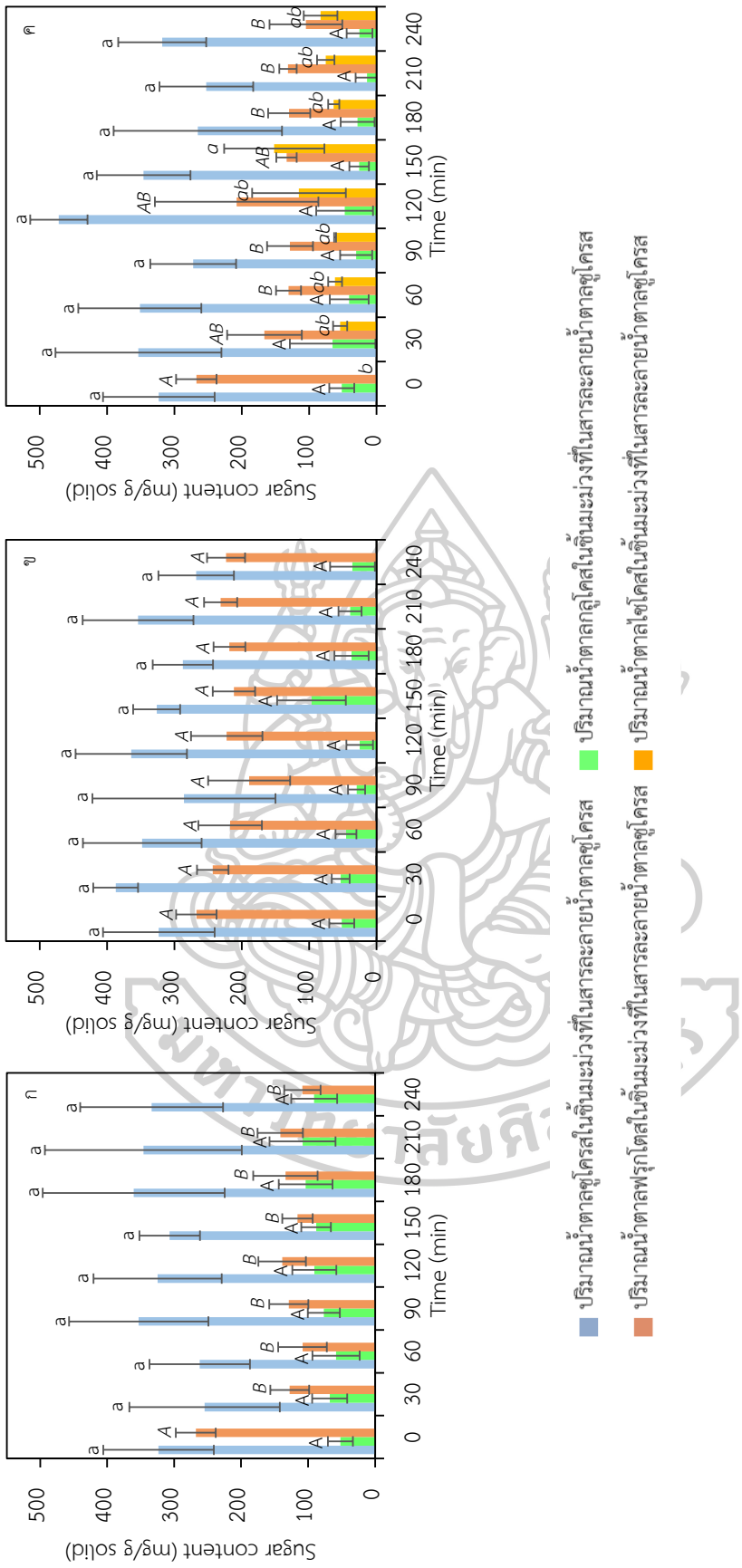




ภาพที่ 23 ปริมาณน้ำตาลในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแปรรูปในสารละลายออสโมติกที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุกโตส และ (ค) ไซโตส ร้อยละ 10 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix



ภาพที่ 24 ปริมาณน้ำตาลในชั้นเมฆแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออกซิเจนที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุกโตส และ (ค) ซูโครส ร้อยละ 20 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix



ภาพที่ 25 ปริมาณน้ำตาลในชิ้นมะม่วงแก้วขมิ้นที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสไมติกที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วย (ก) น้ำตาลกลูโคส (ข) ฟรุกโตส และ (ค) ไซโตล รัยละ 30 ที่ความเข้มข้น 30 °Brix

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติการแพร่ที่ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่างกัน ในระบบที่เตรียมสารละลายออสโมติกจากน้ำตาลชนิดเดียวที่ระดับความเข้มข้นน้อยจะเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วกว่าที่ระดับความเข้มข้นสูง และน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นได้เร็วกว่าสารละลายน้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ สำหรับทุกสภาวะ โดยเฉพาะสารละลายน้ำตาลฟรุกโตส หรือสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำตาลฟรุกโตสจะสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วที่สุด เนื่องจากเป็นน้ำตาลที่พบมากในมะม่วงแก้วขมิ้น ถัดมาเป็นสารละลายน้ำตาลไซโคส หรือสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำตาลไซโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีความสัมพันธ์กับน้ำตาลฟรุกโตสเป็นอีพิเมอร์ (Epimer) กัน

การศึกษาสมบัติการแพร่ของน้ำตาลไซโคสเปรียบเทียบกับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นๆ ในระบบที่มีการเตรียมสารละลายออสโมติกด้วยน้ำตาลผสม เมื่อมีการผสมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเข้าไปในระบบจะช่วยลดระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ และน้ำตาลไซโคสสามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงแก้วขมิ้นได้มากกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดอื่นเพียงเล็กน้อยสำหรับทุกสภาวะ

น้ำตาลที่พบในมะม่วงแก้วขมิ้น ได้แก่ น้ำตาลฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส และเมื่อวิเคราะห์น้ำตาลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) พบว่าจากโครมาโทแกรมที่ได้สามารถยืนยันได้ว่าน้ำตาลไซโคส ฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส จากสารละลายออสโมติกสามารถแพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงแก้วได้ และยังสามารถคำนวณออกมาเป็นปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดที่พบได้

รายการอ้างอิง

- Allahdad, Z., Nasiri, M., Varidi, M., & Varidi, M. J. (2019). Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 244, 202-211. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.09.017
- Cichowska, J., Figiel, A., Stasiak-Rozanska, L., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). Modeling of Osmotic Dehydration of Apples in Sugar Alcohols and Dihydroxyacetone (DHA) Solutions. *Foods*, 8(1). doi:10.3390/foods8010020
- Corrêa, J. L. G., Pereira, L. M., Vieira, G. S., & Hubinger, M. D. (2010). Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 498-504. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.08.032
- Ditudompo, S., & Pittarate, C. (2007). Mass transfer during osmotic dehydration of tomato using sucrose, sorbitol and maltitol. *Journal of Agricultural Science*, 38, 115-118.
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. c. M., Barbosa, J. L., & Xidieh Murr, F. E. (2006). Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 267-274. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.016
- García-Segovia, P., Mognetti, C., Andrés-Bello, A., & Martínez-Monzó, J. (2010). Osmotic dehydration of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Journal of Food Engineering*, 97(2), 154-160. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.10.004
- Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering*, 58, 33-43.
- Granström, T. B., Takata, G., Morimoto, K., Leisola, M., & Izumori, K. (2005). l-Xylose and l-lyxose production from xylitol using *Alcaligenes* 701B strain and immobilized l-rhamnose isomerase enzyme. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(7), 976-981. doi:10.1016/j.enzmictec.2005.01.027
- Hossain, A., Yamaguchi, F., Matsuo, T., Tsukamoto, I., Toyoda, Y., Ogawa, M., . . . Tokuda, M. (2015). Rare sugar D-allulose: Potential role and therapeutic monitoring in maintaining obesity and type 2 diabetes mellitus. *Pharmacol Ther*, 155, 49-59.

doi:10.1016/j.pharmthera.2015.08.004

Kek, S. P., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2013). Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 495-506. doi:10.1016/j.fbp.2013.05.003

Khuwijitjaru, P., Somkane, S., Nakagawa, K., & Mahayothee, B. (2022). Osmotic Dehydration, Drying Kinetics, and Quality Attributes of Osmotic Hot Air-Dried Mango as Affected by Initial Frozen Storage. *Foods*, 11, 489.

doi:<https://doi.org/10.3390/foods11030489>

Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Ciurzynska, A., Czajkowska, K., Cichowska, J., . . . Lenart, A. (2017). Osmotic dehydration of Honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 500-505.

Kowalska, H., Woźniak, Ł., Masiarz, E., Stelmach, A., Salamon, A., Kowalska, J., . . . Marzec, A. (2019). The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples. *Drying Technology*(12), 1620-1631.

doi:10.1080/07373937.2019.1653319

Lombard, G. E., Oliveira, J. C., Fito, P., & Andrés, A. (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 277-284. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.07.009

Mahayothee, B. (2005). *The Influence of Raw Material on the Quality of Dried Mango Slices (Mangifera Indica L.) with Special Reference to Postharvest Ripening* (Vol. 2): Shaker Verlag GmbH, Germany.

Marani, C. M., Agnelli, M. E., & Mascheroni, R. H. (2007). Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1122-1130.

doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.03.022

Mijailovic, N., Nesler, A., Perazzolli, M., Ait Barka, E., & Aziz, A. (2021). Rare Sugars: Recent Advances and Their Potential Role in Sustainable Crop Protection. *Molecules*, 26(6). doi:10.3390/molecules26061720

Mu, W., Zhang, W., Feng, Y., Jiang, B., & Zhou, L. (2012). Recent advances on

- applications and biotechnological production of D-psicose. *Appl Microbiol Biotechnol*, 94(6), 1461-1467. doi:10.1007/s00253-012-4093-1
- Raoult-Wack, A. L. (1994). <Recent advances in the osmotic dehydration foods.pdf>. *Trend Food Sci. Tech*, 5, 255-260.
- Sankat, C. K., Castaigne, F., & Maharaj, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 31, 123-135. doi:<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.332-35.x>
- Uczciwek, R. K. a. M. (2008). Effect of osmotic dehydration in fructose, sucrose and fructooligosaccharide solutions on the content of saccharides in plums and apples and their energy value. *Agricultural and Food Science*, 17, 367 - 375.
- กาญจนพิสุทธิ, เ. (2547). คู่มือมะม่วง. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เทพพิทักษ์.
- นันทสิทธิ์, ม. (2559). มะม่วง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เกษตรสยาม.
- บรรจงสินศิริ, ป., พิศพันธ์, ส., & แซ่ไคว้, เ. (2550). การพัฒนาผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ที่ให้พลังงานต่ำ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. doi:https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_Doi=
- บุญศิริ, อ., & ศิริพานิช, จ. (2550). ส่งออกมะม่วงไปต่างประเทศทำอย่างไร. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- یینยงพุทธกาล, ว. (2013). ปัจจัยที่มีผลต่อการดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. *Burapha Science Journal* (วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา), 18(1), 226-233.
- รัตนาพนนท์, น. (2545). เคมีอาหาร (Vol. 1). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- วังไฉ, ว. (2529). มะม่วง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ศรีสมบัติการพิมพ์.
- ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. (2564). งานวิจัยครบวงจรด้าน มะม่วง ของศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. Retrieved from <https://www.phtnet.org/phtic-research/view-cat.asp?catID=1>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). ระบบแสดงข้อมูลทางสถิติ เรื่อง สถิติการส่งออก (Export) มะม่วงสดหรือแช่เย็นจนแข็ง. Retrieved from http://impexp.oae.go.th/service/export.php?S_YEAR=2563&E_YEAR=2564&PRODUCT_ID=4985&wf_search=&WF_SEARCH=Y#export





ภาคผนวก



การวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี

1. การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้ระบบ CIE L^*, a^*, b^* ด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น ColorFlex (HunterLab) EZ, USA) โดยจะให้ค่า L^* คือความสว่างของสี มีค่าตั้งแต่ 0-100 ที่ 0 แสดงถึงสีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว, a^* คือสีแดง-เขียว โดย $+a^*$ หมายถึงทิศของสีแดง และ $-a^*$ หมายถึงทิศของสีเขียว, b^* คือสีเหลือง-น้ำเงิน โดย $+b^*$ หมายถึงทิศของสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึงทิศของสีน้ำเงิน และบันทึกค่า L^*, a^* และ b^* ที่ได้

นำค่า L^*, a^* และ b^* มาคำนวณหาค่าความเข้มของสี (Chroma: C^*) และค่ามุมของสี (hue angle: h°) จากสมการต่อไปนี้

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

เมื่อ $h^\circ = 90^\circ$ อยู่ในช่วงของสีเหลือง

$h^\circ = 180^\circ$ อยู่ในช่วงของสีเขียว

$h^\circ = 270^\circ$ อยู่ในช่วงของสีน้ำเงิน

$h^\circ = 0^\circ$ อยู่ในช่วงของสีแดง

2. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid; TSS)

วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด นำตัวอย่างที่ปั่นละเอียดไว้ของมะม่วงแต่ละผลๆ ละสองด้านมากรองผ่านผ้าขาวบาง เพื่อแยกส่วนในสไลออกมา จากนั้นนำส่วนในสไลมาวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ด้วยมาตรวัดดัชนีหักเห (Digital refractometer, รุ่น Pal- α , Atago, Japan) และบันทึกผลทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

3. ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

วัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter รุ่น S220 SevenCompact™ pH/Ion, USA) โดยจุ่มหัววัดลงในน้ำคั้นมะม่วง ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อ 1 ผลที่ใช้งาน

4. ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (titratable acidity; TA)

วิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ตามวิธี AOAC (2000) โดยชั่งตัวอย่างที่ปั่นละเอียดแล้ว จากแต่ละด้านๆ ละ 5 ± 0.02 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร หยดสารฟีนอล์ฟทาลีน ประมาณ 2-3 หยด ทำการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่ใกล้เคียงกัน บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปทั้งหมด และนำไปคำนวณหาค่า TA เทียบกับกรดซิตริกดังสมการ ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อ 1 ผลที่ใช้งาน

$$TA(\%) = \frac{ml(0.1N NaOH) \times 0.007 \times 100}{g(sample)}$$

เมื่อ 0.007 คือ citric acid equivalent

5. ปริมาณความชื้น (Moisture content)

มะม่วงที่ถูกปั่นปั่นผสมไว้แต่ละผลถูกนำมาชั่งน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาปริมาณความชื้น (moisture can) พร้อมบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระป๋องอลูมิเนียมหลังอบ (AOAC, 2000) บันทึกน้ำหนักพร้อมทั้งคำนวณความชื้นในฐานเปียก ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อ 1 ผลที่ใช้งาน

$$MC_{wb} = \frac{weight\ of\ water}{weight\ of\ sample} \times 100$$

6. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography; HPLC)

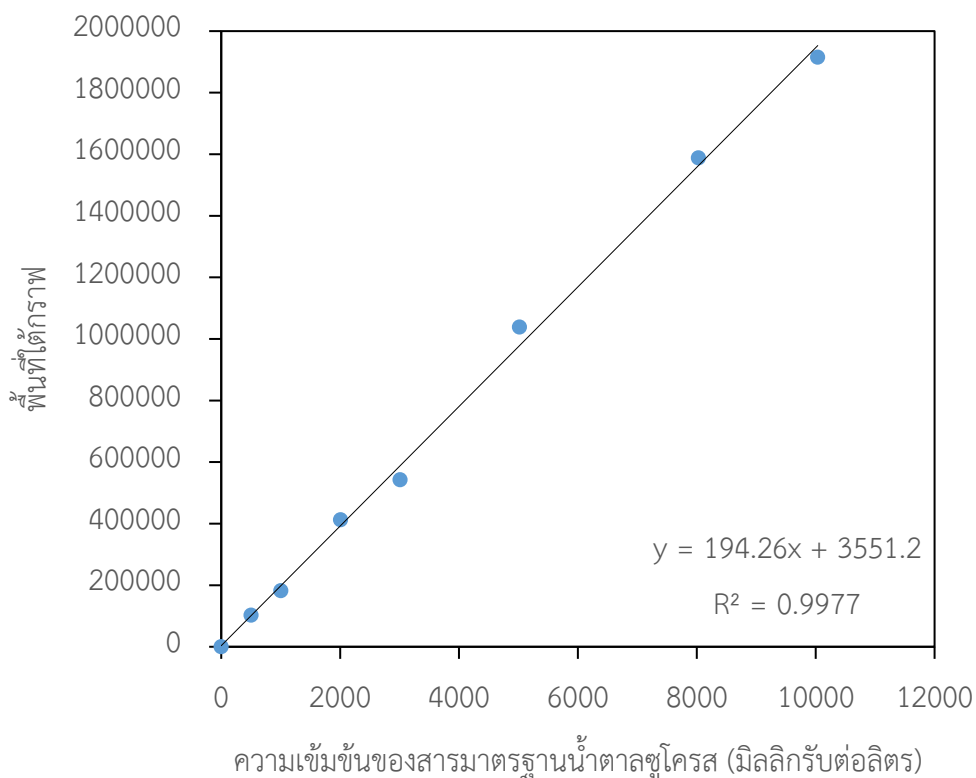
- การสกัดน้ำตาล

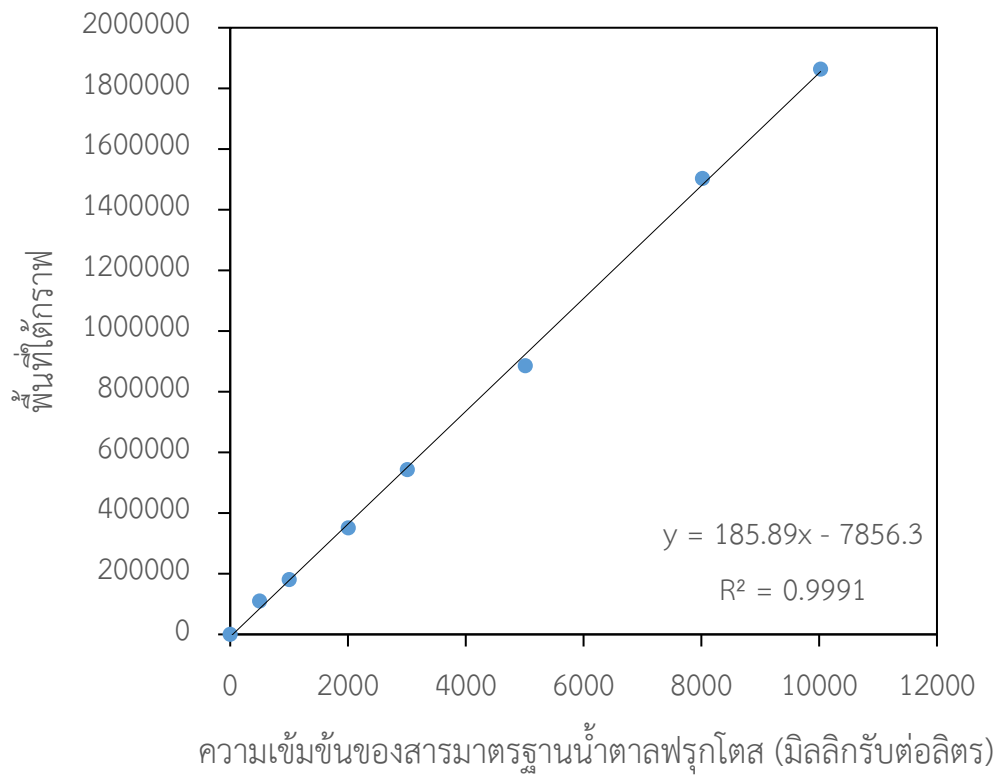
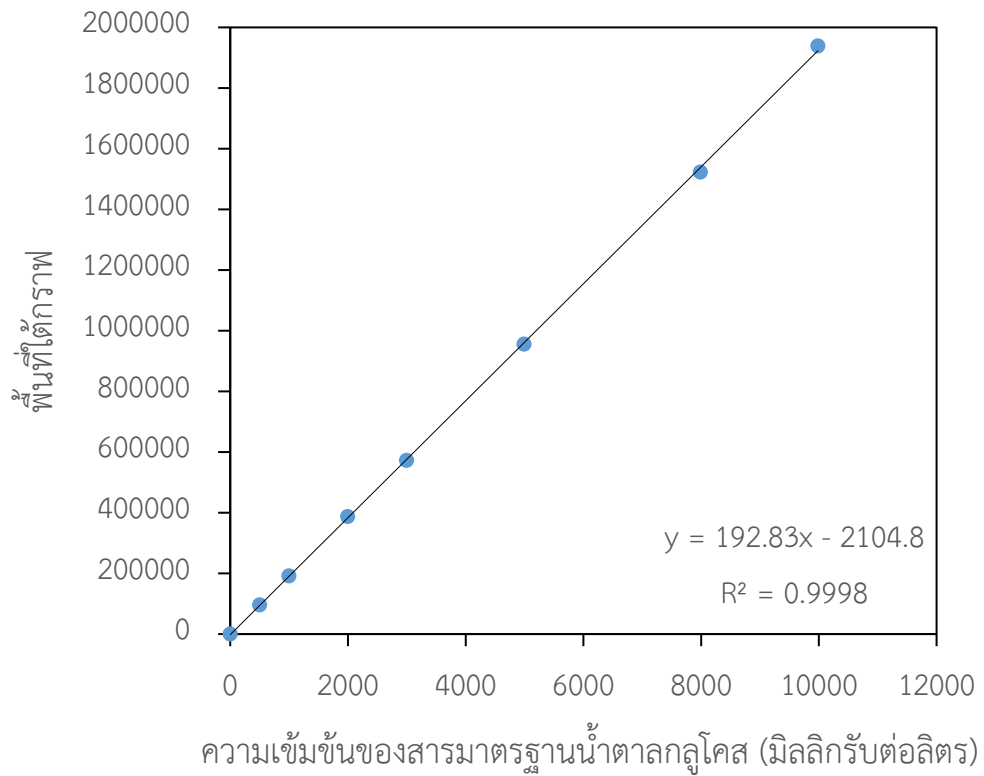
นำชิ้นมะม่วงที่ต้องการวิเคราะห์มาบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน และชั่งน้ำหนักจำนวน 1.0 กรัม ใส่หลอดทดลองสำหรับปั่นเหวี่ยงและเติม 80% อะซิโตไนโตรล์ปริมาตร 9 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 8000 รอบ เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำส่วนใสกรองผ่านกระดาษกรอง และนำส่วนที่เป็นผลไม้ผสม 80% อะซิโตไนโตรล์อีกครั้งเพื่อสกัดน้ำตาลซ้ำ จากนั้นทำการปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร และนำไปเจือจางให้มีความเข้มข้นลดลง 50% จากนั้นนำไปผ่าน

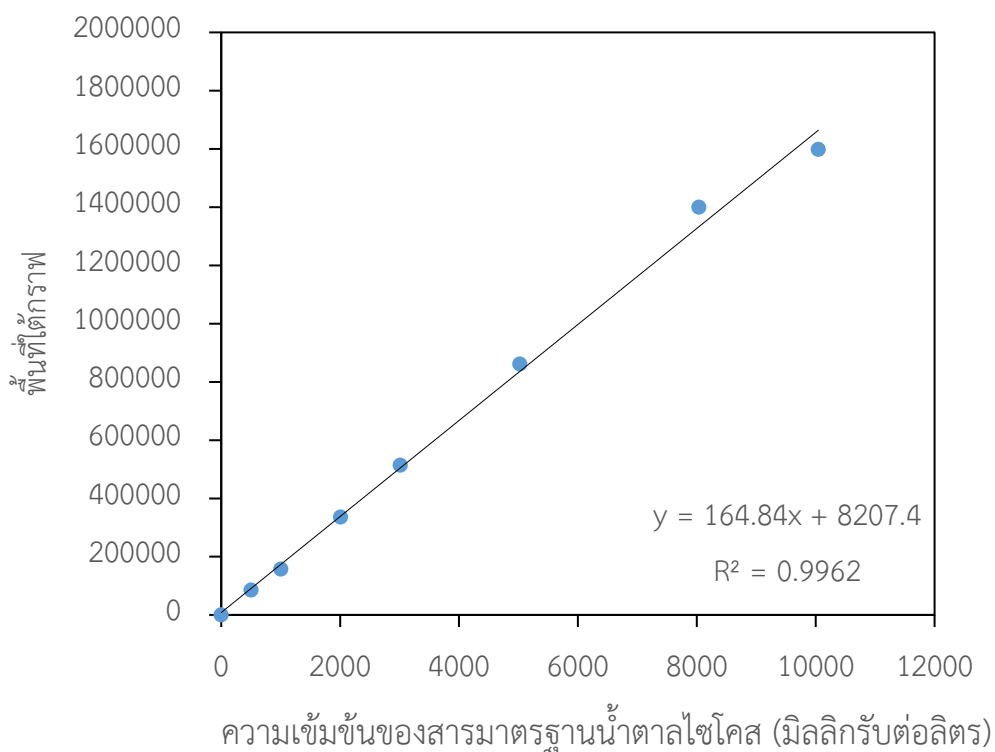
ตัวกรองในลอนขนาด 0.45 ไมครอนใส่ในขวดสีชาสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานน้ำตาล

ชั่งสารละลายมาตรฐานน้ำตาลจำนวน 0.2 ± 0.0050 กรัม พร้อมทั้งจดน้ำหนักที่แน่นอน นำมาปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ด้วยน้ำกลั่นสำหรับ HPLC ให้ได้ 20 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้ใช้เป็ stock จากนั้นปิเปตสารละลายที่เตรียมไว้มา 0.0125, 0.025, 0.5, 1, 1.5, 2.5 และ 4 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 5 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานน้ำตาลที่ความเข้มข้น 250, 500, 1,000, 2,000, 3,000, 5,000, 8,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ







- การวิเคราะห์

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) โดยใช้คอลัมน์ (column) รุ่น COSMOSIL Sugar-D (4.6 mm I.D. × 250 mm, Japan) และคอลัมน์ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส โดยเฟสเคลื่อนที่คือ อะซิโตนไตรล์ความเข้มข้นร้อยละ 80 และน้ำกลั่นร้อยละ 20 และอัตราการไหลเท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที โดยน้ำตาลแต่ละชนิดจะถูกตรวจสอบด้วย refractive index detector (RID-10A, Shimadzu, Japan) ซึ่งการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานน้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลไซโคส จากนั้นคำนวณให้อยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม ตัวอย่างแห้ง (mg/g dry solid) โดยการคำนวณปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดจะเริ่มจากการนำพื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลแต่ละชนิดแทนลงในสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานของน้ำตาลแต่ละชนิด



ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในขึ้นมะม่วงในแต่ละช่วงเวลา

1. ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายน้ำตาลชนิดเดียว

- สารละลายน้ำตาลซูโครส

| Time | 30 °Brix | | 40 °Brix | | 50 °Brix | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 30.0 | 17.5 | 40.1 | 17.6 | 50.0 | 17.3 |
| 30 | 29.4 | 19.0 | 38.4 | 20.1 | 47.5 | 21.5 |
| 60 | 29.0 | 19.3 | 38.1 | 21.9 | 47.0 | 22.2 |
| 90 | 28.7 | 19.9 | 37.6 | 22.2 | 46.2 | 22.9 |
| 120 | 28.8 | 20.3 | 37.7 | 22.4 | 45.8 | 23.5 |
| 150 | 28.5 | 20.8 | 36.9 | 22.9 | 45.5 | 23.9 |
| 180 | 28.4 | 21.5 | 37.2 | 22.8 | 45.3 | 25.4 |
| 210 | 28.4 | 22.3 | 37.2 | 23.3 | 45.2 | 26.7 |
| 240 | 28.2 | 21.9 | 37.2 | 23.1 | 44.9 | 27.1 |

- สารละลายน้ำตาลกลูโคส

| Time | 30 °Brix | | 40 °Brix | | 50 °Brix | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 30.1 | 17.5 | 40.1 | 17.6 | 50.5 | 17.3 |
| 30 | 28.8 | 20.0 | 38.2 | 22.7 | 47.2 | 24.2 |
| 60 | 28.5 | 20.7 | 37.7 | 23.3 | 46.3 | 24.2 |
| 90 | 27.7 | 20.9 | 37.4 | 25.0 | 45.6 | 25.2 |
| 120 | 27.8 | 21.9 | 37.2 | 24.2 | 45.0 | 26.1 |
| 150 | 27.7 | 22.5 | 36.4 | 25.5 | 44.7 | 26.5 |
| 180 | 27.5 | 23.0 | 36.3 | 26.1 | 44.9 | 28.0 |
| 210 | 27.1 | 23.5 | 35.8 | 26.5 | 44.7 | 29.7 |

| | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 240 | 27.0 | 23.5 | 35.4 | 26.0 | 43.5 | 29.5 |
|-----|------|------|------|------|------|------|

- สารละลายน้ำตาลฟรุ๊กโตส

| Time | 30 °Brix | | 40 °Brix | | 50 °Brix | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 30.2 | 17.5 | 40.2 | 17.6 | 50.4 | 17.3 |
| 30 | 28.9 | 20.5 | 37.9 | 21.8 | 47.1 | 23.5 |
| 60 | 28.6 | 21.8 | 37.3 | 23.4 | 46.2 | 25.5 |
| 90 | 27.6 | 20.7 | 36.7 | 23.8 | 45.5 | 26.6 |
| 120 | 27.7 | 21.6 | 36.5 | 24.5 | 44.9 | 26.6 |
| 150 | 27.4 | 22.2 | 36.1 | 24.1 | 44.4 | 28.2 |
| 180 | 27.2 | 22.6 | 35.8 | 25.1 | 44.4 | 28.8 |
| 210 | 27.1 | 23.0 | 36.2 | 25.9 | 44.0 | 29.2 |
| 240 | 27.1 | 23.7 | 36.4 | 26.2 | 43.4 | 29.6 |

- สารละลายน้ำตาลไซโคส

| Time | 30 °Brix | | 40 °Brix | | 50 °Brix | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 29.9 | 17.5 | 39.8 | 17.6 | 49.6 | 17.3 |
| 30 | 28.2 | 18.5 | 37.4 | 22.0 | 45.9 | 23.9 |
| 60 | 28.0 | 20.1 | 36.4 | 22.9 | 45.0 | 24.8 |
| 90 | 27.6 | 19.8 | 36.0 | 23.9 | 44.3 | 26.3 |
| 120 | 27.4 | 21.7 | 35.8 | 25.4 | 43.9 | 27.8 |
| 150 | 27.3 | 21.7 | 35.3 | 26.2 | 43.6 | 28.1 |
| 180 | 27.2 | 21.8 | 35.2 | 27.2 | 43.2 | 29.2 |
| 210 | 27.1 | 22.1 | 35.2 | 27.0 | 42.8 | 29.0 |
| 240 | 26.9 | 23.2 | 35.0 | 27.7 | 42.4 | 30.4 |

2. ตัวอย่างที่เห็นในสารละลายที่ถูกทดแทนน้ำตาลซูโครส

- สารละลายที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลกลูโคส

| Time | 90:10 | | 80:20 | | 70:30 | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 30.8 | 14.4 | 30.8 | 14.4 | 30.0 | 16.7 |
| 30 | 29.2 | 17.3 | 28.8 | 17.5 | 29.2 | 19.3 |
| 60 | 29.0 | 18.5 | 28.5 | 18.5 | 28.5 | 19.8 |
| 90 | 28.9 | 19.9 | 28.0 | 18.9 | 28.3 | 19.9 |
| 120 | 28.4 | 19.2 | 27.9 | 19.2 | 28.3 | 20.5 |
| 150 | 28.3 | 19.7 | 27.7 | 19.8 | 28.5 | 21.1 |
| 180 | 28.3 | 20.9 | 27.5 | 20.3 | 28.1 | 21.4 |
| 210 | 28.2 | 20.9 | 27.3 | 20.3 | 27.9 | 21.7 |
| 240 | 28.2 | 20.1 | 27.3 | 20.7 | 28.0 | 21.8 |

- สารละลายที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลฟรุกโตส

| Time | 90:10 | | 80:20 | | 70:30 | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 29.9 | 14.4 | 29.9 | 14.4 | 30.3 | 16.7 |
| 30 | 29.7 | 17.5 | 28.7 | 18.5 | 29.2 | 19.0 |
| 60 | 29.4 | 19.3 | 28.4 | 18.6 | 28.7 | 19.9 |
| 90 | 29.0 | 19.3 | 28.1 | 18.8 | 28.5 | 21.2 |
| 120 | 28.8 | 19.9 | 27.9 | 19.2 | 27.6 | 20.7 |
| 150 | 28.7 | 20.2 | 28.1 | 20.1 | 27.6 | 20.6 |
| 180 | 28.6 | 20.7 | 27.6 | 20.2 | 27.8 | 20.2 |
| 210 | 28.5 | 21.1 | 27.7 | 20.5 | 27.5 | 20.5 |
| 240 | 28.6 | 21.5 | 27.9 | 21.2 | 27.6 | 21.1 |

- สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ทดแทนด้วยน้ำตาลไซโคส

| Time | 90:10 | | 80:20 | | 70:30 | |
|------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Solution | Sample | Solution | Sample | Solution | Sample |
| 0 | 29.9 | 14.4 | 29.9 | 14.4 | 31.7 | 16.7 |
| 30 | 29.9 | 18.6 | 28.7 | 17.7 | 30.2 | 19.0 |
| 60 | 28.9 | 18.8 | 28.4 | 18.3 | 30.5 | 19.7 |
| 90 | 29.3 | 19.6 | 28.1 | 18.4 | 30.1 | 20.2 |
| 120 | 29.1 | 20.7 | 28.0 | 19.7 | 29.8 | 20.3 |
| 150 | 28.8 | 20.4 | 27.8 | 20.4 | 29.8 | 20.8 |
| 180 | 29.0 | 21.0 | 27.6 | 20.7 | 29.8 | 22.1 |
| 210 | 28.8 | 20.9 | 27.5 | 21.1 | 29.7 | 21.7 |
| 240 | 28.8 | 21.2 | 27.3 | 21.4 | 29.7 | 22.2 |





ภาคผนวก ค

ปริมาณน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุกโตส และไซโคส

1. ปริมาณน้ำตาลในสารละลายออสโมติกเริ่มต้น

● น้ำตาลชนิดเดียว

| Solution | Sugar content (mg/L) | | |
|----------|----------------------|-----------|-----------|
| | 30 °Brix | 40 °Brix | 50 °Brix |
| Sucrose | 352114.55 | 573739.45 | 908578.66 |
| Glucose | 269051.02 | 422438.84 | 512924.79 |
| Fructose | 320954.33 | 512194.47 | 591422.80 |
| Psicose | 282629.31 | 325996.87 | 475143.26 |

● น้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทน

| Solution | Sugar content (mg/L) | | |
|----------|----------------------|----------|-----------|
| | 90:10 | 80:20 | 70:30 |
| Su:Glu | 41569.66 | 66732.29 | 115806.78 |
| Su:Fruc | 26595.76 | 68814.63 | 118637.11 |
| Su:Psi | 34533.89 | 57392.66 | 81722.45 |

2. ปริมาณน้ำตาลในชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายออสโมติกในแต่ละช่วงเวลา

- น้ำตาลชนิดเดียว

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| สารละลายน้ำตาลซูโครส 30°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 130.60 | 29.10 | 434.18 |
| 60 | 0.00 | 127.93 | 35.01 | 353.19 |
| 90 | 0.00 | 107.12 | 24.76 | 350.99 |
| 120 | 0.00 | 101.39 | 23.58 | 294.08 |
| 150 | 0.00 | 75.00 | 19.76 | 197.45 |
| 180 | 0.00 | 75.67 | 11.53 | 179.60 |
| 210 | 0.00 | 77.98 | 20.92 | 207.48 |
| 240 | 0.00 | 75.54 | 19.43 | 220.02 |
| สารละลายน้ำตาลกลูโคส 30°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 114.68 | 203.27 | 258.69 |
| 60 | 0.00 | 111.91 | 232.38 | 242.18 |
| 90 | 0.00 | 96.90 | 209.69 | 188.23 |
| 120 | 0.00 | 87.94 | 195.22 | 167.53 |
| 150 | 0.00 | 85.23 | 186.94 | 143.99 |
| 180 | 0.00 | 72.29 | 164.10 | 110.88 |
| 210 | 0.00 | 68.49 | 172.47 | 110.11 |
| 240 | 0.00 | 76.35 | 193.71 | 136.38 |
| สารละลายน้ำตาลฟรุคโตส 30°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 30 | 0.00 | 289.78 | 30.73 | 247.23 |
| 60 | 0.00 | 311.11 | 43.11 | 272.74 |
| 90 | 0.00 | 304.40 | 26.24 | 211.67 |
| 120 | 0.00 | 235.75 | 18.97 | 130.16 |
| 150 | 0.00 | 260.99 | 20.86 | 158.59 |
| 180 | 0.00 | 232.48 | 12.79 | 102.51 |
| 210 | 0.00 | 251.04 | 14.82 | 124.79 |
| 240 | 0.00 | 228.47 | 11.47 | 84.58 |
| สารละลายน้ำตาลไซโคส 30°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 192.31 | 114.88 | 25.96 | 304.11 |
| 60 | 248.04 | 112.90 | 27.35 | 276.11 |
| 90 | 261.66 | 102.94 | 23.04 | 271.01 |
| 120 | 266.59 | 92.27 | 20.89 | 224.98 |
| 150 | 271.87 | 91.49 | 22.43 | 220.32 |
| 180 | 270.19 | 81.34 | 15.01 | 190.94 |
| 210 | 304.01 | 77.05 | 17.56 | 188.88 |
| 240 | 245.22 | 67.69 | 17.06 | 158.67 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครส 40°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 137.38 | 36.38 | 282.33 |
| 60 | 0.00 | 120.08 | 31.48 | 227.46 |
| 90 | 0.00 | 101.23 | 20.85 | 289.02 |
| 120 | 0.00 | 79.89 | 11.93 | 196.30 |
| 150 | 0.00 | 90.38 | 16.81 | 237.49 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 180 | 0.00 | 75.92 | 17.49 | 209.17 |
| 210 | 0.00 | 92.65 | 24.64 | 231.74 |
| 240 | 0.00 | 82.92 | 18.13 | 158.56 |
| สารละลายน้ำตาลกลูโคส 40°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 103.72 | 167.40 | 202.27 |
| 60 | 0.00 | 79.28 | 148.98 | 148.49 |
| 90 | 0.00 | 75.91 | 167.39 | 145.06 |
| 120 | 0.00 | 69.11 | 149.59 | 97.17 |
| 150 | 0.00 | 59.47 | 125.48 | 61.21 |
| 180 | 0.00 | 76.90 | 182.44 | 100.08 |
| 210 | 0.00 | 68.72 | 166.67 | 92.86 |
| 240 | 0.00 | 76.74 | 184.82 | 116.35 |
| สารละลายน้ำตาลฟรุคโตส 40°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 316.47 | 41.76 | 244.25 |
| 60 | 0.00 | 307.54 | 29.40 | 184.21 |
| 90 | 0.00 | 223.09 | 17.48 | 111.76 |
| 120 | 0.00 | 236.44 | 20.60 | 130.69 |
| 150 | 0.00 | 223.13 | 18.36 | 99.38 |
| 180 | 0.00 | 269.59 | 23.29 | 116.88 |
| 210 | 0.00 | 310.10 | 20.10 | 117.20 |
| 240 | 0.00 | 261.86 | 19.71 | 92.57 |
| สารละลายน้ำตาลไซโคส 40°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 30 | 191.33 | 127.50 | 23.27 | 266.16 |
| 60 | 245.06 | 125.61 | 26.84 | 251.98 |
| 90 | 245.42 | 121.95 | 17.16 | 223.95 |
| 120 | 250.06 | 113.62 | 19.27 | 211.29 |
| 150 | 250.05 | 97.76 | 12.92 | 185.42 |
| 180 | 245.61 | 89.80 | 15.24 | 159.75 |
| 210 | 297.87 | 100.24 | 17.41 | 171.98 |
| 240 | 270.80 | 91.15 | 17.95 | 159.47 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครส 50°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 105.29 | 18.51 | 307.98 |
| 60 | 0.00 | 96.53 | 19.32 | 298.87 |
| 90 | 0.00 | 83.99 | 14.74 | 275.90 |
| 120 | 0.00 | 88.78 | 21.74 | 291.83 |
| 150 | 0.00 | 75.05 | 13.74 | 266.13 |
| 180 | 0.00 | 81.83 | 20.13 | 270.06 |
| 210 | 0.00 | 69.77 | 11.39 | 235.30 |
| 240 | 0.00 | 73.19 | 14.99 | 242.75 |
| สารละลายน้ำตาลกลูโคส 50°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 86.90 | 139.88 | 144.43 |
| 60 | 0.00 | 87.15 | 165.42 | 148.99 |
| 90 | 0.00 | 79.68 | 150.89 | 129.49 |
| 120 | 0.00 | 68.73 | 162.37 | 117.98 |
| 150 | 0.00 | 69.83 | 167.77 | 116.89 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 180 | 0.00 | 63.07 | 171.57 | 105.22 |
| 210 | 0.00 | 59.91 | 167.62 | 96.88 |
| 240 | 0.00 | 61.71 | 173.19 | 91.51 |
| สารละลายน้ำตาลฟรุคโตส 50°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 266.05 | 20.16 | 195.43 |
| 60 | 0.00 | 259.94 | 13.14 | 145.30 |
| 90 | 0.00 | 234.48 | 12.52 | 119.47 |
| 120 | 0.00 | 241.58 | 15.48 | 107.42 |
| 150 | 0.00 | 212.10 | 12.63 | 86.12 |
| 180 | 0.00 | 265.06 | 13.85 | 115.85 |
| 210 | 0.00 | 271.36 | 18.09 | 115.46 |
| 240 | 0.00 | 286.29 | 13.80 | 105.10 |
| สารละลายน้ำตาลไซโคส 50°Brix | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 215.85 | 124.07 | 27.63 | 243.33 |
| 60 | 261.50 | 117.26 | 26.16 | 228.10 |
| 90 | 278.22 | 101.36 | 23.79 | 196.14 |
| 120 | 257.94 | 100.76 | 22.12 | 188.19 |
| 150 | 255.29 | 82.26 | 15.50 | 160.13 |
| 180 | 251.76 | 70.76 | 13.32 | 143.39 |
| 210 | 288.67 | 71.81 | 14.59 | 153.48 |
| 240 | 260.63 | 60.12 | 16.54 | 119.17 |

- น้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทน

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 30 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 127.42 | 67.61 | 254.56 |
| 60 | 0.00 | 108.22 | 58.13 | 261.94 |
| 90 | 0.00 | 128.83 | 76.50 | 352.98 |
| 120 | 0.00 | 138.62 | 90.68 | 324.58 |
| 150 | 0.00 | 115.80 | 88.00 | 306.72 |
| 180 | 0.00 | 133.81 | 103.50 | 360.36 |
| 210 | 0.00 | 141.55 | 108.26 | 345.84 |
| 240 | 0.00 | 108.69 | 90.91 | 333.60 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลฟรุกโตสร้อยละ 30 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 243.18 | 53.36 | 387.31 |
| 60 | 0.00 | 217.36 | 45.55 | 347.93 |
| 90 | 0.00 | 189.21 | 29.82 | 286.11 |
| 120 | 0.00 | 222.57 | 25.12 | 364.31 |
| 150 | 0.00 | 211.71 | 140.65 | 326.44 |
| 180 | 0.00 | 218.55 | 37.28 | 287.48 |
| 210 | 0.00 | 231.47 | 39.47 | 354.04 |
| 240 | 0.00 | 223.57 | 35.91 | 267.96 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลไซโคสร้อยละ 30 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 54.09 | 166.54 | 65.44 | 353.67 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 60 | 61.78 | 130.87 | 40.81 | 351.49 |
| 90 | 61.61 | 128.65 | 30.48 | 272.34 |
| 120 | 115.32 | 207.88 | 47.46 | 471.79 |
| 150 | 152.08 | 133.82 | 26.02 | 345.91 |
| 180 | 63.71 | 129.83 | 28.25 | 265.56 |
| 210 | 75.71 | 131.64 | 14.50 | 252.84 |
| 240 | 83.29 | 104.96 | 25.43 | 318.31 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 20 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 154.29 | 75.76 | 461.04 |
| 60 | 0.00 | 140.59 | 72.58 | 454.70 |
| 90 | 0.00 | 126.87 | 78.19 | 443.59 |
| 120 | 0.00 | 116.59 | 71.31 | 384.91 |
| 150 | 0.00 | 105.27 | 75.38 | 400.10 |
| 180 | 0.00 | 117.00 | 83.70 | 423.76 |
| 210 | 0.00 | 102.59 | 70.03 | 388.38 |
| 240 | 0.00 | 97.89 | 64.33 | 326.47 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลฟรุกโตสร้อยละ 20 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 176.41 | 30.33 | 488.34 |
| 60 | 0.00 | 168.69 | 20.48 | 450.91 |
| 90 | 0.00 | 183.29 | 24.95 | 501.51 |
| 120 | 0.00 | 169.77 | 21.70 | 447.75 |
| 150 | 0.00 | 169.84 | 22.72 | 465.35 |
| 180 | 0.00 | 196.55 | 27.93 | 530.48 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 210 | 0.00 | 151.89 | 15.69 | 402.86 |
| 240 | 0.00 | 126.93 | 16.83 | 303.92 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลไซโคสร้อยละ 20 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 34.93 | 128.53 | 33.31 | 457.08 |
| 60 | 39.09 | 120.27 | 34.22 | 447.15 |
| 90 | 44.79 | 117.03 | 32.35 | 447.92 |
| 120 | 41.79 | 105.73 | 25.44 | 380.99 |
| 150 | 44.08 | 104.36 | 35.38 | 390.49 |
| 180 | 39.94 | 97.30 | 30.35 | 339.84 |
| 210 | 40.97 | 86.79 | 24.11 | 326.95 |
| 240 | 44.84 | 89.73 | 27.51 | 320.76 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 10 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 128.30 | 54.93 | 374.84 |
| 60 | 0.00 | 134.61 | 56.38 | 441.72 |
| 90 | 0.00 | 122.54 | 53.50 | 398.86 |
| 120 | 0.00 | 121.61 | 60.13 | 372.16 |
| 150 | 0.00 | 114.72 | 48.15 | 412.87 |
| 180 | 0.00 | 109.60 | 45.55 | 371.81 |
| 210 | 0.00 | 104.28 | 47.56 | 340.43 |
| 240 | 0.00 | 97.04 | 44.79 | 332.96 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลฟรุคโตสร้อยละ 10 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 0.00 | 148.64 | 42.76 | 417.68 |

| Time | Psicose (mg/g solid) | Fructose (mg/g solid) | Glucose (mg/g solid) | Sucrose (mg/g solid) |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 60 | 0.00 | 135.56 | 42.09 | 383.87 |
| 90 | 0.00 | 145.83 | 34.83 | 410.98 |
| 120 | 0.00 | 130.89 | 29.82 | 394.28 |
| 150 | 0.00 | 129.07 | 29.69 | 376.27 |
| 180 | 0.00 | 131.17 | 34.62 | 402.69 |
| 210 | 0.00 | 125.58 | 31.14 | 354.90 |
| 240 | 0.00 | 128.39 | 33.02 | 368.61 |
| สารละลายน้ำตาลซูโครสที่ถูกทดแทนด้วยน้ำตาลไซโคสร้อยละ 10 | | | | |
| 0 | 0.00 | 155.38 | 46.31 | 235.58 |
| 30 | 5.28 | 141.53 | 41.25 | 442.84 |
| 60 | 7.69 | 127.23 | 48.10 | 377.83 |
| 90 | 11.71 | 117.19 | 44.87 | 388.02 |
| 120 | 14.03 | 124.66 | 42.33 | 393.21 |
| 150 | 15.20 | 110.93 | 36.45 | 379.16 |
| 180 | 13.85 | 111.32 | 35.79 | 408.85 |
| 210 | 13.58 | 109.10 | 29.81 | 390.12 |
| 240 | 12.11 | 88.62 | 30.61 | 307.71 |

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | นางสาวคณางค์ ลิขิตวิวัฒน์ |
| วัน เดือน ปี เกิด | 12 สิงหาคม 2537 |
| สถานที่เกิด | กรุงเทพมหานคร |
| วุฒิการศึกษา | วท.บ. (เทคโนโลยีอาหาร) |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 35/12 ซ.เพชรเกษม81/6 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160 |
| ผลงานตีพิมพ์ | คณางค์ ลิขิตวิวัฒน์, กมลวัลย์ แดงมาดี, ปราโมทย์ คูวิจิตรจาร์ และบุศรา ภรณ์ มหาโยธี. 2561. การวัดปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในน้ำกระเจี๊ยบ และน้ำผลหม่อนด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. วารสาร วิทยาศาสตร์เกษตร, 49 (4 พิเศษ): 175-178. คณางค์ ลิขิตวิวัฒน์ ปราโมทย์ คูวิจิตรจาร์ และ บุศราภรณ์ มหาโยธี. 2563. อิทธิพลของชนิดน้ำตาลต่อกระบวนการออกซิสมิซิสของมะม่วง. โครงการ ประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 10 เรื่อง “การยกระดับ คุณภาพการศึกษาและพัฒนามนุษย์ในศตวรรษที่ 21” |

