



การพัฒนากระบวนการผลิตมะม่วงแช่แข็ง

The Development of Process for Mango Glacé Production

ภัทรพร ยูธชาติ

Pattharaporn Yuthachit

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Food Technology

Prince of Songkla University

2541

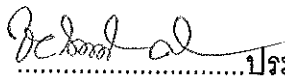
๑

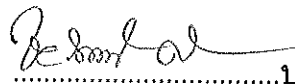
เลขหมู่	TP441.M36 763 2541	๑๒
Bib Key	119641	

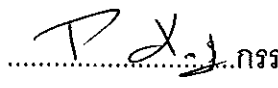
ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตมะม่วงแช่แข็งแห้ง
ผู้เขียน นางสาวภัทราพร ยุทธชาติ
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร

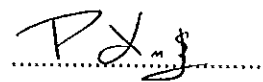
คณะกรรมการที่ปรึกษา

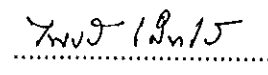
คณะกรรมการสอบ

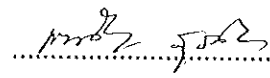

.....ประธานกรรมการ
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)


.....ประธานกรรมการ
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)

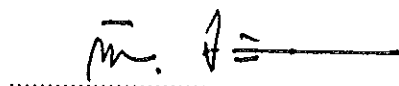

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยรัตน์ หนูสุก)


.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยรัตน์ หนูสุก)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพรัตน์ ไสภโณดร)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ถนอมจิต สุภาวิตา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรหมมา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนากระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง
ผู้เขียน นางสาวภัทราพร ยุธาชิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

การศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง พบว่าสภาวะในการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่อิ่ม ควรแช่ขึ้นมะม่วงหลังการตัดแต่งในสารละลายผสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 กับแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.7 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และรักษาเนื้อสัมผัส

การศึกษาค้นคว้าผลของปัจจัยที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารของน้ำ น้ำตาล และกรด พบว่าการกวนไม่ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้นในระหว่างการแช่อิ่ม ในขณะที่การปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ (ปรับเพิ่มทุก 4 ชั่วโมง) ให้คุณภาพดีกว่าการแช่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น 70°บริกซ์ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→40→50→60→70°บริกซ์ ($p > 0.05$) โดยวิธีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ใช้เวลาแช่อิ่มสั้นกว่าการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→40→50→60→70°บริกซ์ ($p < 0.05$) การสูญเสียน้ำที่อุณหภูมิ 50-70°ซ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ที่อุณหภูมิ 50°ซ มีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมากที่สุด ($p < 0.05$) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 50°ซ มีผลทำลายสารเพคตินเกิดการละลายออกตันช่องว่างภายในเซลล์ขัดขวางการแพร่เข้าของน้ำตาล สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของขึ้นมะม่วงที่ใช้ในการทดลองไม่มีความแตกต่างของการถ่ายโอนมวลสาร เนื่องจากความหนาของขึ้นมะม่วงมีขนาดใกล้เคียงกัน

การอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าความชื้นในผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณร้อยละ 19.39 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.60 ซึ่งเป็นระดับความชื้นมีความเหมาะสมในการเก็บรักษา ในระหว่างการอบแห้งจะไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

การศึกษาเปรียบเทียบการถ่ายโอนมวลสาร คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ปริมาณผลผลิต และต้นทุนการผลิต ระหว่างกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้าและแบบพัฒนา พบว่าการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนามีการถ่ายโอนมวลสารสูงกว่าแบบช้า เนื่องจากมีปัจจัยส่งเสริมในการถ่ายโอนมวลสาร ดังนั้นการแช่อิ่มแบบพัฒนาจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดสูง การสูญเสียน้ำมาก แต่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลน้อยกว่า ในขณะที่การแช่อิ่มแบบช้ามีการถ่ายโอนมวลสารต่ำ การสูญเสียน้ำน้อย จึงเกิดการเหี่ยวยุบน้อยกว่า มะม่วงแช่อิ่มแบบพัฒนามีสีเหลืองอ่อนกว่ามะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า ($p < 0.05$) แต่การยอมรับของผู้บริโภคไม่แตกต่างกันอยู่ในระดับชอบปานกลาง การผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งจะสูญเสียผลผลิตมากในการตัดแต่งถึงร้อยละ 52.99 และในระหว่างการแช่อิ่มมีการสูญเสียร้อยละ 10.91 และ 7.01 สำหรับการผลิตแบบพัฒนาและแบบช้าตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลผลิตโดยรวมพบว่าการผลิตแบบช้าและการผลิตแบบพัฒนามีปริมาณร้อยละ 34.96 และ 32.58 ตามลำดับ สำหรับต้นทุนการผลิตพิจารณาเฉพาะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีราคา 148.56 และ 144.43 บาทต่อกิโลกรัมของผลิตภัณฑ์ สำหรับการผลิตแบบช้าและแบบพัฒนาตามลำดับ

Thesis Title The Development of Process for Mango Glacé Production.
Author Miss Pattharaporn Yuthachit
Major Program Food Technology
Academic Year 1998

Abstract

The study on the process development for mango glacé production was carried out. In the preparation stage, raw material should be soaked in the mixing solution of 0.1% sodium metabisulphite and 0.7% calcium chloride for 6 hours in order to prevent browning reaction and improve the texture.

Variables affecting mass transfer of water sugar and acid were studied. During the syreping process of mango, the agitation had a minor effect on mass transfer. The syreping by a step-wise process of 30→50→70 °Brix (4 hours interval) was better than syreping in 70 °Brix solution ($p < 0.05$), but no differences were obtained when compared to syreping by a step-wise of 30→40→50→60→70 °Brix ($p > 0.05$). In addition, the syreping by a step-wise of 30→50→70 °Brix rendered the minimum immersion time. There were no differences in water loss in the temperature range of 50 - 70 °C, but the treatment of 50 °C showed the maximum solid gained ($p < 0.05$). At the higher temperature (more than 50 °C), pectin was probably dissolved and blocked in the intracellular passage, resulting in low sugar diffusion. Size of mango piece did not affect mass transfer ($p > 0.05$) due to the similar thickness.

Moisture content of mango glacé dried at 60 °C for 5 hours was 19.39%. Water activity was 0.60, which is suitable for storage. The constant rate period was not found during the drying process.

The comparison of mass transfer, product quality, yield and cost between the slow process and developed process was conducted. Mass transfer of developed process was better than slow process because of the enhancing factors in the mass transfer. As a result, the diffusion coefficient of water, sugar, and acid as well as water loss of developed process were higher, while sugar gained was lower. The slow process gave the lower water loss because of lower mass transfer, resulting in less shrinkage. The lighter yellow color of final product from developed process was observed, compared with the slow one ($p < 0.05$). No differences in the overall acceptability were found. During preparation raw material, the loss of 52.99% was observed and during the syruping process, the loss was 10.91% and 7.01% for developed process and slow process, respectively. The total yield of slow process and developed process were 34.96% and 32.58%, respectively. The product costs of slow process and developed process were estimated to be 148.56 and 144.43 baht/Kg product, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์ปิยรัตน์ หนูสูง กรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้อง และความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณตร กรรมการผู้แทนคณะอุตสาหกรรมเกษตร รองศาสตราจารย์ถนอมจิต สุภาวิตา กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย และบุคลากรในคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดจนนักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบชิม

และผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ด้วยความเคารพรักอย่างที่สุด ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคน สำหรับกำลังใจและการช่วยเหลือต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ ด้วยดี

ภัทราพร ยุธาชิต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการตารางภาคผนวก	(11)
รายการรูป	(12)
รายการรูปภาคผนวก	(17)
ตัวย่อและสัญลักษณ์	(18)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
ตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	33
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	34
3. ผลและวิจารณ์	48
4. สรุป	112
เอกสารอ้างอิง	116
ภาคผนวก	126
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	126
ภาคผนวก ข การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการแช่ส้ม	133
ภาคผนวก ค การหาผลผลิตมะม่วงแช่ส้มแบบซ้ำและแบบพัฒนา	144
ภาคผนวก ง ข้อมูลเบื้องต้น และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ ในระหว่างการแช่ส้ม	145
ประวัติผู้เขียน	147

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1. องค์ประกอบทางอาหารของมะม่วงต่อ 100 กรัมส่วนที่บริโภคได้	5
2. ชุดการทดลองการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และการรักษาเนื้อสัมผัสของชิ้นมะม่วงเบา	41
3. ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เนื้อสารละลายอิมตัวของเกลือสำหรับการดูดและการดูดและคายความชื้นที่อุณหภูมิ 30°ซ	45
4. องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเนื้อมะม่วงเบา	49
5. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ และเวลาในการแช่ต่อลักษณะปรากฏของมะม่วงหลังการแช่สารละลาย	52
6. ผลของค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาล	59
7. ค่า WL_{∞} , SG_{∞} , AL_{∞} , C_1 และ B ที่พื้ได้จากสมการที่ (30)	68
8. การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ที่แช่อิ่มมะม่วงด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่อุณหภูมิ 50°ซ ในสภาวะที่มีค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ 200	71
9. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า WL_{∞} , SG_{∞} , AL_{∞} , C_1 และ B ที่พื้ได้ตามสมการที่ (30)	77
10. ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ในการแช่อิ่มมะม่วงโดยปรับเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อม แบบ 30→50→70°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมงด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะค่าเรโนลด์์นัมเบอร์ 200	82
11. ผลของขนาดชิ้นที่มีต่อค่า WL_{∞} , SG_{∞} , AL_{∞} , C_1 และ B ที่พื้ได้ตามสมการที่ (30)	88
12. การเปรียบเทียบผลของขนาดต่อค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ที่แช่อิ่มมะม่วงในน้ำเชื่อมด้วยอัตราส่วน 1 : 3 ที่อุณหภูมิ 50°ซ สภาวะเรโนลด์์นัมเบอร์ 200	91

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
13. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ของมะม่วงในกระบวนการแช่อบแบบช้าและพัฒนา	105
14. การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของมะม่วงแช่อบแห้ง ที่ผ่านการแช่อบแบบช้า และแบบพัฒนา	107
15. คณะกรรมการยอมรับทางประสาทสัมผัสของมะม่วงแช่อบแห้งที่ผ่านการแช่อบ แบบช้าและแบบพัฒนา	109
16. ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์	110
17. ปริมาณการใช้วัตถุดิบ และราคาต้นทุนในการผลิตมะม่วงแช่อบแห้ง จำนวน 1 กิโลกรัมที่ผ่านการแช่อบแบบพัฒนาและแบบช้า	111

รายการตารางภาคผนวก

ตารางผนวกที่	หน้า
ก.1 น้ำหนักตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณซิลเฟออร์	131
ข.1 ปริมาณความชื้นของขึ้นมะม่วงในการทดลองผลของค่าเรโนลด์	137
ข.2 ผลการคำนวณปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุลจากสมการที่ (ข8.3)	138
ข.3 ผลการคำนวณค่า E และ $\ln E$ ในการทดลองผลของค่าเรโนลด์	139
ข.4 ผลการคำนวณความลาดชัน ในการทดลองผลของค่าเรโนลด์	140
ค. การเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนา และแบบซ้ำ	144
ง.1 ข้อมูลและพารามิเตอร์สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด	145

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1. กราฟแสดงการพัฒนาของผลมะม่วงเบาโดยเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มแทงช่อดอกจนผลสุก	3
2. ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์	7
3. การต่อเชื่อมกันระหว่างเกลือแคลเซียมกับสารเพคติน	9
4. ลักษณะเนื้อเยื่อแอปเปิ้ลสด หลังแช่ในสารละลาย PEG200 1 ชั่วโมง และหลังแช่ในสารละลาย PEG6000 1 ชั่วโมง ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 ที่อุณหภูมิ 40°ซ	13
5. ผลของรูปร่างที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารของชิ้นแอปเปิ้ลในสารละลายซูโครสที่อุณหภูมิ 30°ซ	15
6. ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสูญเสีย น้ำ และน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นของสับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกในสารละลายน้ำตาลซูโครส 50°บริกซ์	17
7. อิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายและเวลา ต่อการแพร่ของน้ำ และการแพร่เข้าของตัวถูกละลายในชิ้นแอปเปิ้ลแช่เยือกแข็งรูปทรงลูกบาศก์ที่แช่ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 55 อุณหภูมิ 50°ซ	18
8. เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับเวลา (t) จากทฤษฎีการแพร่แบบจำลองการแพร่อย่างง่าย และผลการทดลอง	20
9. สมดุลของน้ำและน้ำตาลระหว่างการทำแห้งแบบออสโมซิส	22
10. การเปลี่ยนแปลงเศษส่วนเชิงมวลเฉลี่ยขององค์ประกอบของผลไม้ที่แช่ในสารละลายเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	23
11. แผนภาพการสกัดแบบกะ และการสกัดแบบสวนทาง	29
12. ภาพตัดตามขวางและตามยาวของของแข็งรูปทรงวงรี	32
13. มะม่วงเบา	34
14. ถังออสโมซิส	36
15. ตู้อบลมร้อน	37

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
16. ขวดวัดความหนาแน่น	37
17. เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้	38
18. เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส	38
19. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ภายในพื้นมะม่วงเบาและในน้ำเชื่อม ผลต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกพื้นมะม่วงที่เวลาต่างกัน	54
20. อัตราการสูญเสียน้ำ และอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสารละลายชูโครสเข้มข้น 70°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ	55
21. ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อการสูญเสียน้ำ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสารละลายชูโครสเข้มข้น 70°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ	56
22. ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อการหดตัวของพื้นมะม่วงในสารละลายชูโครสเข้มข้น 70°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ	57
23. ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำกับการหดตัวของพื้นมะม่วงแช่อิ่มในสารละลายชูโครสเข้มข้น 70°บริกซ์ ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่อุณหภูมิ 50°ซ สภาวะที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200	58
24. การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดในพื้นมะม่วงที่อุณหภูมิ 50°ซ มีการกวน 118 รอบต่อนาที	62
25. การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่ออัตราการแพร่ น้ำตาล และกรดในพื้นมะม่วงที่อุณหภูมิ 50°ซ มีการกวน 118 รอบต่อนาที	65
26. การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่อสัดส่วนการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดในพื้นมะม่วงที่อุณหภูมิ 50°ซ มีการกวน 118 รอบต่อนาที	67

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
27 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง	70
28. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากผลการทดลองกับการทำนาย	73
29. ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรด ในชิ้นมะม่วงที่แช่หิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70°บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200	75
30. ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดในชิ้นมะม่วงที่แช่หิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200	78
31. ผลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดในชิ้นมะม่วงที่แช่หิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200	79
32. ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วงที่แช่หิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70°บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200	80
33. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากผลการทดลองกับการทำนายที่อุณหภูมิต่าง ๆ	83
34. ผลของขนาดต่อการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรด ในชิ้นมะม่วงที่แช่หิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3	85

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
<p>ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200</p> <p>35. ผลของขนาดต่ออัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดในชั้นมะม่วงที่แช่เย็น โดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200</p> <p>36. ผลของขนาดต่อสัดส่วนการแพร่ของน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และกรดในชั้นมะม่วงแช่เย็นโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200</p> <p>37. ผลของขนาดต่อการหดตัวของชั้นมะม่วงแช่เย็น โดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200</p> <p>38. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด จากผลการทดลองกับค่าจากการทำนายที่ขนาดความหนาแตกต่างกัน โดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50 ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200</p> <p>39. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมะม่วงที่ผ่านการแช่เย็นโดยการปรับน้ำเชื่อม 30→50→70° บริกซ์กับเวลา เมื่อใช้อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง</p> <p>40. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งของมะม่วงที่ผ่านการแช่เย็นโดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70° บริกซ์กับเวลา เมื่อใช้อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง</p> <p>41. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นในชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่เย็นโดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์กับเวลา เมื่อใช้อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง</p>	<p></p> <p>86</p> <p>87</p> <p>89</p> <p>92</p> <p>94</p> <p>94</p> <p>95</p>

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
42. ซอร์พชันไอโซเทอมของมะม่วงแช่อิ่มแห้ง จากการทดลองที่ 30°ซ	97
43. การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลและกรดในชั้นมะม่วง ระหว่างแช่ในสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ และแช่ในสารละลายเกลือที่เวลาต่าง ๆ	99
44. การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดภายในชั้นมะม่วง ในระหว่างการแช่อิ่มในน้ำเชื่อมที่มีการปรับความเข้มข้น 30→40→50→60 →70°บริกซ์	100
45. การเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล การหดตัว และการสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงแช่อิ่มแบบช้าและแบบพัฒนา	102
46. การเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของชั้นมะม่วงหลังการแช่อิ่มในแต่ละชั้นของการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบช้าและแบบพัฒนา	103
47. การเปรียบเทียบการลดลงของกรดในชั้นมะม่วงที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้าและการแช่อิ่มแบบพัฒนา	104
48. ผลิตกัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้าและแบบพัฒนา	108

รายการรูปภาพผนวก

รูปที่	หน้า
ข.1 กราฟหาความขึ้นที่สภาวะสมดุลจากการเชื่อมมะม่วงที่มีค่าเรโนลด์ นัมเบอร์เป็น 0 และ 200	138
ข.2 กราฟหาความลาดชันจากการเชื่อมมะม่วงที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ เป็น 0 และ 200	140

ตัวย่อและสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ผิวของแข็ง (เมตร ²)
AL	=	การลดลงของกรด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
AL _t	=	การลดลงของกรดที่สภาวะสุดท้าย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
AL _∞	=	การลดลงของกรดที่สภาวะสมดุล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
A'	=	สัดส่วนของขนาด
a	=	ครึ่งของความหนาของพื้นที่หน้าตัดตามขวาง (ตามรูปที่ 12) (เมตร)
B'	=	สัดส่วนของขนาด
B ₀	=	ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ที่สภาวะเริ่มต้น (° บริกซ์, โดยน้ำหนัก)
B _t	=	ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ที่เวลาใด ๆ (° บริกซ์, โดยน้ำหนัก)
Bi	=	จำนวนไบออต (Biot number) (ไม่มีหน่วย)
b	=	ครึ่งของความยาวพื้นที่หน้าตัดตามขวาง (ตามรูปที่ 12) (เมตร)
C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย (° บริกซ์)
C _n	=	พารามิเตอร์อันเนื่องมาจากสภาวะเริ่มต้นของการกระจายความ เข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง (ไม่มีหน่วย)
c	=	ครึ่งของความยาวพื้นที่หน้าตัดตามยาว (ตามรูปที่ 12) (เมตร)
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของไบพัต (เมตร)
D _a	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดในของแข็ง (เมตร ² . วินาที ⁻¹)
D _s	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในของแข็ง (เมตร ² . วินาที ⁻¹)
D _w	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในของแข็ง (เมตร ² . วินาที ⁻¹)
E	=	สัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวถูกละลาย (ไม่มีหน่วย)
E _a	=	สัดส่วนที่เหลืออยู่ของกรด (ไม่มีหน่วย)
E _s	=	สัดส่วนที่เหลืออยู่ของน้ำตาล (ไม่มีหน่วย)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

E_w	=	สัดส่วนที่เหลืออยู่ของน้ำ (ไม่มีหน่วย)
j	=	จุดตัดบนแกน Y ในรูป ที่ 8 และสมการ (1)
K	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง (วินาที ⁻¹)
L	=	ปริมาตรของสารละลายในเฟสของเหลว (ลูกบาศก์เมตร)
M_0	=	สัดส่วนความชื้นที่สภาวะเริ่มต้น (ร้อยละ)
M_t	=	สัดส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)
M_w	=	น้ำหนักน้ำที่เวลาใด ๆ (กิโลกรัม)
M_{w0}	=	น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (กิโลกรัม)
M_s	=	น้ำหนักน้ำตาลที่เวลาใด ๆ (กิโลกรัม)
M_{s0}	=	น้ำหนักน้ำตาลเริ่มต้น (กิโลกรัม)
ML	=	ความชื้นสูญเสียน้ำ (ร้อยละ)
m	=	สัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (ไม่มีหน่วย)
N	=	ความเร็วรอบของใบพัด (รอบ . นาที ⁻¹)
N_{re}	=	ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (ไม่มีหน่วย)
q_n	=	eigenvalue ลำดับที่ n มีค่าเป็นบวก (ไม่มีหน่วย)
r	=	ระยะจากจุดกึ่งกลางของแข็ง (เมตร)
RSG	=	อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (กิโลกรัม . นาที ⁻¹)
RWL	=	อัตราการสูญเสียน้ำ (กิโลกรัม . นาที ⁻¹)
S	=	ปริมาตรสารละลายในเฟสของแข็ง (ลูกบาศก์เมตร)
SCD	=	ความแตกต่างของความเข้มข้นน้ำเชื่อม
SG	=	การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (Sugar gain) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SG_f	=	การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสภาวะสุดท้าย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SG_{∞}	=	การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสภาวะสมดุล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Sh	=	จำนวนเซอรูวูด (ไม่มีหน่วย)
SK	=	การหดตัวของชีนมะม่วง (ร้อยละ)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

t	=	เวลาในการแพร่ (วินาที)
t_p	=	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสติก (วินาที)
V	=	ปริมาตรของแข็ง (ลูกบาศก์เมตร)
W_0	=	น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)
W_t	=	น้ำหนักที่เวลาใด ๆ (กิโลกรัม)
WL	=	ปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
WL_t	=	ปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำที่สภาวะสุดท้าย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
WL_∞	=	ปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำที่สมดุล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Wp_t	=	น้ำหนักน้ำที่สูญเสียน้ำ หรือ น้ำตาลเพิ่มขึ้นที่เวลาใด ๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Wp_∞	=	น้ำหนักน้ำที่สูญเสียน้ำ หรือ น้ำตาลเพิ่มขึ้นที่สภาวะสมดุล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
X	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง (กิโลกรัม . เมตร ³)
\bar{X}	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเฉลี่ยในเฟสของแข็ง (กิโลกรัม . เมตร ³)
X_0	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้น ในเฟสของแข็ง (กิโลกรัม . เมตร ³)
\bar{X}^*	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายสมดุล ในเฟสของแข็ง (กิโลกรัม . เมตร ³)
Y	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของเหลว (กิโลกรัม . เมตร ³)
\bar{Y}	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเฉลี่ยในเฟสของเหลว (กิโลกรัม . เมตร ³)
Y_0	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้น ในเฟสของเหลว

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

		(กิโลกรัม . เมตร ³)
Y'	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายสมมูล ในเฟสของเหลว (กิโลกรัม . เมตร ³)
α	=	กราฟ (อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหลวต่อปริมาตรของ สารละลายในของแข็ง) (ไม่มีหน่วย)
γ	=	แฟกเตอร์การสกัดสมมูล (ไม่มีหน่วย) ($\gamma = \alpha$ กรณีการแพร่แบบกะ และ $\gamma = -\alpha$ กรณีการแพร่แบบต่อเนื่อง) (ไม่มีหน่วย)
v	=	แฟกเตอร์รูปทรงของของแข็ง (shape factor) (ไม่มีหน่วย)
τ	=	จำนวนฟิคค์ (Fick number)
∞	=	อนันต์ (infinity)
μ	=	ความหนืด (กิโลกรัม . เมตร ⁻¹ . วินาที ⁻¹)
ρ	=	ความหนาแน่น (กิโลกรัม . ลูกบาศก์เมตร)

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

มะม่วงนับเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยสามารถจำหน่ายเป็นสินค้าในรูปผลสด และผลิตภัณฑ์มะม่วงต่าง ๆ เช่น มะม่วงดอง มะม่วงดองเค็มตากแห้ง มะม่วงแช่อิ่มตากแห้ง มะม่วงแช่อิ่มอบแห้งหรือระเหยน้ำ มะม่วงแผ่นตากแห้ง มะม่วงดองในน้ำปรุงรส มะม่วงสามรส มะม่วงแช่น้ำผึ้ง มะม่วงกวน แยมมะม่วง มะม่วงบรรจุกระป๋อง และน้ำมะม่วงบรรจุกระป๋อง ทั้งตลาดภายในประเทศและภายนอกประเทศ ตลาดภายในประเทศยังคับคั่ง ๆ ที่มีการผลิตออกจำหน่ายกันมานานแล้ว เนื่องจากคนไทยโดยทั่วไปนิยมบริโภคมะม่วงในรูปผลสดทั้งประเภทดิบ และสุกมากกว่าจะบริโภคผลิตภัณฑ์มะม่วง นอกจากนี้ยังมีคู่แข่งของผลิตภัณฑ์ผลไม้ชนิดอื่น ๆ อีกมากมาย จึงเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์มะม่วงชนิดต่าง ๆ ไม่ขยายตัวเท่าที่ควร ส่วนตลาดต่างประเทศสามารถส่งไปจำหน่ายได้ปีละหลายร้อยตัน โดยมีตลาดสำคัญได้แก่ ญี่ปุ่น ไต้หวัน สิงคโปร์ มาเลเซีย ฮองกง สาธารณรัฐประชาชนจีน และมีประเทศคู่แข่งที่สำคัญคือฟิลิปปินส์ (ฉัตรชัย แก้ววัฒนะ, 2533)

การผลิตมะม่วงแช่อิ่มอบแห้ง โดยการใช้กระบวนการดึงน้ำออกด้วยแรงดันออสโมติกโดยแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกสูง (Hypertonic solution) และมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำ (Water activity) จะทำให้เกิดการแพร่ของน้ำออกจากภายในเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) ออกสู่สารละลายภายนอก ทำให้ปริมาณน้ำในชิ้นผลไม้ลดลง และปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นผลไม้มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำลงสามารถป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ (สุวิษ ศิริวัฒนโยธิน, 2530 ; วราวุฒิ ครุสง, 2538) และยังรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ดี เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิไม่สูง จึงเกิดการสูญเสียสี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัสน้อย (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533) แต่ยังมีปัญหาผลิตภัณฑ์มีลักษณะเหี่ยวแห้งหลังการแช่

อิมบอบแห้ง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลสารภายในชิ้นผลไม้ โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นยังไม่มีคำอธิบายไว้อย่างชัดเจน

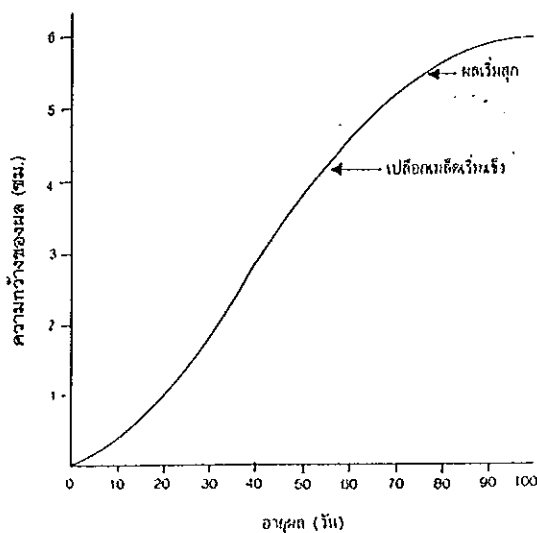
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงมวลสารที่เกิดขึ้นในชิ้นผลไม้ เพื่อหาเทคนิค และแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภคและอุตสาหกรรมมะม่วงแช่อิมบอบแห้ง รวมทั้งเพื่อเป็นการประหยัดแรงงาน พลังงาน ต้นทุน และระยะเวลาในการผลิต นอกจากนี้ยังนำมะม่วงเบาซึ่งเป็นพันธุ์มะม่วงที่มีมากทางภาคใต้ ให้ผลผลิตตลอดทั้งปี มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายเป็นสินค้ามูลค่าเพิ่มในสภาวะที่ผลผลิตล้นตลาดและมีราคาตกต่ำ และเป็นแนวทางเพื่อสามารถนำไปใช้อย่างจริงจังในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของสมการการแพร่ ซึ่งได้รับการพัฒนามาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อช่วยต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงมวลสารที่เกิดขึ้นในกระบวนการแช่อิม

ตรวจเอกสาร

1. มะม่วง

1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมะม่วง

มะม่วงที่ปรากฏในประเทศไทยมีประมาณ 105 พันธุ์ (ถวิล ข่ายสุวรรณ, 2523) สามารถจำแนกเป็น 3 ประเภทตามการใช้ประโยชน์ คือ มะม่วงรับประทานดิบ เช่น มะม่วงมัน มะม่วงรับประทานสุก เช่น มะม่วงอกร่อง ทองคำ และมะม่วงแปรรูป สำหรับมะม่วงประเภทสุดท้ายต้องมีเนื้อแน่น มีผลดก ราคาถูก ขนาดโตปานกลาง เช่น มะม่วงแก้ว เหมาะสำหรับการทำมะม่วงดองให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีที่สุดใน มะม่วงสามปีเหมาะสำหรับทำน้ำมะม่วง และมะม่วงพืชมเสนเหมาะสำหรับทำมะม่วงกวนให้กลิ่นรสและลักษณะเนื้อดีที่สุดใน (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2529) มะม่วงเบา (*Mangifera indica* L. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae) เป็นมะม่วงที่กลายเป็นพันธุ์และเป็นพันธุ์พื้นเมืองทางภาคใต้ พบมากบริเวณจังหวัดสงขลาและปัตตานี มีลักษณะผลขนาดเล็กประมาณเท่าไข่ไก่ ติดผลมากบ้างน้อยบ้างเกือบตลอดปี จึงได้ชื่อว่ามะม่วงเบาตามระยะเวลาการออกผล ติดผลมากในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายนแต่ในเดือนอื่น ๆ จะมีผลอยู่ประปราย การพัฒนาการของมะม่วงเบา(รูปที่ 1)



รูปที่ 1 กราฟแสดงการพัฒนาของผลมะม่วงเบาโดยเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มแทงช่อดอก

จนผลสุก

ที่มา : นพรัตน์ บำรุงรักษ์ (2533)

พบว่า มีระยะเวลาตั้งแต่การออกดอกจนผลสุกหล่นประมาณ 90 วัน และหลังจากมะม่วงแทงช่อประมาณ 10 วันไปแล้ว จะเห็นผลมะม่วงเบาที่มีขนาดเท่าหัวเข้มหมุด เมื่อผลพัฒนาไปเรื่อย ๆ จนมีอายุประมาณ 60 วันเปลือกเมล็ดหรือกะลา ก็เริ่มแข็ง ฉะนั้นการรับประทานมะม่วงดิบจึงควรมีก่อนระยะนี้ ต่อมาเมื่อผลมีอายุประมาณ 70 วัน ผิวผลจะเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นส้ม และสุกเมื่ออายุได้ 90 วัน (นพรัตน์ บำรุงรักษ์, 2533)

1.2 ประโยชน์ของมะม่วงเบา

มะม่วงเบาสามารถใช้รับประทานได้ทั้งผลดิบและสุก มะม่วงที่ยังดิบคืออายุผลน้อยกว่า 60 วัน รับประทานสดกับน้ำปลาหวาน เนื่องจากมีรสเปรี้ยวพอดี มีความกรอบและไม่มีกลิ่นฉุน จึงเหมาะใช้ทำยำมะม่วง แกงส้มมะม่วง มะม่วงดอง มะม่วงกวน และมะม่วงแช่อิ่ม นอกจากนี้ยังรับประทานสุก เพราะมีรสหวานอร่อย (นพรัตน์ บำรุงรักษ์, 2533)

1.3 คุณค่าทางอาหารของมะม่วง

องค์ประกอบหลักที่สำคัญของมะม่วงประกอบด้วย น้ำ และคาร์โบไฮเดรต มะม่วงอ่อนจะมีสารโหรัสฝาด (Astringent) กรด และวิตามินซีในปริมาณที่สูง ในขณะที่มะม่วงสุกมีรสหวาน มีปริมาณโปรวิตามินเอมาก และสารให้กลิ่นมีปริมาณสูง (Singh, 1968 ; Lakshminarayana, 1980) แสดงดังตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีในช่วงการเจริญเติบโตของมะม่วง คือ ความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 70 ในระยะผลอ่อนเป็นร้อยละ 86 เมื่อมีอายุประมาณ 6 สัปดาห์หลังออกผล ปริมาณแป้งจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 13 และสลายตัวเป็นน้ำตาลเมื่อเข้าสู่ระยะสุก ในระยะมะม่วงดิบพบน้ำตาลรีดิวซิง (กลูโคส และฟรุคโตส) มาก แต่ในระยะสุกจะพบน้ำตาลนอนรีดิวซิง (ซูโครส) เพิ่มขึ้น กรดที่พบส่วนมาก คือกรดซิตริกหรือกรดมาลิก ในมะม่วงดิบมีปริมาณกรดทั้งหมดอยู่ร้อยละ 4-5 และลดลงเหลือร้อยละ 0.5-1.0 เมื่อสุก ปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-1.0 ในระยะผลสุก ปริมาณวิตามินซีในผลดิบมีสูงเมื่อผลแก่วิตามินซีจะลดลง สารประกอบฟีนอลที่มีผลทำให้เกิดรสฝาดจะพบมากในระยะแรกของการเจริญ และลดลงอย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 8 และจะค่อย ๆ คงที่ ส่วนประกอบของผนังเซลล์ คือ เซลลูโลส และสารประกอบเพคตินทำให้เนื้อมะม่วงแข็งแรงในขณะดิบ จึงมีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่ามะม่วงสุก เพราะในระหว่างการสุกจะมีเอนไซม์มาย่อยสลายสารเพคติน ธาตุที่พบในมะม่วงได้แก่ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และแซนโทฟิลล์ ผลมะม่วงใน

ขณะสุกสีเขียวของคลอโรฟิลล์ที่เปลือกจะหายไป และมีสีเหลืองเกิดขึ้น สีเหลืองที่ผิวของมะม่วงคือรงควัตถุแคโรทีนอยด์ซึ่งมีทั้งแอลฟาและบีตาแคโรทีน (นิธิยา รัตนปวงษ์ และ ดนัย บุญยเกียรติ, 2533 ; Singh,1968; Lakshminarayana, 1980)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางอาหารของมะม่วงต่อ 100 กรัมส่วนที่บริโภคได้

องค์ประกอบ	ปริมาณ		
	มะม่วงดิบ	มะม่วงหาม	มะม่วงสุก
ความชื้น (กรัม)	82.90	81.10	82.60
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	60.00	69.00	62.00
ไขมัน (กรัม)	0.40	0.60	0.30
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (กรัม)	15.50	17.50	15.90
สารใยในอาหาร (กรัม)	0.40	0.20	0.50
โปรตีน (กรัม)	0.60	0.40	0.60
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10.00	10.00	10.00
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	15.00	15.00	15.00
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.20	0.30	0.30
เวตินอล (ไอ.ยู.)	183.00	392.00	3,133.00
โทอามีน (มิลลิกรัม)	0.06	0.06	0.06
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.05	0.05	0.05
ไนอะซีน (มิลลิกรัม)	0.60	0.60	0.60
กรดแอสคอร์บิก (มิลลิกรัม)	62.00	48.00	36.00

ที่มา : กองโภชนาการ กรมอนามัย (2530)

2. ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปผลไม้ที่นิยมมากวิธีหนึ่งและทำกันมานานในประเทศไทย โดยใช้หลักการลดปริมาณน้ำไปพร้อม ๆ กับการทำให้น้ำตาลแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อผลไม้ในระดับที่พอเหมาะแล้วทำให้แห้งเพื่อให้ความชื้นต่ำ มีอายุการเก็บรักษายาวนาน เนื่องจากน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงจะดึงหรือยึดเอาน้ำที่มีอยู่ในผลไม้ออกไปจนทำให้เกิดสภาพที่มีความดันออสโมติกสูง และในกระบวนการแช่อิ่มจะมีการสูญเสียบางส่วนออกจากเนื้อเยื่อผลไม้ จึงทำให้มีปริมาณน้ำอิสระเหลืออยู่ภายในอาหารปริมาณต่ำ ไม่เพียงพอต่อการเจริญของจุลินทรีย์จึงสามารถถนอมรักษาไว้ได้ (สุวิษ ศิริวัฒน์ โยธิน, 2530; วราวุฒิ ครุสง, 2538) การผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้งประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

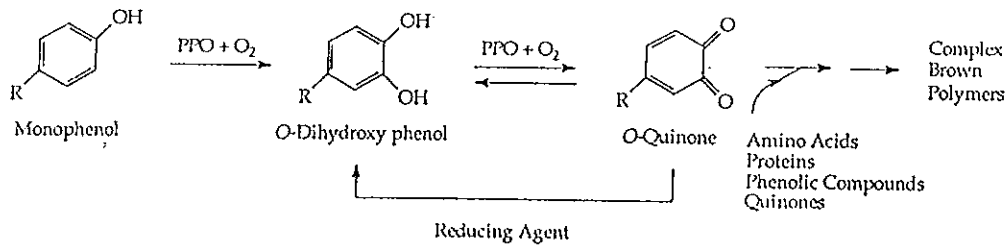
2.1) การเตรียมผลไม้ก่อนการแช่อิ่ม

ผลไม้ที่นำมาแช่อิ่มควรมีลักษณะไม่ดิบหรือสุกมากจนเกินไปควรมีเนื้อแน่น ถ้าดิบเกินไปสีจะไม่สวย และถ้าสุกเกินไปเนื้อจะเละ (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; บุญมา ซึ่งสินธิพร, 2528 ; อ่อนรวี รัตนพันธ์, 2533) วิธีการเตรียมผลไม้ก่อนการแช่อิ่มมีดังนี้

1. การป้องกันและยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์นั้นจัดแบ่งเป็น 2 อย่างคือ อย่างแรกเกิดจากเอนไซม์ เป็นผลมาจากเนื้อเยื่อผลไม้ถูกทำลายในระหว่างการแปรรูป ทำให้สารประกอบจำพวกโมโนฟีนอล (Monophenol) อยู่ในสภาพที่มีออกซิเจน และเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol oxidase : PPO) จะเติมหมู่ไฮดรอกซิลแล้วเกิดเป็นสารอโธไดฟีนอล (o-Diphenols) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นอโธควิโนน (o-Quinones) สารควิโนนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงและทำปฏิกิริยาต่อไปกับสารประกอบฟีนอล กรดอะมิโน และสารอื่น ๆ โดยไม่ใช้เอนไซม์แล้วเกิดเป็นสารที่มีสีมีโครงสร้างซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์เป็นผลมาจาก ปฏิกิริยาของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และหมู่อะมิโนที่เป็นอิสระทำให้เกิดเม็ดสีเมลานอยดิน (melanoidin) ซึ่งเรียกกการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Sapers, 1993) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นวัตถุเจือปนอาหารที่มีผลต่อคุณภาพของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) ทั้งที่เกิดจากเอนไซม์โดยยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสและยังทำปฏิกิริยากับสารตัวกลาง (intermediates) ของปฏิกิริยาเพื่อป้องกันการเกิดเม็ดสีน้ำตาล รวมทั้งยับยั้งการเกิดสี

น้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ โดยทำปฏิกิริยากับสารตัวกลางที่มีกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl intermediate) คือน้ำตาลรีดิวส์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในผลไม้แช่อิ่ม จึงสามารถยับยั้งไม่ให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปแล้วเกิดเป็นสารสีน้ำตาล (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; รัตน์ ตันตะพานิชกุล, 2536 ; วราวุฒิ ครูสง, 2538 ; ไพโรจน์ วิริยจारी, 2539)



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์

ที่มา : McEvily และคณะ (1992 อ้างโดย Sapers, 1993)

ไพโรจน์ วิริยจारी และคณะ (2539) พบว่า การรมควันด้วยกำมะถัน 10 กรัม ในตู้อบ 1 ลูกบาศก์เมตร นาน 20 นาที ก่อนและหลังการผลิตปลับกึ่งแห้ง สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดีทำให้ปลับมีสีสวยใกล้เคียงกับธรรมชาติ

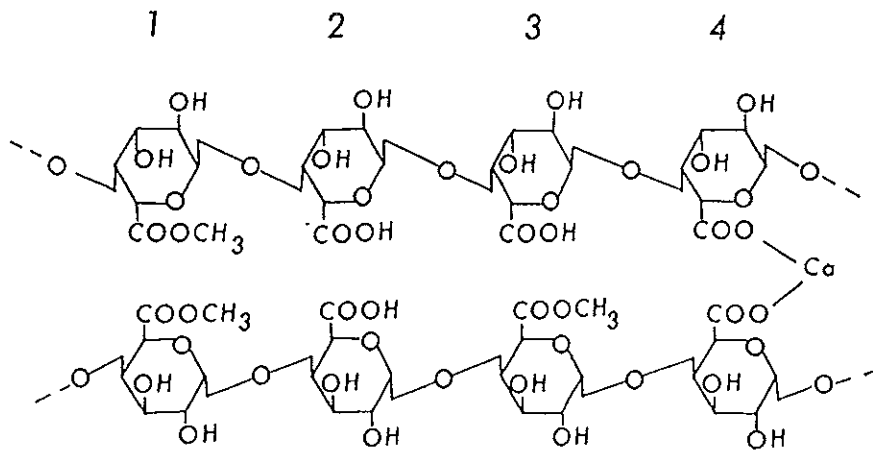
รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2538) ทดลองเปรียบเทียบผลของการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในสับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง ระหว่างการเติมกรดแอสคอร์บิกร้อยละ 0.75 ในส่วนผสมของสับปะรดและน้ำตาล กับการเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 500 พีพีเอ็ม และชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล หลังจากทิ้งไว้ 16 - 18 ชั่วโมง นำสับปะรดที่ได้จากส่วนผสมทั้งสามไปอบแห้งที่ 65°C นาน 6 ชั่วโมง พบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์แสดงค่าการเกิดสีน้ำตาลต่ำที่สุด

นอกจากนี้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก็มีผลในการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ โดยไปทำลายกระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ด้วยการเข้าไปจับสารคาร์โบไฮเดรต ทำให้จุลินทรีย์นำไปเป็นอาหารไม่ได้ และมีผลต่อพันธะไดซัลไฟด์ของเอนไซม์ในจุลินทรีย์ทำให้เมตาบอลิซึมเกิดขึ้นไม่ได้ การทำปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับหมู่คีโตนทำให้เกิดไฮดรอกซิลซัลไฟเนท (Hydroxylsulfonates) ซึ่งมีผลต่อการหายใจของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับนิโคตินาไมด์ไดนิวคลีโอไทด์ (Nicotinamide dinucleotide) (Tanner and Chiechester, 1983) ปฏิกิริยาของซัลไฟต์ที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อผู้บริโภคที่ไวต่อสารนี้จะพบในผู้บริโภคส่วนน้อย โดยก่อให้เกิดปฏิกิริยาการแพ้ที่รุนแรง ทำให้เกิดอาการหอบหืดอย่างรุนแรงหรือเกิดปฏิกิริยาการแพ้ เช่นเดียวกับโรคภูมิแพ้หรือแพ้ยา ดังนั้น FDA ได้กำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์จำพวกผัก และผลไม้ไม่เกิน 2,000 พีพีเอ็ม (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2538) ส่วนมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้งในประเทศไทยต้องมีตกค้างไม่เกิน 1,000 พีพีเอ็ม (มอก., 2532)

2. การรักษาเนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัส เกิดจากการสลายตัวของสารพวกเพคติน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ และอยู่ในมิดเดิลลามลลา (middle lamella) ทำหน้าที่ยึดเซลล์ไว้ด้วยกัน ผลไม้ดิบจะมีความแข็งกรอบ ความแน่นเนื้อสูง เนื่องจากสารเพคตินอยู่ในรูปโปรโตเพคติน (protopectin) มีโครงสร้างซับซ้อน และไม่ละลายน้ำเมื่อผลไม้เริ่มสุกโปรโตเพคตินจะถูกสลายโดยเอนไซม์โปรโตเพคตินเนส (protopectinase) ได้เป็นกรดเพคตินิกที่ละลายน้ำได้บ้าง เอนไซม์เพคตินเมทิลเอสเทอร์เรส (pectin methylesterase) จะทำการแยกกลุ่มเมทอกซิล (methoxyl group) ออกจากโมเลกุลของกรดเพคตินิกเป็นกรดเพคติก และโพลีกาแลคทูโรเนส (polygalacturonase) จะตัดความยาวของโมเลกุลกรดเพคติกเป็นกรดกาแลคทูโรนิก ทำให้ผลไม้สุกมีเนื้อนุ่มขึ้น นอกจากนี้ในระหว่างการแปรูปผลไม้จะทำให้เกิดการฉีกขาดของเนื้อเยื่อ สารละลายสามารถผ่านเข้าออกจากเซลล์ได้ง่าย ทำให้เซลล์สูญเสียความเต่ง ผลไม้ไม่กรอบ การรักษาเนื้อสัมผัสให้ดีขึ้นทำได้โดยแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีแคลเซียมออกไซด์ โดยกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิกอิสระซึ่งติดอยู่บนสายของกรดเพคติกจะจับกับแคลเซียมออกไซด์เป็นสารประกอบแคลเซียมเพคเตทไม่ละลายน้ำ (รูปที่ 3) ทำให้โครงสร้างของเซลล์คงรูปอยู่ได้ เนื้อผลไม้มีความแข็งกรอบขึ้น (ประสิทธิ์ อติวิระกุล,

2527 ; รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2536) แต่ถ้าใช้เวลาในการแช่นานเกินไปอาจทำให้ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เกาะที่ผิวผลไม่มากเกินไป จะเกิดคราบสีขาวของแคลเซียมบนผลิตภัณฑ์ให้รสชาติฝืดและมีเนื้อสัมผัสแข็งเกินไป (สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน, 2530)



รูปที่ 3 การต่อเชื่อมกันระหว่างเกลื่อแคลเซียมกับสารเพคติน
ที่มา : Bourne (1976)

2.2 แช่ในสารละลายเกลื่อ

สำหรับผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว หรือฝาดมาก เช่น กระท้อน มะยม มะม่วง ตะลิงปลิง ควรนำมาแช่ในน้ำเกลื่อเพื่อลดความฝาด ความเปรี้ยว และทำให้รสชาติดีขึ้น (ฉลองชัย จันทรเพ็ญ, 2532) Glosso (1965 อ้างโดย สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน, 2530) แนะนำวิธีการผลิตผลไม้แช่อิ่มเพื่อทำให้ผลไม้มีความแน่นแข็งไม่หืดตัวเมื่อผ่านกระบวนการแช่อิ่ม แต่ก็มีผลเสียอาจทำให้เกิดรสเค็ม

2.3 การลวกน้ำร้อน

ควรลวกผักหรือผลไม้ก่อนนำไปแปรรูปเพื่อยับยั้งเอนไซม์ ทำได้โดยการต้มที่อุณหภูมิสูงถึง 88°ซ 2 - 3 นาที สามารถทำลายเอนไซม์ทุกชนิดในอาหาร (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527) หรือหนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง 100°ซ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ (รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2536) นอกจากนี้ยังทำให้วัตถุดิบสะอาด ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลง เป็นการไล่อากาศออกจากเซลล์พืชทำให้ลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และช่วยปรับปรุงลักษณะ

เนื้อของอาหาร ทำให้นุ่มขึ้นหลังการคั้นรูปในกรณีของอาหารแห้ง และยังทำให้เนื้อเยื่อยอมให้มีการซึมผ่านของสารได้ดีขึ้นทำให้เกิดการแพร่ของสารเข้าออกจากเซลล์ได้เร็วขึ้น (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน, 2530)

2.4 การแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อม

การแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อมถือว่าเป็นขั้นตอนหลักในการดองน้ำออก และเพิ่มน้ำตาลให้กับผลไม้ ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จะมีน้ำตาลปริมาณสูงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน น้ำตาลที่มากกว่าร้อยละ 65 จึงมีรสหวานจัด น้ำหนักของผลิตภัณฑ์จะลดลงไปประมาณร้อยละ 40 - 50 (สมบัติ ขอทวีวัฒนา, 2529 ; อ่อนรวี รัตนพันธ์, 2533) วิธีการแช่อิ่มมีทั้งแบบเร็ว คือ การเตรียมน้ำเชื่อมหวานปานกลาง (ความเข้มข้นร้อยละ 30 - 40) แล้วนำผลไม้ปอกเปลือก ตัด หั่น เอาจมลัดและแกนออก แช่ลงในน้ำเชื่อม นำไปตั้งไฟอ่อน ๆ ค่อย ๆ เคี่ยวจนน้ำเชื่อมงวด (ความเข้มข้นร้อยละ 60 - 70) วิธีนี้ใช้เวลาสั้น ทำได้เร็ว แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลักษณะเหี่ยวยุบ หดตัวมาก ความหวานไม่สม่ำเสมอ มักมีสีน้ำตาลเกิดจากการเคี่ยวน้ำตาล และอาจมีกลิ่นไหม้ของน้ำตาล วิธีนี้นิยมใช้กับผักและเปลือกส้มโอ (สมบัติ ขอทวีวัฒนา, 2529 ; ธนวรรณ บุญปั้น, 2537) และการแช่อิ่มแบบช้า คือ การนำผลไม้ที่เตรียมไว้แล้วแช่ในน้ำเชื่อมหวานปานกลาง (ความเข้มข้นร้อยละ 30 - 40) เป็นการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ทุก ๆ 24 ชม. หรือ 48 ชม. ทำแบบนี้เป็นเวลา 6 - 7 วัน ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะดีกว่าวิธีแรก ผลไม้ค่อนข้างคงรูป มีความหวานสม่ำเสมอ และสีไม่คล้ำ แต่ยังมีขีดจำกัดในกระบวนการผลิต จึงต้องใช้เวลาชานกว่าน้ำตาลจะซึมผ่านเข้าไปยังเนื้อผลไม้ได้มากพอ ดังนั้นถ้าไม่มีการควบคุมการผลิตให้ดีแล้วอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย เช่น การมีกลิ่นหมักและการเน่าเสีย เป็นต้น (สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน, 2530 ; ธนวรรณ บุญปั้น, 2537)

สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน (2530) ได้ศึกษาวิธีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งพบว่ามะละกอที่ผ่านการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 ทุก ๆ 12 ชม. มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงน้อยกว่า และให้ลักษณะผลิตภัณฑ์ดีกว่ามะละกอที่ผ่านการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ทุก ๆ 24 ชม. และเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ทุก ๆ 48 ชม. เนื่องจากเกิด

ความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำเชื่อมกับในมะละกอน้อยกว่า ทำให้อัตราเร็วและปริมาณของน้ำที่สูญเสีย้น้อยกว่า

2.5 การล้างคราบน้ำตาล

นำผลไม้ผ่านการแช่ต้มล้างในน้ำร้อน (ประมาณ 70 - 80°ซ) แล้วเอาขึ้นทันทีเพื่อล้างน้ำตาลที่เคลือบผิวออกแล้วผึ่งบนตะแกรงให้แห้ง (บุญมา ซึ่งสนธิพร, 2528 ; ออนรรีรัตน์พันธุ์, 2533 ; ธนวรรณ บุญปั้น, 2537 ; Wongkrajang, 1996)

2.6 การอบแห้ง

การอบแห้งควรใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหม้ของน้ำตาล (Caramelization) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งจะอยู่ในช่วง 50 - 70°ซ ส่วนเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะแตกต่างกันออกไป (สุวิษ ศิริวัฒน์โยธิน, 2530) แต่จุดที่สำคัญคือต้องอบผลไม้แช่ต้มให้มีค่าความชื้นร้อยละ 15 - 30 หรือลดประมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity) ให้อยู่ในช่วง 0.60 - 0.85 จึงสามารถเก็บรักษาได้นาน (ไพโรจน์ วิริยจारी, 2539)

3. ปัญหาคุณภาพทางเคมี และกายภาพของผลไม้แช่ต้มแห้ง

ลักษณะทั่วไปของผลไม้อบแห้งชนิดปรุงแต่งรสหวานที่ดีคือ ต้องคงลักษณะเนื้อที่ดีตามชนิดของผลไม้ที่ทำผลิตภัณฑ์ ไม่จับตัวเป็นก้อน ลักษณะภายนอกไม่เปื่อยขึ้น เนื้อไม่กระด้าง มีรูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 มาตรฐานเปียกปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (น้ำตาลอินเวิร์ต) ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 65 ของน้ำหนักอบแห้ง สามารถเติมวัตถุกันเสียได้โดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และควรมีตกค้างในผลิตภัณฑ์ได้ไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มอก., 2532) แต่ในกระบวนการผลิตผลไม้แช่ต้มแห้งในปัจจุบันพบทั้งปัญหาด้านคุณภาพทางเคมี และกายภาพหลายอย่างที่ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค และตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คือ

3.1 ปัญหาการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์

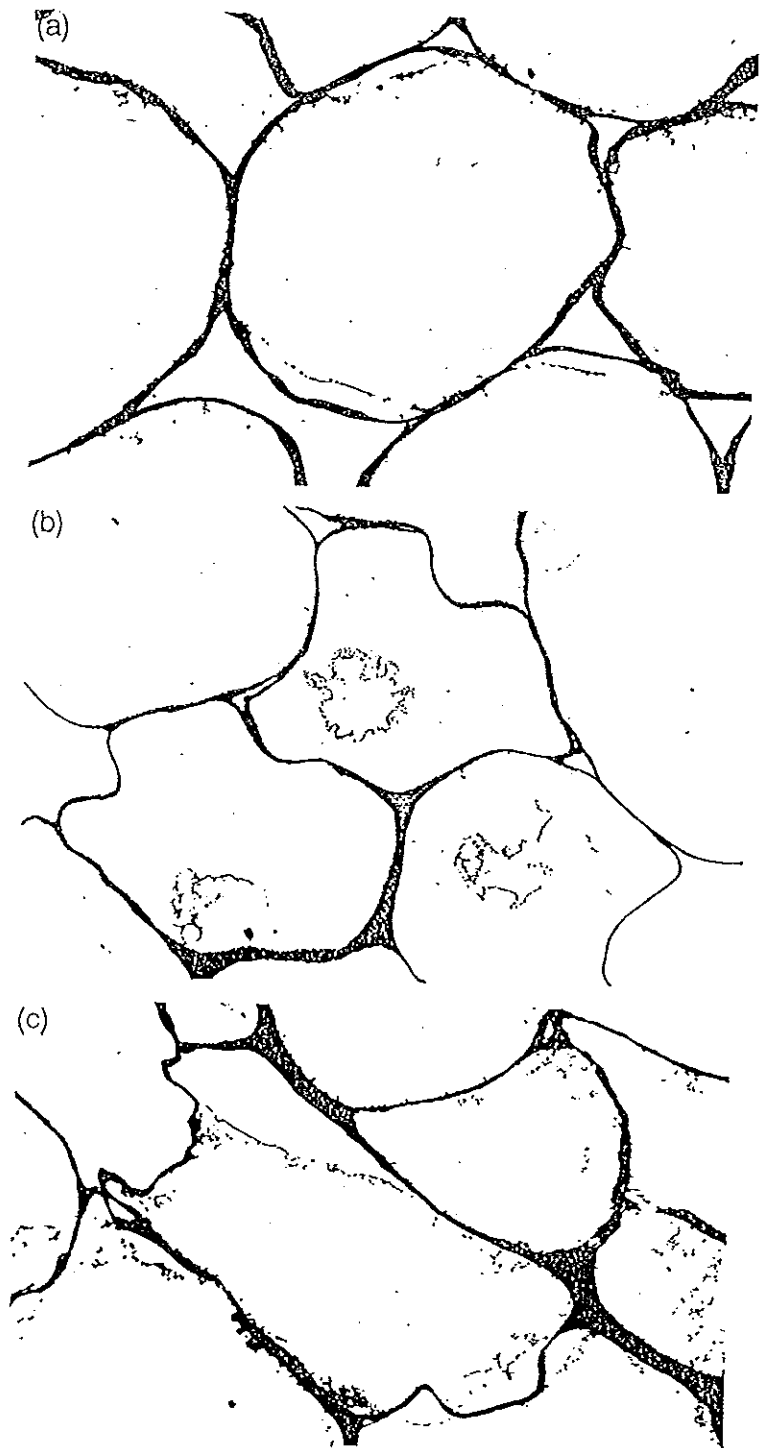
การเกิดสีน้ำตาลเกิดจากเอนไซม์และปฏิกิริยาทางเคมี สามารถป้องกันได้โดยการลวก เพื่อทำลายเอนไซม์ โดยใช้เวลา และอุณหภูมิที่เพียงพอในการทำลายเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) และการเติมสารประกอบซัลไฟต์ซึ่งนิยมใช้ในรูปของสารละลาย

โซเดียมหรือโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ ที่ระดับไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน โดยจะสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิตเหลือปริมาณตกค้างในผลิตภัณฑ์สุดท้ายเพียง 50 - 100 พีพีเอ็ม ถ้าใช้ในปริมาณสูงมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีซีด มีกลิ่นของซัลเฟอร์ ทำลายวิตามินบี และทำให้เกิดการแพ้ในบางคน (รัชนี้ ตันทะพานิชกุล, 2536 ; ประสาร สวัสดิ์ชิตัง, 2538 ; สุคนธ์ชื่น ศรีงาม, 2539)

3.2 ลักษณะเหี่ยวยุ่น

เกิดจากการต้มหรือลวกผลไม้เนานเกินไปจนทำให้ผลไม้เนิม เมื่อนำมาแช่ฉิมเนื้อผลไม้จะหดตัวมากจนเหี่ยวยุ่น นอกจากนี้ยังเป็นผลเนื่องมาจากการใช้น้ำเชื่อมในการแช่ฉิมครั้งแรกเข้มข้นสูงมาก ควรใช้น้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 30 ํบริกซ์ ในครั้งแรกของการแช่ฉิม (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; สุวิฑ ศิริวัฒนโยธิน, 2530 ; ธนวรรณ บุญปั้น, 2537)

Saurel และคณะ (1994) ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารและลักษณะปรากฏของเนื้อเยื่อในระหว่างการทำแห้งแอปเปิ้ลสดแช่ในสารละลายโพลีเอทธิลีนไกลคอล (polyethylene glycols : PEG) น้ำหนักโมเลกุลขนาด 200 และ 6000 ดัดตันความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 40 ํซ พบว่าตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะส่งผลทำให้ปริมาณน้ำแพร่ออกจากชิ้นผลไม้ได้สูงมากกว่าตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีการแพร่ผ่านช่องว่างเข้าสู่เซลล์ได้น้อยและมีการอุดตันอยู่ที่บริเวณผิวของชิ้นผลไม้ จึงทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกสูงเกิดแรงขับ (driving force) ของน้ำสูง การสูญเสียน้ำจึงเกิดขึ้นมากทำให้เนื้อเยื่อเหี่ยวหดตัว แต่สารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีโอกาสแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ได้มากกว่า และค่อย ๆ เข้าไปที่ละน้อยจึงลดความแตกต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกชิ้นผลไม้ ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์เป็นไปอย่างช้า ๆ จึงทำให้เซลล์คงรูปอยู่ได้เนื้อเยื่อเหี่ยวหดตัวน้อยลง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะเนื้อเยื่อแอปเปิ้ล (a) สด, (b) หลังแช่ในสารละลาย PEG200 1 ชั่วโมง และ (c) หลังแช่ในสารละลาย PEG6000 1 ชั่วโมง ระดับความเข้มข้นร้อยละ 60 ที่อุณหภูมิ 40°ซ กำลังขยาย x400, 1 เซนติเมตร = 20 ไมโครเมตร

ที่มา : Saurel และคณะ (1994)

3.3 การเกิดผลึกน้ำตาลบนผิวผลไม้

เกิดเนื่องจากน้ำเชื่อมมีความเข้มข้นสูงตกเป็นผลึกน้ำตาล ควรเติมน้ำเล็กน้อย ต้มให้เดือดอีกครั้ง มีการปรับกรดซิตริกร้อยละ 0.1 จะสามารถป้องกันน้ำตาลตกผลึก (ธนวรรณ บุญปั้น, 2537)

3.4 ผลไม้ไม่มีผิวเยิ้ม

เนื่องจากการเติมกรดในน้ำเชื่อมมากเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาอินเวอร์ชันมาก ผลไม้แช่อิ่มจะดูความขุ่นสูงเกิดลักษณะนิ่ม และเหนียวเหนอะมีน้ำเยิ้มออกมา จึงควรลดปริมาณกรด และควรเก็บในภาชนะบรรจุปิดสนิทในระหว่างการเก็บรักษา (ธนวรรณ บุญปั้น, 2537)

3.5 ผลไม้แข็งเกินไป

แสดงว่าอาจต้มผลไม้ในน้ำเชื่อมน้อยเกินไป หรือเติมกรดในน้ำเชื่อมน้อยไป หรือใช้เวลาในการเชื่อมเร็วเกินไป ควรใช้เวลาเชื่อมยาวนานขึ้นโดยเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลให้ช้าลง (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527)

3.6 ผลไม้แช่อิ่มเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อรา

เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่มีความขุ่นสูง และกระบวนการผลิตไม่สะอาด ควรทำการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง ก่อนการบรรจุในภาชนะที่แห้ง สะอาด และปิดสนิท (ธนวรรณ บุญปั้น, 2537)

4. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแพร่ของน้ำ และตัวถูกละลาย

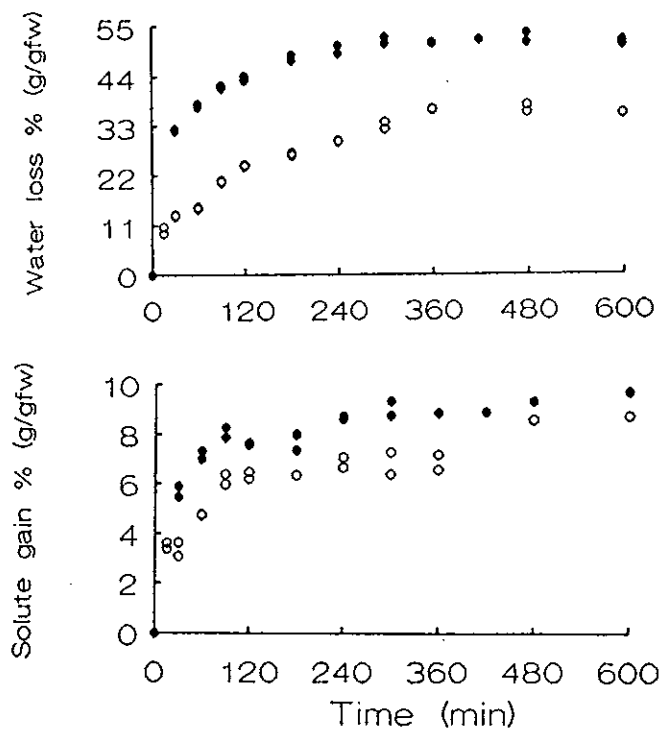
4.1 ชนิดของผลไม้ พันธุ์ และความสุข

กระบวนการแพร่ของน้ำ และตัวถูกละลายในผลไม้แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ ผลไม้สุก จะเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้เร็วกว่าผลไม้ดิบ (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533) เนื่องจากในผลไม้สุกมีสารประกอบพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปโมเลกุลน้ำถูกย่อยสลายเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ทำให้มีเนื้อนุ่มขึ้น สารละลายสามารถผ่านเข้าออกจากเซลล์ได้ง่าย (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527)

4.2 รูปร่างและขนาดของผลไม้

รูปร่างและขนาดของผลไม้มีผลต่ออัตราการแพร่ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้สูงน้ำจะซึมออกได้เร็ว ผลไม้ชิ้นใหญ่หรือที่มีรูปร่างกลมน้ำจะซึมออกได้น้อย เพราะทั้งสองกรณีมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อย (ออนรวิรัตน์พันธุ์, 2533)

Monsálve-González และคณะ (1993) อธิบายถึงอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีผลโดยตรงกับการถ่ายโอนมวลสาร พบว่าแอปเปิ้ลที่มีรูปร่างแบนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเป็น 3.5 (เส้นผ่าศูนย์กลางรวม 7 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.4 ซม. และหนา 1 ซม.) จะมีการสูญเสียน้ำและตัวถูกละลายน้อยกว่าในชิ้นรูปร่างทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเป็น 5.64 (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 ซม. และหนา 1 ซม.) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลของรูปร่างที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารของชิ้นแอปเปิ้ลในสารละลายซูโครสที่อุณหภูมิ 30° ซ (บน) ร้อยละของน้ำที่สูญเสีย (กรัมของน้ำต่อน้ำหนักแอปเปิ้ลสด)(ล่าง) ร้อยละของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (กรัมของน้ำตาลต่อน้ำหนักแอปเปิ้ลสด) (○ แวน, ● ทรงกระบอก)

ที่มา : Monsálve-González และคณะ (1993)

4.3 การเตรียมชิ้นผลไม้ก่อนการออกซิเมซิส

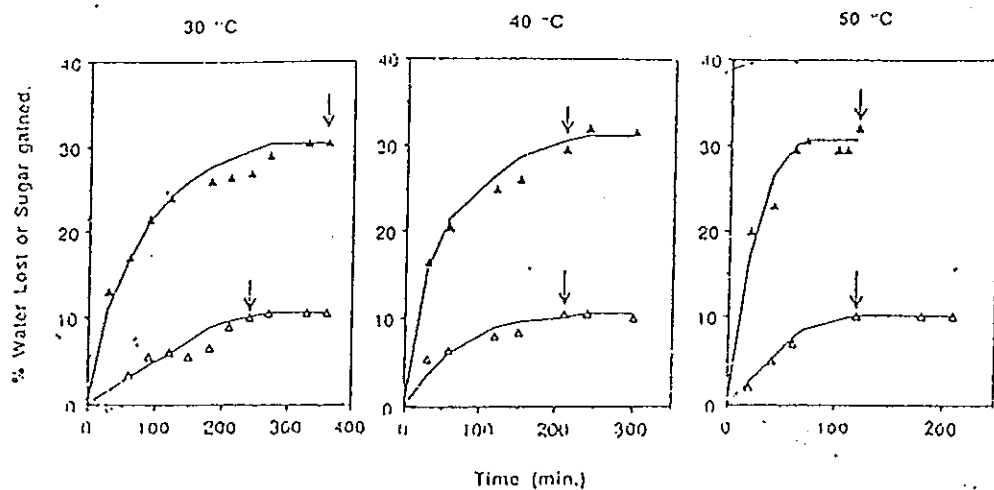
การใช้อุณหภูมิสูงในการนึ่ง หรือลวกจะทำให้เนื้อเยื่อของผลไม้อ่อนตัวลง เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซลล์เมมเบรนในการคัดเลือกสารผ่านเข้าออกจากเซลล์ ทำให้เนื้อเยื่อยอมให้มีการซึมผ่านได้มากขึ้น น้ำตาลจึงถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้มากกว่าสภาวะปกติ (อ๋อนรวิ รัตนพันธุ์, 2533 ; ทนง ภัครัชพันธุ์, 2539 ; Mauro and Menegalli, 1995)

สุวิข ศิริวัฒน์โยธิน (2530) ได้ศึกษาการสูญเสียน้ำของมะละกอในน้ำเชื่อมเข้มข้นพบว่ามะละกอที่มีการลวกด้วยน้ำร้อนมากเกินไปจะสูญเสียน้ำมากกว่ามะละกอที่มีการลวกในน้ำร้อนพอประมาณ (15-30 นาที) และที่ไม่ผ่านการลวก นอกจากนี้การใช้ซัลไฟต์เพื่อช่วยยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ (Nonenzymatic browning reaction) และยังมีผลในการป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529 ; รัชณี ตันตะพานิชกุล, 2536) การใช้แคลเซียมคลอไรด์กับผลไม้ก่อนการแช่อิ่ม และการทำแห้งเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส ในการผลิตมะละกอแช่อิ่มอบแห้งควรมีการแช่สารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร้อยละ 0.2 - 0.3 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1-2 เป็นเวลา 2 สัปดาห์จะทำให้โครงสร้างของเซลล์ผลไม้แข็งแรงพอที่จะไม่เกิดการหดตัวเมื่อนำไปผ่านการแปรรูป เนื่องจากปฏิกิริยาของแคลเซียมคลอไรด์กับสารเพคติน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ช้า ต้องใช้เวลานานเพื่อให้โครงสร้างเซลล์แข็งแรงพอที่จะทนต่อความดันเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำตาล ซึ่งจะทำให้น้ำตาลสามารถเข้าไปแทนที่น้ำในมะละกอได้ เป็นผลให้มะละกอมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีมีลักษณะดี ไม่หดตัว (สุวิข ศิริวัฒน์โยธิน, 2530)

4.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในน้ำเชื่อมที่ใส่แช่ผลไม้สูงขึ้น น้ำจะซึมออกจากเซลล์ได้เร็วขึ้น (อ๋อนรวิ รัตนพันธุ์, 2533) โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อกระแสการพาตามธรรมชาติ ทำให้ความต้านทานภายนอกลดน้อยลง มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำตาลและน้ำเร็วขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล และน้ำเร็วขึ้น (จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2535) ดังนั้นแรงดันออสโมติกที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Beristain และคณะ (1990) ได้ทดลองทำแห้งสับประรดด้วยวิธีออสโมติก และศึกษาผลของอุณหภูมิที่ระดับ 30 40 และ 50 °ซ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การเคลื่อนย้ายของน้ำออกจากชิ้นผลไม้ได้เร็วขึ้น (ดังรูปที่ 6) โดยการสูญเสียน้ำ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) กับเวลา



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสูญเสียน้ำ (▲) และน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (▼) ของสับประรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกในสารละลายน้ำตาลซูโครส 50°บริกซ์ จุดลูกศรชี้คือจุดสมดุลการแพร่

ที่มา : Beristain และคณะ (1990)

Yang และ Maguer (1992) อธิบายว่าที่ระดับอุณหภูมิสูง (50°ซ) มีผลไปทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้คุณสมบัติการคัดเลือกสารของเซลล์ถูกทำลาย แต่ที่อุณหภูมิ 25°ซ ไม่มีผลต่อการทำลายคุณสมบัติการคัดเลือกสารของเยื่อหุ้มเซลล์ จึงยังคงมีการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ผลไม้

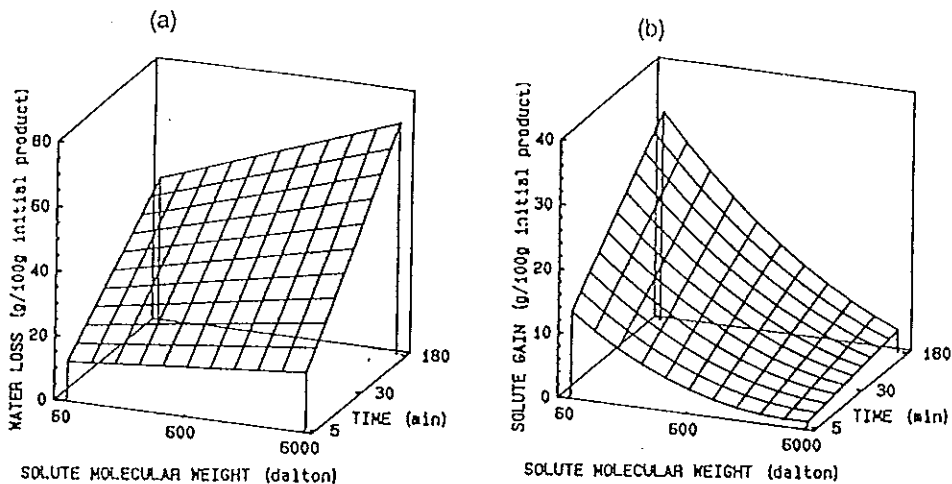
4.5 ความเข้มข้นและชนิดของสารออสโมติก

สารออสโมติกเป็นสารที่ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนออสโมติก (osmotic driving force) ในสารละลายออสโมติกชนิดเดียวกัน เช่น น้ำเชื่อม เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ให้น้ำซึมออกจากผลไม้ได้เร็วขึ้นเนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำภายในเซลล์ผลไม้กัับภายนอกเซลล์สูงมากจนเกิดแรงขับขึ้น ในขณะที่มีการซึมออก

ของน้ำเร็วขึ้น น้ำตาลก็จะซึมเข้าสู่เซลล์ผลไม้ได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเป็นข้อดีที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่หวานมากจนเกินไป (อ๋อนรวิ รัตนาพันธุ์, 2533 ; จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2535) นอกจากนี้สารออสโมติกแต่ละชนิดจะมีผลต่อกระบวนการออสโมซิสที่แตกต่างกัน

Lerici และคณะ (1985) พบว่ากลูโคสช่วยกำจัดน้ำได้ดีกว่าฟรุกโตส และดีกว่าซูโครส สารออสโมติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วและแพร่ผ่านทะลุเซลล์ผลไม้ได้ดีกว่าสารออสโมติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

Saurel และคณะ (1994) ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ใช้ในการแช่ผลไม้ที่มีต่อการแพร่ออกของน้ำ และการแพร่เข้าของตัวถูกละลายในชิ้นแอปเปิ้ลที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง พบว่าตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะส่งผลทำให้ปริมาณน้ำแพร่ออกจากชิ้นผลไม้ได้สูงมากกว่าตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ปริมาณตัวถูกละลายที่แพร่เข้าสู่ชิ้นผลไม้มีปริมาณต่ำ เนื่องจากตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีการแพร่ผ่านช่องว่างเข้าสู่เซลล์ได้น้อยและมีการอุดตันอยู่ที่บริเวณผิวของชิ้นผลไม้ จึงทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกสูงเกิดแรงขับ (driving force) ของน้ำสูง การสูญเสียน้ำจึงเกิดขึ้นมาก เมื่อเยื่อเกิดการเหี่ยวหดตัวจึงทำให้ตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีการแพร่เข้าสู่ชิ้นผลไม้ได้น้อยลง (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 อิทธิพลของ (a) น้ำหนักโมเลกุลของสารละลาย และเวลา ต่อการแพร่ออกของน้ำ และ (b) การแพร่เข้าของตัวถูกละลายในชิ้นแอปเปิ้ลแช่เยือกแข็งรูปทรงลูกบาศก์ที่แช่ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 55 อุณหภูมิ 50° ซ
ที่มา : Saurel และคณะ (1994)

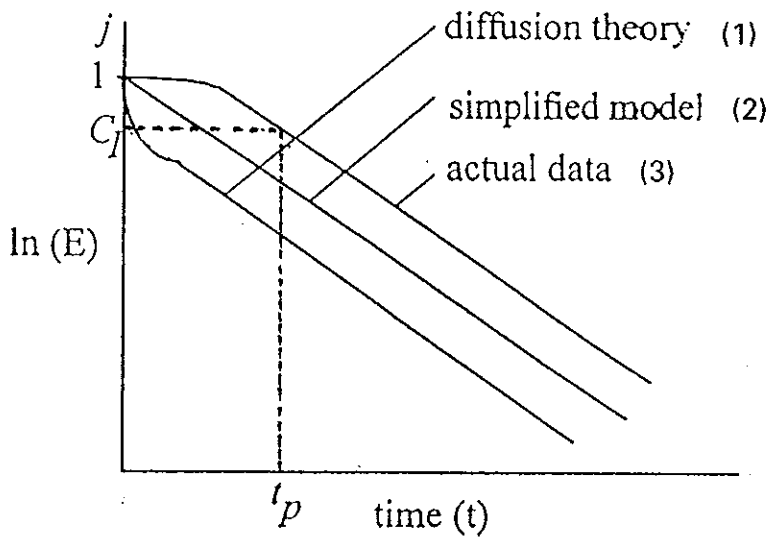
4.6 เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิส (Plasmolysis)

การแพร่ของตัวละลายจากภายในเซลล์ของผลไม้ไปสู่ตัวทำละลายภายนอกจะเกิดขึ้นได้ต้องรอให้เซลล์แตกก่อน ซึ่งการแตกของเซลล์อาจทำได้โดยวิธีเชิงกล เช่น การบีบอัด หรืออาจใช้ความร้อนในการลวกเพื่อทำให้เซลล์แตกออก เราเรียกเวลาที่รอให้เซลล์แตกออก เพื่อให้สารละลายสามารถแพร่ออกสู่ตัวทำละลายได้ว่า เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิส (time delay due to plasmolysis : t_p) (Siripatana, 1997)

Siripatana (1997) ได้อธิบายวิธีการหาค่า t_p โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทำนายโดยใช้ทฤษฎีการแพร่ พบว่าเวลาล่าช้าจะลดลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และไม่ขึ้นกับความเร็วในการกวนดังรูปที่ 8 เส้นกราฟ (1) เป็นเส้นกราฟของการสกัดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการแพร่ จากทฤษฎีการแพร่ถ้าสมมติให้การกระจายของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลายทุกจุดในผลไม้เท่ากัน ตัวถูกละลายที่อยู่ในเซลล์ผลไม้จะเกิดการแพร่ทันทีที่ผลไม้สัมผัสกับสารละลาย (ไม่มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิส) ทำให้ความเข้มข้นในเฟสของแข็งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการสกัด (ค่า E ลดลงอย่างรวดเร็ว) เส้นกราฟ (3) เป็นเส้นโค้งที่ได้จากการทดลองจริง คือในการสกัดตัวถูกละลายออกจากเซลล์ผลไม้จะต้องให้ความร้อนหรือวิธีทางกลไปทำลายโครงสร้างของเซลล์เพื่อทำให้เกิดอัตราการแพร่สูงสุดหลังจากเซลล์แตก จะพบว่าเกิดเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิส เส้นกราฟ (2) เป็นข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองการแพร่อย่างง่ายโดยกำหนดให้ C_1 คือค่าพารามิเตอร์ของการกระจายความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็งมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งไม่คิดสภาวะเริ่มต้น ดังนั้นตามสมมติฐานข้างต้นเราสามารถหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสโมลิซิสได้ดังนี้ สมมติฐาน

$$t_p = \frac{\ln C_1 - \ln j}{S} \quad (1)$$

โดย j คือ จุดตัดบนแกน y และ S คือความชันของเส้นตรงในกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับเวลา (t) จากทฤษฎีการแพร่แบบจำลองการแพร่อย่างง่าย และผลการทดลอง

ที่มา : Siripatana (1997)

4.7 อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำเชื่อมต่อผลไม้

กรณีที่น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นมากจะมีแรงขับ (driving force) คือความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำภายในเซลล์และภายนอกเซลล์มีค่าสูงอยู่ตลอดเวลา (อ๋อนรวิ รัตนพันธ์, 2533)

Conway และคณะ (1983 อ้างโดยจิราภรณ์ สอดจิตร์, 2535) ได้เสนอแนะว่าการเลือกอัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อผลไม้ ควรเลือกตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ถ้าอัตราส่วนมากเกินไปจะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเชื่อมยาก แต่ถ้าน้อยเกินไปกระบวนการแพร่จะเกิดขึ้น สำหรับอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นอัตราส่วนที่นิยมใช้ในการแช่อิ่มผลไม้ (Bolin, et al., 1983 ; Lenart and Flink, 1984 ; Beristain, et al., 1990 ; Monsáleve-González, et al., 1993)

4.8 การกวน

การกวนช่วยไม่ให้เกิดการสะสมของน้ำที่ซึมออกมาอยู่ล้อมรอบผลไม้ นอกจากวิธีการกวนแล้วในอุตสาหกรรมอาจใช้วิธีระเหยน้ำทำให้น้ำเชื่อมเข้มข้นขึ้นแล้วทำให้ไหลผ่านผลไม้อย่างต่อเนื่อง (continuous re-concentration) (อ๋อนรวิ รัตนพันธ์, 2533) การกวนจะ

ทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายได้ดีหรือไม่ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างใบพัด สภาวะการกวน ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynold number : $N_{Re} = \frac{d^2 N \rho}{\mu}$) ความหนืด และความหนาแน่น Dickey และ Fenic (1976) กล่าวว่าค่าเรโนลด์นัมเบอร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งใช้วัดความแรงของการกวน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการกวน (N) และเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (d)

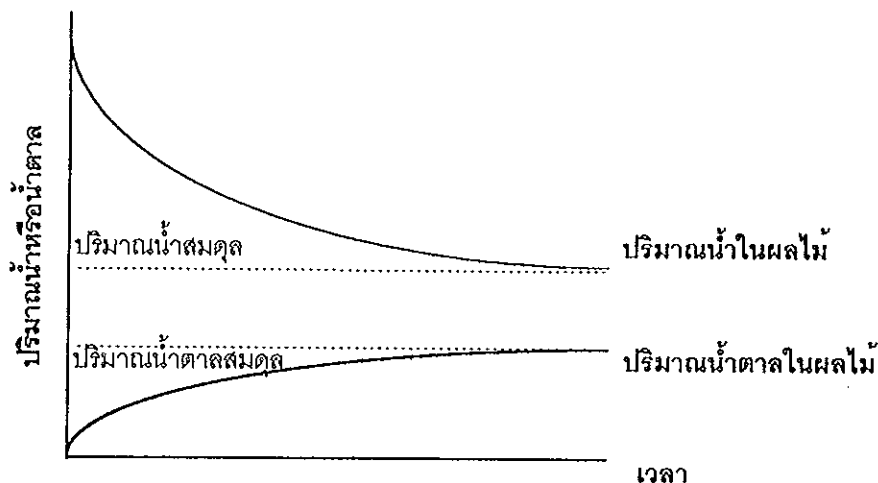
5. กระบวนการดึงน้ำออกจากผลไม้ด้วยกระบวนการออสโมติก ดีไฮเดรชัน (Osmotic dehydration)

กระบวนการออสโมติกดีไฮเดรชัน เป็นกระบวนการดึงน้ำออกจากผลไม้โดยแช่ชิ้นผลไม้ในของเหลวที่มีค่าออสโมติกต่ำกว่าค่าออสโมติกในผลไม้ จะทำให้ผลไม้มีค่าออสโมติกต่ำลง สามารถป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ (สุวิษ ศิริวัฒน์โยธิน, 2530) การกำจัดน้ำออกจากเนื้อเยื่อผลไม้โดยวิธีนี้น้ำจะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน จากภายในเซลล์ที่มีสารละลายเจือจางไปสู่สารละลายที่เข้มข้นสูงภายนอกเซลล์ ผลของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายภายในและภายนอกเซลล์ จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกเกิดแรงขับให้มีการถ่ายโอนมวลสาร โดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำ และสารธรรมชาติ เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ เกลือแร่ จากภายในเซลล์ออกสู่ภายนอกเซลล์ ในขณะเดียวกันก็มีการแพร่ของตัวละลายที่นิยมใช้ คือ น้ำตาล หรือเกลือแกง (อ๋อนรวิ รัตนาพันธุ์, 2533 ; ชลดา มานะกุล, 2537 ; Lenart and Flink, 1984 ; Saurel, et al., 1994 ; Mauro and Menegalli, 1995 ; Rastogi and Raghavarao, 1995) แพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ กระบวนการออสโมซิสเป็นที่นิยม และมีความเหมาะสมในการดึงน้ำบางส่วนออกจากผลไม้ก่อนนำไปอบแห้ง กระบวนการนี้ใช้อุณหภูมิไม่สูงจึงช่วยรักษาคุณลักษณะทางธรรมชาติของผลไม้ไว้ได้ดีกว่ากระบวนการอื่น มีการสูญเสียกลิ่นน้อยเนื่องจากน้ำตาลหรือน้ำเชื่อมที่ใช้เป็นสารละลายออสโมติก (osmotic agent) สามารถป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสของผลไม้สด ซึ่งมักจะสูญเสียในขณะที่ทำการอบแห้ง นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ ทำให้ผลไม้มีสีสวยโดยใช้สารเคมี เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงหรือไม่ใช้เลย (อ๋อนรวิ รัตนาพันธุ์, 2533 ; ชลดา มานะกุล, 2537 ; Beristain, et al., 1990)

6. การแพร่ของมวลสารในเนื้อเยื่อผลไม้

การส่งผ่านมวลสารในเนื้อเยื่อผลไม้เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบสุ่มจากส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเข้มข้นสูงไปยังอีกส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ (จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2535) เมื่อบริเวณช่องว่างระหว่างเซลล์มีความเข้มข้นสูงกว่าภายในเซลล์จะเกิดกลไกการแพร่แบบอิสระ (molecular diffusion) ของน้ำตาลผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ โดยอัตราการแพร่ของน้ำที่ไหลออกจากเซลล์จะสูงมากกว่าอัตราการแพร่ของน้ำตาลกลูโคสเข้าสู่เซลล์ (ชลดา มานะกุล, 2537)

Wongkrajang (1996) และ Ponting (1973 อ้างโดย Rastogi and Raghavarao, 1995) พบว่าช่วงเวลาแรกของการแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อมปริมาณการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์จะสูงมากกว่าการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ เนื่องจากการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เนื้อเยื่อผลไม้จะช้ากว่าการแพร่ของน้ำ (ตามรูปที่ 9)

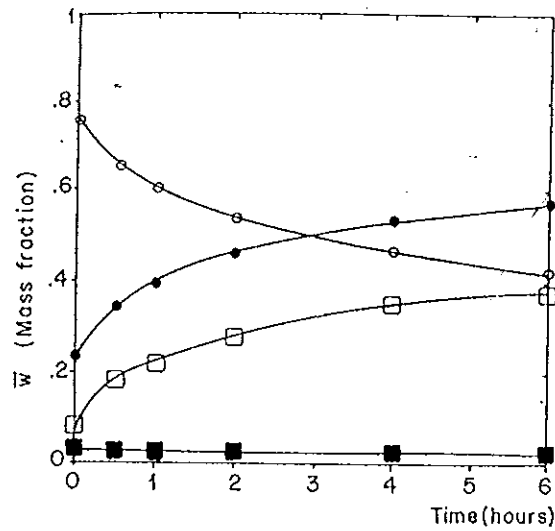


รูปที่ 9 สมดุลของน้ำและน้ำตาลระหว่างการทำแห้งแบบออสโมซิส

ที่มา : Wongkrajang (1996)

Mauro และ Menegalli (1995) อธิบายถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำน้ำตาลซูโครส และน้ำตาลรีดิทซ์ ในรูปเศษส่วนเชิงมวลของผลไม้ที่ทำการแช่ในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50 °ซ พบว่าในช่วงครึ่งชั่วโมงแรกความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสจะเพิ่มสูงขึ้นมาก ส่วนน้ำตาลรีดิทซ์จะมีปริมาณต่ำและมีการเปลี่ยนแปลง

น้อยมาก ในขณะที่เดียวกันน้ำมีอัตราการสูญเสียค่อนข้างสูง และอัตราการสูญเสียน้ำค่อย ๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงเศษส่วนเชิงมวลเฉลี่ยขององค์ประกอบของผลไม้แช่
 ในสารละลายเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ ที่ระยะเวลา
 ต่าง ๆ (○ : น้ำ ● : ของแข็งทั้งหมด □ : ซูโครส ■ : น้ำตาลรีดิวิคซ์)
 ที่มา : Mauro และ Menegalli (1995)

7. แบบจำลองในการศึกษากระบวนการแพร่ของตัวถูกละลายในผลไม้

การศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นในการผลิตผลไม้แห้ง ส่วนใหญ่จะศึกษาการทำแห้งผลไม้โดยอาศัยปรากฏการณ์ออสโมซิส คือ การแช่ชิ้นผลไม้ลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นใดความเข้มข้นหนึ่งโดยไม่มีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนั้น ซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง แต่กลไกการแพร่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเหมือนกัน นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้หาวิธีการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการถ่ายโอนมวลสาร โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของมวลสาร เช่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลหรือของแข็ง (sugar or solids gain) การลดลงของปริมาณน้ำ (water loss) การสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับเวลารวมไปถึงการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสารโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ชลดา มานะกุล, 2537 ; Azuara, et al., 1992)

Yao และ Maguer (1992) ศึกษาผลของอุณหภูมิ และชนิดของสารละลายที่มีต่อการสูญเสีย น้ำหนัก และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสตอเบอรี่ 2 สายพันธุ์พบว่าการทำแห้งแบบออสโมติกในสภาวะความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 63 ของน้ำตาลซูโครสที่อุณหภูมิ 25° ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในระบบที่มีการหมุนเวียนของน้ำเชื่อมสามารถกำจัดน้ำในผลไม้ได้มากกว่าร้อยละ 40 และมีน้ำตาลเพิ่มขึ้นในเนื้อผลไม้เพียงร้อยละ 1 โดยการศึกษาหาการแพร่ของน้ำและน้ำตาลในสตอเบอรี่สามารถหาได้จากสมการ

$$WL = \frac{(M_0 - M)}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$ML = \frac{(M_{wo} - M_w)}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$SCD = \frac{(MW_s - MW_{so})}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

โดย WL คือน้ำหนักที่สูญเสีย ML คือความชื้นที่สูญเสีย SCD คือความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำตาล M_0 และ M คือน้ำหนักผลไม้เริ่มต้นและหลังการแช่อิ่ม M_{wo} และ M_w คือน้ำหนักน้ำเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ MW_{so} , MW_s คือปริมาณน้ำตาลในสารละลายเริ่มต้นก่อนแช่ตัวอย่างและสุดท้ายหลังเอาตัวอย่างออก

Monsálve-González และคณะ (1993) ศึกษาปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลของน้ำและน้ำตาลระหว่างการแช่ชิ้นแอปเปิ้ลรูปทรงแผ่นบางและทรงกระบอก ในสารละลายกลูโคสเข้มข้น 41° บริกซ์และสารละลายซูโครสเข้มข้น 52° บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50° C สามารถอธิบายอัตราการแพร่ของน้ำและน้ำตาลจากโมเดลของ Crank (1975) โดยนำการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมาพิตเข้ากับโมเดลได้ผลเฉลยของสมการการแพร่สำหรับรูปทรงแผ่นบางตามสมการที่ (5) และสมการการแพร่สำหรับรูปทรงกระบอกตามสมการที่ (6)

$$\frac{Wp_t}{Wp_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2q_n^2} \cdot \exp(-Dq_n^2t/l^2) \right) \quad (5)$$

$$\frac{Wp_t}{Wp_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4\alpha(1+\alpha)}{4+4\alpha+\alpha^2q_n^2} \cdot \exp(-Dq_n^2t/l^2) \right) \quad (6)$$

เมื่อ Wp_t , Wp_{∞} คือน้ำหนักของน้ำที่สูญเสียหรือการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ และที่สภาวะสมดุล α คืออัตราส่วนของสารละลายน้ำตาลต่อปริมาตรของชิ้นผลไม้ q_n คือรากของสมการ : $\tan q_n = -\alpha q_n$ ($q_n > 0$) สำหรับชิ้นแผ่นบาง หรือ $\alpha q_n J_0(q_n) + 2J_1(q_n) = 0$ ($q_n \neq 0$) สำหรับรูปทรงกระบอก D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร²/นาที่) l คือระยะครึ่งของความหนาของชิ้นแผ่นบางหรือระยะครึ่งของการตัดตามขวางของรูปทรงกระบอก (เมตร) t คือเวลา (นาที่)

ค่าการสูญเสียน้ำ (Water loss : WL) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (SG) หาได้จากสมการที่ (7) และ (8)

$$SG = (W_t \times B_t) - (W_0 \times B_0) \quad (7)$$

โดย SG คือการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (กรัม) W_t และ W_0 คือน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลที่เวลาใด ๆ และที่สภาวะเริ่มต้น (กรัม) B_t และ B_0 คือความเข้มข้นของแข็งที่ละลายได้ในชิ้นแอปเปิ้ลที่เวลาใด ๆ และที่สภาวะเริ่มต้น (Brix; w/w)

$$\%WL = \frac{(W_0 \times M_0) - (W_t \times M_t)}{W_0} \quad (8)$$

โดย % WL คือร้อยละของปริมาณน้ำที่สูญเสียในหน่วยกรัม (ฐานเปียก) M_t และ M_0 คือความชื้นที่เวลาใด ๆ และที่สภาวะเริ่มต้น (ร้อยละฐานเปียก)

Lenard และ Flink (1984) ได้พัฒนาโมเดลเพื่อใช้ศึกษาการถ่ายโอนมวลสาร และค่าวอเตอร์แอกติวิตี ในสารละลายเข้มข้นร้อยละ 10 ถึง 70 และพบว่าโมเดลนี้สามารถใช้ในการทำนายข้อมูลของการถ่ายโอนมวลสาร และค่าวอเตอร์แอกติวิตี ในสภาวะที่ไม่สมดุลและช่วงระยะเวลาสั้น ๆ

การแพร่ผ่านวัสดุที่เป็นของแข็งตามทฤษฎีการแพร่ในของแข็ง ซึ่งมีสมมติฐานว่าการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายผ่านพื้นที่หน้าตัดขนาดหนึ่งหน่วยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง ในกระบวนการถ่ายโอนมวลสาร ซึ่งความเข้มข้นที่จุด ๆ หนึ่ง เปลี่ยนไปกับเวลาในกระบวนการถ่ายโอนมวลสารที่สภาวะไม่คงตัว อธิบายได้โดยสมการกฎข้อที่สองของฟิคค์ (Fick's second law) (รัตนจิระรัตนานนท์, 2538 ; Crank, 1975)

Spanink (1979) อ้างโดย Schwartzberg and Chao, (1982) ได้เสนอสมการทั่วไปจากกฎข้อที่สองของฟิคค์เพื่อใช้ในการอธิบายการแพร่ในของแข็งที่สมมาตรในสภาวะไม่คงตัว

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{x^{v-1}} \frac{\partial}{\partial x} \left[x^{v-1} D_s \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (9)$$

โดยที่ C คือความเข้มข้นของสารละลาย t คือเวลาที่เกิดการแพร่ และ D_s คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง v คือแฟกเตอร์รูปร่างของของแข็ง (shape factor)

$$v = \frac{Ax}{V} \quad (10)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวของแข็ง V คือปริมาตรของแข็ง X คือระยะทางที่วัดจากจุดกึ่งกลางของแข็ง แฟกเตอร์รูปทรงสำหรับแผ่นแบนราบยาวไม่จำกัด (infinite flat slab) คือ 1 ทรงกระบอกยาวไม่จำกัด (infinite cylinder) คือ 2 ทรงกลม (sphere) คือ 3

การนำกฎข้อที่สองของฟิคค์มาใช้เพื่อวิเคราะห์การแพร่จะมีการกำหนดสมมติฐานเบื้องต้น (Siripatana, 1997) คือ

1. สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายภายนอก และความเข้มข้นของตัวละลายภายในของแข็งที่สภาวะสมดุลมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปัจจัยอื่น ๆ

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็งมีค่าคงที่

3. มีส่วนประกอบเดียวเท่านั้นที่มีการแพร่ และการแพร่เกิดในทิศทางเดียว

Siripatana (1997) และ Schwartzberg และ Chao (1982) ได้ตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะเริ่มต้น และสภาวะขอบเขตสำหรับการสกัดแบบกะ และการสกัดแบบไหลสวนทาง คือ

1. $C = C_0$ สำหรับ $0 < X < l$ เมื่อ $t = 0$

2. เมื่อ $X = 0$

3. $Y' = mX'$ ที่ $X = l$

เมื่อ Y' คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของเหลว X' คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง m คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (distribution coefficient)

4. ค่า draft (draft) หรือแฟกเตอร์ของการสกัด (α) มีค่าคงที่

$$\alpha = \frac{Lm}{S} \quad (11)$$

เมื่อ L คือปริมาตรของสารละลายในเฟสของเหลว S คือปริมาตรของสารละลายในเฟสของแข็ง m คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (equilibrium distribution coefficient)

5. ภายในเฟสของเหลวมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (well-mixed) ไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง ($K \rightarrow \infty$, $Bi \rightarrow \infty$) การถ่ายโอนเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่เพียงอย่างเดียวโดย Bi คือจำนวนไบออต เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงสัดส่วน

ระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในเฟสของแข็งต่อความต้านทานการถ่ายโอนมวลจากภายนอกเฟสของแข็ง

$$Bi = \frac{K \cdot m \cdot l}{D_s} \quad (12)$$

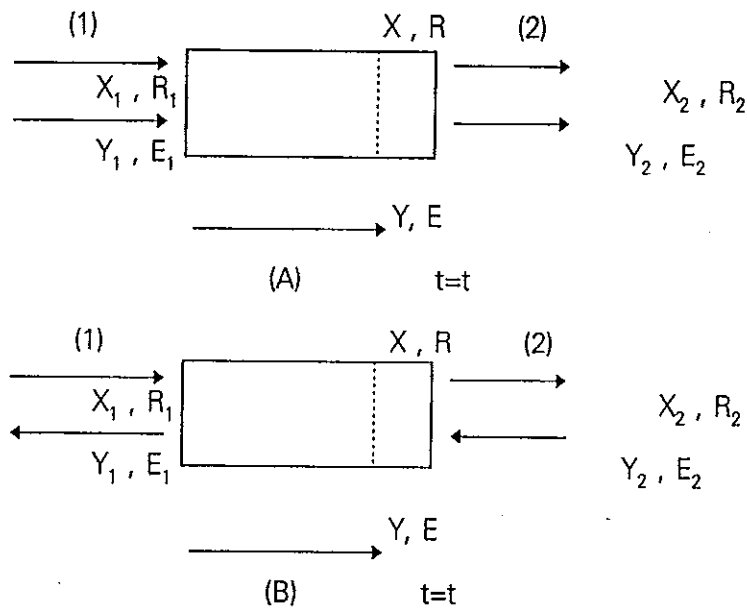
เมื่อ m คือสัมประสิทธิ์การกระจายสมดุล (equilibrium distribution coefficient) l คือความยาวเชิงลักษณะของเฟสของแข็ง (characteristic length) D_s คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในเฟสของแข็ง K คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ผิวหน้าเฟสของแข็ง

Loncin (1980 อ้างโดย Schwartzberg and Chao, 1982) รายงานว่าการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ในสภาวะที่กำหนดให้ $Bi > 200$ (ถือว่าไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายนอกเฟสของแข็ง) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 ยกเว้นในกรณีที่มีอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กมาก หรือที่สกัดได้ไหลผ่านเบดที่ถูกอัดแน่น หรือ m มีค่าน้อยมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้น สำหรับกระบวนการสกัดแบบไหลสวนทาง สมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเริ่มต้น และสภาวะขอบเขตจะเป็นไปตามสมมติฐานที่ 1 ถึง 4 ในการศึกษาความสามารถของตัวละลายในการแพร่ภายในเฟสของแข็งจะนิยมศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient or diffusivity) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถของเนื้อเยื่อหรือตัวกลางที่ยอมให้ตัวถูกละลายผ่านได้มีความสำคัญต่ออัตราการแพร่ จากสมมูลมวล (รูปที่ 11) สามารถหาผลเฉลยของสมการการแพร่ (Siripatana, 1997) ดังนี้

$$E = \frac{\bar{X} - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{\bar{Y} - Y^*}{Y_0 - Y^*} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp[-q_n^2 \tau], \quad \tau = \frac{Dt}{a^2} \quad (13)$$

โดย
$$X^* = \frac{1}{1+\gamma} \left(\bar{X}_1 + \gamma \frac{Y_1}{m} \right) = \frac{1}{1+\gamma} \left(\bar{X}_2 + \gamma \frac{Y_2}{m} \right) \quad (14)$$

$$Y^* = \frac{1}{1+\gamma} (m\bar{X}_1 + \gamma \cdot Y_1) = \frac{1}{1+\gamma} (m\bar{X}_2 + \gamma \cdot Y_2) \quad (15)$$



รูปที่ 11 แผนภาพ (A) การสกัดแบบกะ และ (B) การสกัดแบบสวนทาง
ที่มา : Siripatana (1997)

โดย τ คือจำนวนฟลักซ์ t คือระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในการสกัด a คือความยาวเชิงลักษณะของเฟสของแข็ง E คือสัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวถูกละลาย X' และ Y' คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็งและของเหลวที่สภาวะสุดท้ายของการสกัดแบบสวนทาง และที่สภาวะความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกละลายละลายในเฟสของแข็งสมดุล (X_∞) และเฟสของเหลวสมดุล (Y_∞) ในการสกัดแบบกะ γ คือแฟกเตอร์การสกัดสมมูล (equivalent extraction factor) ในกรณีการสกัดแบบกะ γ คือ α ส่วนกรณีการสกัดแบบสวนทาง γ คือ $-\alpha$ X, X_1, X_2, Y, Y_1 และ Y_2 คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 11 สำหรับกรณีการสกัดแบบกะ X_1, Y_1 เท่ากับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง (X_0) และในเฟสของเหลว (Y_0) ตามลำดับ ส่วน X_2, Y_2 เท่ากับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุลในเฟสของแข็ง (X_∞) และเฟสของเหลว (Y_∞) ตามลำดับ

q_n คือ eigenvalue ลำดับที่ n ซึ่งมีค่าเป็นบวก สำหรับ q_1 หาได้จากสมการ

$$q_1^2 = g(\alpha, \eta, Bi) q_n^2 \infty = \text{Sh} \frac{v(\gamma+1)}{2\gamma} = g(\alpha, \eta, Bi) \text{Sh} \infty \frac{v(\gamma+1)}{2\gamma} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } g(\alpha, \eta, Bi) = \frac{1}{P} \text{ โดย } P = 2.293 - \frac{0.4036}{\alpha} + (0.2409 - \frac{0.1237}{\alpha})\eta$$

$$K = 1069 + 0.0404\eta, \quad \eta = v - 1$$

Sh คือจำนวนเชอร์วูด หาได้จากสมการ

$$Sh = 2g(\alpha, \eta, Bi) \left[u(\alpha, \eta) - \frac{v(\alpha, \eta)}{\alpha} + \frac{w(\alpha, \eta)}{\alpha^2} \right] \quad (17)$$

$$u(\alpha, \eta) = 2.460 + 0.3770\eta, \quad v(\alpha, \eta) = 0.4015 + 0.248\eta$$

$$w(\alpha, \eta) = 0.0270 + 0.3531\eta$$

ในกรณี $Bi > 1$ และ $\alpha > 0.3$

$$Sh = 2(2.0591 + 0.41309v) \left(1 + \frac{2.0011 + 0.3215v}{Bi(1.0177 + 0.02762v)} \right)^{-1} \quad (18)$$

ในกรณี $Bi < 1$ และ $\alpha > 0.3$

สมการที่ (17) และ (18) ได้จากการพิจารณาของเชิงรูปทรงอย่างง่าย (แผ่นราบ, ทรงกระบอก และทรงกลม) ซึ่งอาจนำไปใช้กับรูปทรงไม่แน่นอนที่มีแฟกเตอร์รูปทรงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3

C_n คือค่าพารามิเตอร์อันเนื่องมาจากสภาวะเริ่มต้นของการกระจายความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง

$$C_n = \frac{2v\gamma(\gamma + 1)}{\gamma^2 \left[\left(\frac{q_n^2}{Bi} - \frac{v}{\gamma} \right)^2 + q_n^2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) - \frac{v^2}{\gamma} \right]} \quad (19)$$

ในสมการ (15) สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการสกัดแบบกะและแบบสวนทาง ในกรณีที่จำนวนพิทช์ (τ) มีค่ามากกว่า 0.1 เราสามารถใช้เทอมแรกเพียงเทอมเดียวในการคำนวณค่า X และ Y ซึ่งค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 1 (Wang and Sastry, 1993)

ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะใช้ค่า C_1 และ q_1 ในการคำนวณเท่านั้น การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแพร่ในการศึกษาการแปรรูปอาหารที่เป็นของแข็งที่มีรูปทรงไม่ปกติ (ไม่ใช่แผ่นราบ, ทรงกระบอก และทรงกลม) โดยปกติแล้วนักวิจัยจะใช้วิธีเชิงเลขที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา

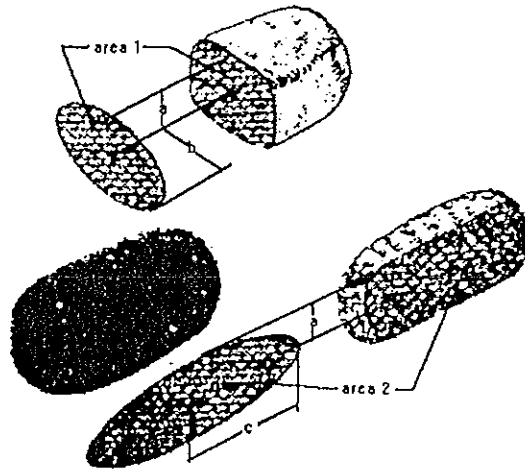
Siripatana(1997) ได้พัฒนาผลเฉลยอย่างง่ายของสมการการแพร่ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงเข้มข้นเฉลี่ยของตัวถูกละลายในการแพร่แบบกะและแบบไหลสวนทางสำหรับของแข็งรูปทรงซับซ้อนในช่วง $0.1 < \text{เลขไบออต}(Bi) < \infty$, $1 < \text{แฟกเตอร์รูปทรง}(v) < 3$ และ $0.3 < \text{ดราฟ}(\alpha) < \infty$ จะต้องพิจารณาลักษณะเฉพาะของความยาวเชิงลักษณะของเฟสของแข็ง เช่น ในของแข็งรูปทรงวงรีจะใช้ครึ่งหนึ่งของด้านกว้างของพื้นที่หน้าตัดตามขวางเทียบเท่าความยาวเชิงลักษณะ (a)

$$A' = \frac{b}{a} = \frac{\text{area1}}{\pi a^2} \quad \text{และ} \quad B' = \frac{c}{a} = \frac{\text{area2}}{\pi a^2} \quad (20)$$

โดย area 1 คือพื้นที่หน้าตัดตามขวาง และ b คือครึ่งหนึ่งของความยาวของพื้นที่หน้าตัดตามขวางจะผันแปรตามด้านกว้าง ส่วน c คือครึ่งหนึ่งของความยาวของพื้นที่หน้าตัดตามยาวของของแข็ง หาได้จากปริมาตรของของแข็ง และ area 2 คือพื้นที่หน้าตัดตามยาว ตามรูป 12 สำหรับสมการการแพร่ในของแข็งรูปทรงซับซ้อนหาได้จากสมการ

$$E = C_1 \exp \left[\left(-\frac{Sh(\gamma+1)}{2} \frac{v}{\gamma} \frac{1}{3v-1} \left[2 + \frac{3}{A'^2} + \frac{3}{B'^2} \right] \right) \frac{Dt}{a^2} \right] = C_1 \exp \left[\left(-\frac{Sh(\gamma+1)}{2} \frac{v}{\gamma} \right) \frac{Dt}{a^2} \right] \quad (21)$$

$$\text{โดย} \quad v = 1 + \frac{1}{A'^2} + \frac{1}{B'^2} \quad (22)$$



รูปที่ 12 ภาพตัดตามขวางและตามยาวของของแข็งรูปทรงวงรี
ที่มา : Siripatana (1997)

สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient or diffusivity) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความสามารถของเนื้อเยื่อหรือตัวกลางที่จะยอมให้ตัวละลายผ่านได้ มีความสำคัญต่ออัตราการแพร่ จากสมการที่ (22) ในกรณีที่จำนวนพิคค์ (τ) มีค่ามากกว่า 0.1 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้ค่า C_1 ในการคำนวณเท่านั้น (Wang and Sastry, 1993) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln E$ กับเวลาในการแช่ลิมจะได้

$$\text{slope} = -\frac{Sh(\gamma+1)}{2} \frac{D}{\gamma a^2} \quad (23)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็งได้จาก สมการ

$$D = -\text{slope} \frac{a^2}{v} \left(\frac{\gamma}{\gamma+1} \right) \frac{Sh}{2} \quad (24)$$

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร²/วินาที) slope คือความชันของเส้นตรงในกราฟ $\ln E$ กับเวลา a คือความยาวเชิงลักษณะ (ครึ่งหนึ่งความหนา : เมตร) v คือแฟกเตอร์รูปทรง γ คือแฟกเตอร์การแช่ลิม Sh คือค่าเชอร์วูด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง
2. ศึกษาการถ่ายโอนมวลของน้ำ น้ำตาล และกรด ในกระบวนการแช่อิ่ม โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายกลไกการถ่ายโอน และทำนายการเปลี่ยนแปลง
3. เพื่อนำความเข้าใจที่ได้จากการศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล มาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งต่อไป

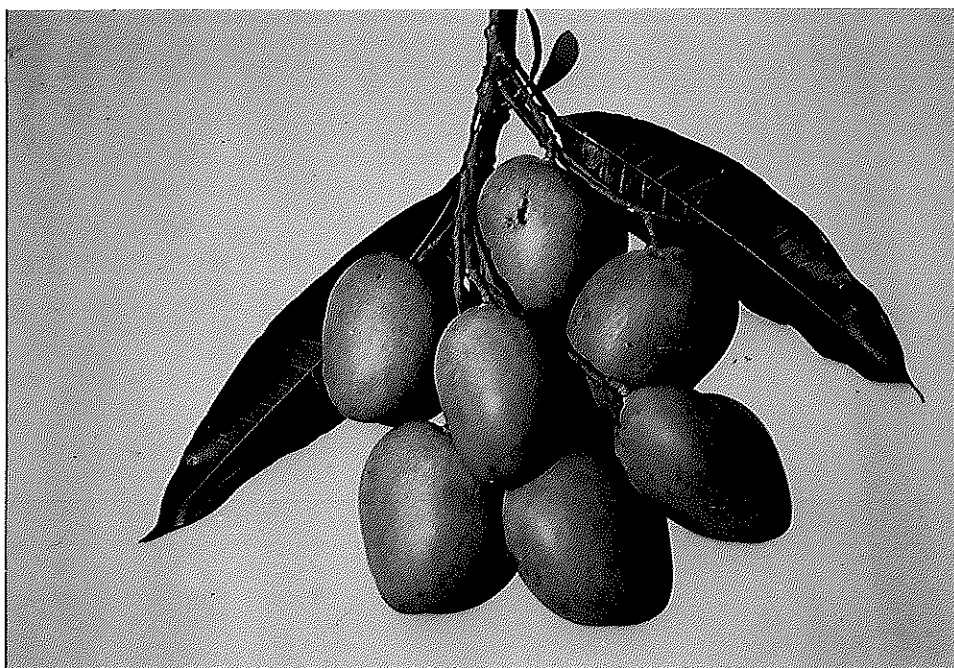
บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ

วัสดุ

1. มะม่วงเบาผลดิบอายุไม่เกิน 60 วันหลังจากออกดอก เปลือกเมล็ดยังไม่แข็ง มีน้ำหนักโดยเฉลี่ย 50 - 70 กรัมต่อผล (รูปที่ 13) จากตลาดในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง เป็นระดับ Food grade ได้แก่ กรดซิตริก แคลเซียมคลอไรด์ โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ เกลือแกง และน้ำตาลซูโครส



รูปที่ 13 มะม่วงเบา

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง

1.1 ถังออสโมซิส (รูปที่ 14) ประกอบด้วยถังไม้รูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร คุ้มด้วยสแตนเลส สำหรับใส่น้ำประปาเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการแช่อิ่มตามต้องการ โดยมีเครื่องทำน้ำร้อนหมุนเวียน ภายในถังมีท่อสำหรับปล่อยน้ำที่ไขแล้วทิ้ง และมีถังทรงกระบอกมีลักษณะเป็นกรวยมีก๊อกเปิดปิดได้สำหรับถ่ายน้ำเชื่อมหลังการแช่อิ่มออก ส่วนด้านบนของถังมีแกนเหล็กสำหรับติดตั้งมอเตอร์เพื่อใช้สำหรับหมุนใบพัดทั้ง 4 โดยที่ใบพัดทั้ง 4 จุ่มอยู่ในถังทรงกระบอก ออกแบบโดย ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ และครูพรชัย ศรีไพบูรณ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.2 ตู้อบชนิดใช้ลมร้อน (Hot air dryer) (รูปที่ 15)

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 ขวดวัดความหนาแน่นขนาด 25 มิลลิลิตร (รูปที่ 16)

2.2 เครื่องวัดพื้นที่ระบบดิจิทัล (Planimeter) รุ่น KP-92N ยี่ห้อ Placom

2.3 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบมือถือ ระบบดิจิทัลแบบใช้ลำแสง (Digital Techometer) รุ่น DT - 240P ยี่ห้อ Digicon

2.4 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) รุ่น AM - 4201 ยี่ห้อ Lutron

2.5 เครื่องชั่งแบบตัวเลขความละเอียดตำแหน่งที่ 3 รุ่น PG5002 ยี่ห้อ

Mettler Teledo

2.6 เครื่องชั่งแบบตัวเลขความละเอียดตำแหน่งที่ 4 รุ่น BP210S ของบริษัท

Satorius

2.7 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Abbe Refractometer) รุ่น 3L ของบริษัท Bausch & Lomb (รูปที่ 17)

2.8 เครื่องวัดค่าสี JUKI รุ่น JP 7100 F

2.9 เครื่องวัดความหนืด Brookfield รุ่น RVDVII+

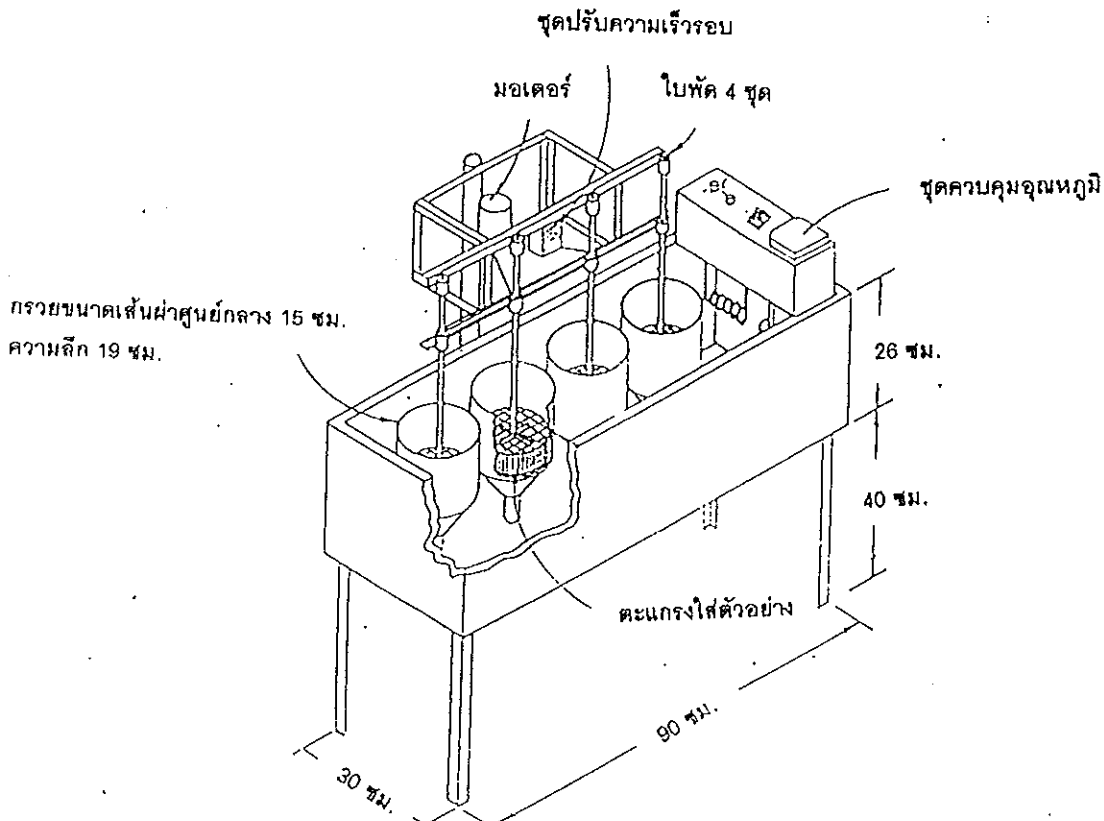
2.10 เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง รุ่น model 15 ยี่ห้อ Denver

2.11 เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) รุ่น TA-TX 2i ยี่ห้อ Stable Micro system (รูปที่ 18)

2.12 เครื่องอบแห้งแบบการระเหิด (Freeze dryer) รุ่น Dura - Dry™ μ P ยี่ห้อ FTS System

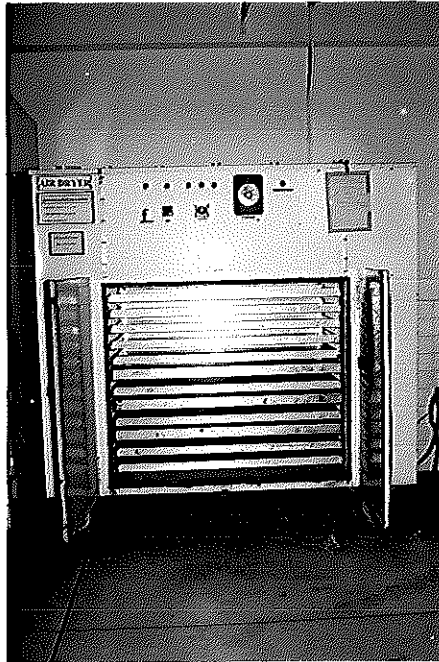
2.13 ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) รุ่น TV 406 ยี่ห้อ Memmert

2.14 อุปกรณ์และเคมีภัณฑ์สำหรับวิเคราะห์ คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

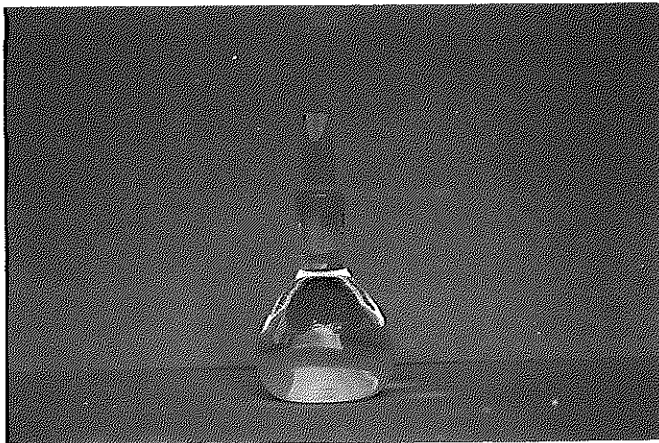


รูปที่ 14 ถังออสโมซิส

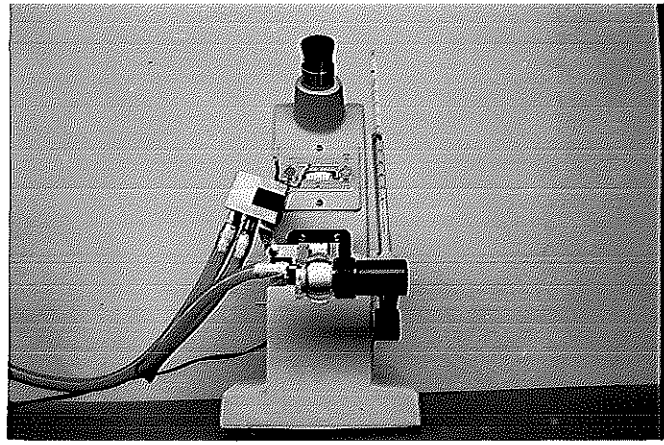
ออกแบบโดย : ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ และครูพรชัย ศรีไพบุลย์



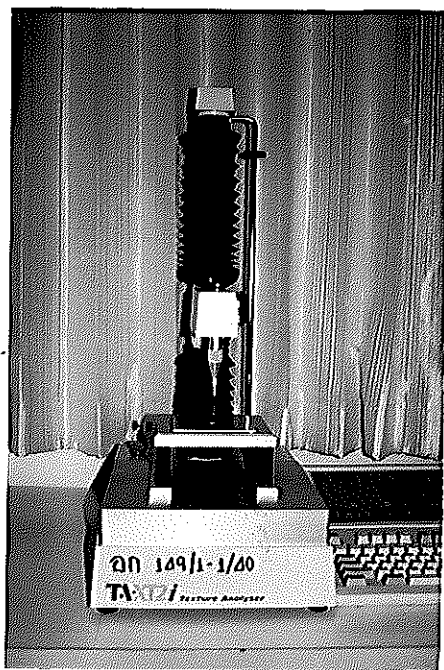
รูปที่ 15 ตู้อบลมร้อน (Hot air dryer)



รูปที่ 16 ขวดวัดความหนาแน่น



รูปที่ 17 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Abbe refractometer)



รูปที่ 18 เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture Analyser)

วิธีการ

1. การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ

นำมะม่วงเบาระยะผลดิบมีอายุไม่เกิน 60 วันหลังจากออกดอก เปลือกเมล็ดยังไม่แข็ง มีน้ำหนักโดยเฉลี่ย 50 - 70 กรัมต่อผล นำมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือกเอาเมล็ดออก และหั่นตามยาวของผลมะม่วง โดยแบ่งขนาดเท่า ๆ กันจำนวน 6 ชิ้นต่อผล นำมาตรวจสอบคุณภาพทางด้านเคมีและกายภาพเบื้องต้นดังนี้

1.1 คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่

- ค่าสี ตามระบบ Hunter (L, a, b) โดยเครื่องวัดสี JUKI วัดค่าสีขึ้นตัวอย่างทั้งทางด้านผิวติดเปลือกและด้านติดเมล็ด แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย
- ค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) โดยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analyser) ใช้หัววัดทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร (P/2) กดทะลุผิวตัวอย่างด้านผิวติดเปลือกไปยังด้านผิวติดเมล็ด เป็นระยะทาง 5 มิลลิเมตร ด้วยแรงกด (Compression) ขนาด 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ค่าความหนาแน่น คำนวณได้จากน้ำหนักและปริมาตร โดยใช้ขวดวัดความหนาแน่น (ตามวิธีการในภาคผนวกข.4)

1.2 คุณภาพทางเคมี ได้แก่

- ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ Abbe refractometer
- ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (A.O.A.C.,1990)
- ปริมาณความชื้น (A.O.A.C.,1990)
- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมด (A.O.A.C.,1990)

2. การศึกษาผลของสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และแคลเซียมคลอไรด์ ต่อลักษณะการเกิดสีน้ำตาลและเนื้อสัมผัสของมะม่วงเบา

เพื่อหาแนวทางยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และการรักษาเนื้อสัมผัสของชิ้นมะม่วงเพื่อคัดเลือกความเข้มข้นของสารเคมี ระยะเวลา และสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูป จึงได้คัดเลือกมะม่วงเบาที่อยู่ในระยะผลดิบ มีน้ำหนักโดยเฉลี่ย 50 - 70 กรัมต่อผล มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และหั่นตามยาวของผลมะม่วง โดยหั่นเป็นชิ้น

ขนาดเท่าๆกันจำนวน 6 ชั้นต่อผล มีรูปทรงเทียบเท่าวงรี (ตามรูปที่ 12) โดยความยาวเฉลี่ยด้าน a, b และ c เท่ากับ 0.3, 1 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ นำขึ้นมะม่วงแช่ในสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ ด้วยอัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีปัจจัยที่ศึกษาดังต่อไปนี้

- โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ มี 2 ระดับคือ ร้อยละ 0.1 และ 0.2
- แคลเซียมคลอไรด์ มี 2 ระดับคือ ร้อยละ 0.4 และ 0.7
- เวลาที่ใช้แช่สารละลายผสม เป็น 6 12 และ 24 ชั่วโมง

โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) และจัดชุดการทดลองแบบแฟกทอเรียล ดังตารางที่ 2 หลังจากนั้นแช่มะม่วงในสารละลายผสมครบตามเวลาที่กำหนด วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L, a, b) ความแน่นเนื้อ และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทางด้านสี และเนื้อสัมผัส โดยวิธีพรรณนาเชิงปริมาณ (Quantitative Descriptive Analysis : QDA) (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2535) ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) และความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองแบบ DMRT (Duncan's Multiple Range Test) เพื่อคัดเลือกชุดการทดลองที่เหมาะสมในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลและรักษาเนื้อสัมผัสของขึ้นมะม่วง

ตารางที่ 2 ชุดการทดลองการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และการรักษาเนื้อสัมผัสของชิ้นมะม่วงเบา

ชุดการทดลอง	เวลาที่แช่ในสารละลาย (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	
		โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	แคลเซียมคลอไรด์
1	6	0.1	0.4
2	6	0.1	0.7
3	6	0.2	0.4
4	6	0.2	0.7
5	12	0.1	0.4
6	12	0.1	0.7
7	12	0.2	0.4
8	12	0.2	0.7
9	24	0.1	0.4
10	24	0.1	0.7
11	24	0.2	0.4
12	24	0.2	0.7

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถายอินมวลงสารที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่มะม่วงในสารละลายซูโครส

3.1 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynode number : N_{Re})

เตรียมชิ้นมะม่วงและแช่ในสารละลายผสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาตามที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 หลังจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 90 นาที ลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที และทำให้เย็นทันที โดยนำมาแช่ในน้ำ และแช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70° บริกซ์ ปรับพีเอชเท่ากับ 3.5 ด้วยกรดซิตริก ในอัตราส่วนชิ้นมะม่วงต่อสารละลายเป็น 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลของการกวนโดยปรับเปลี่ยนค่าเรโนลด์ 2 ระดับคือ 0 และ 200

(จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2536) ซึ่งมีความเร็ว 0 และ 118 รอบต่อนาทีตามลำดับ (เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 8 เซนติเมตร ความหนาแน่นของน้ำเชื่อม 1.36×10^3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืด 85.9×10^{-3} กิโลกรัมต่อเมตร.วินาที) ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C สุ่มตัวอย่างขึ้นมะม่วงทุก ๆ 30 นาที ชับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำตาลภายในขึ้นมะม่วงมีค่าเท่ากับร้อยละ 90 ของน้ำตาลในน้ำเชื่อม วางแผนการทดลองแบบ CRD นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และการถดถอย เพื่อหาเวลาและค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแช่เชื่อม โดยพิจารณาจากการวัดและการคำนวณ (ตามภาคผนวก ข) ดังนี้

- สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ และน้ำตาล (Siripatana, 1997)
- การสูญเสียน้ำ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (Monsálve-González, et al, 1993)
- อัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล (Siripatana, 1997)
- การหดตัวของขึ้นมะม่วง (Baillon, 1990)

3.2 ผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของสารละลายซูโครส

เตรียมขึ้นมะม่วงและแช่ในสารละลายผสมของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาตามที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 หลังจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 90 นาที ลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที และทำให้เย็นทันที โดยนำมาแช่ในน้ำ หลังจากนั้นแช่ในสารละลายซูโครสที่มีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 3 แบบ คือ แบบปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นครั้งละ 10° บริกซ์ ($30 \rightarrow 40 \rightarrow 50 \rightarrow 60 \rightarrow 70^\circ$ บริกซ์) ทุก 4 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งหมด 20 ชั่วโมง/ปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมครั้งละ 20° บริกซ์ ($30 \rightarrow 50 \rightarrow 70^\circ$ บริกซ์) ทุก 4 ชั่วโมง/รวมเวลาทั้งหมด 12 ชั่วโมง และแช่ในสารละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 70° บริกซ์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปรับพีเอชเท่ากับ 3.5 ด้วยกรดซิตริก ในอัตราส่วนขึ้นมะม่วงต่อสารละลายเป็น 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก กวนที่ระดับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่เลือกได้จากข้อ 3.1 ควบคุมอุณหภูมิ 50°C สุ่มตัวอย่างขึ้นมะม่วงที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60, 100, 140, 210 และ 240 นาทีในแต่ละความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ชับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก และปริมาณของแข็งที่

ละลายได้ทั้งหมด วางแผนการทดลองแบบ CRD นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และการถดถอย เพื่อคัดเลือกขั้นตอนการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่เหมาะสมต่อการผลิต โดยพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ (ตามภาคผนวก ข) คือ

- สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (Siripatana, 1997)
- การสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรด (Monsálve-González, et al, 1993)
- อัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (Siripatana, 1997)
- การหดตัวของซึนมะม่วง (Baillon, 1990)

3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ

เตรียมซึนมะม่วงและแช่ในสารละลายผสมของไซเตียมเมตตาไบซัลไฟด์กับแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาตามที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 หลังจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 90 นาที ลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที และทำให้เย็นทันที โดยนำมาแช่ในน้ำ หลังจากนั้นแช่ในสารละลายซูโครสที่มีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมและสภาวะการแช่ตามวิธีที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2 กวนที่ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.1 และควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับคือ 50, 60 และ 70°ซ ใช้เวลา 100 นาทีในแต่ละความเข้มข้นของน้ำเชื่อม รวมเวลา 5 ชั่วโมง สุ่มตัวอย่างซึนมะม่วงที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60 และ 100 นาที ตรวจสอบซึนมะม่วง และคำนวณค่าตัวแปรเช่นเดียวกับข้อ 3.2 วางแผนการทดลองแบบ CRD นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และการถดถอย เพื่อคัดเลือกอุณหภูมิที่ดีที่สุดต่อกระบวนการผลิต

3.4 ศึกษาผลของขนาดและรูปร่าง

เตรียมซึนมะม่วงที่มีขนาดแตกต่างกันโดยหันตามยาวของผลมะม่วง คือ หัน 4 ขึ้นต่อผล และหัน 6 ขึ้นต่อผล แช่ในสารละลายผสมของไซเตียมเมตตาไบซัลไฟด์กับแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาตามที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 หลังจากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 90 นาที ลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาที และทำให้เย็นทันที โดยนำมาแช่ในน้ำ หลังจากนั้นแช่ในสารละลายซูโครสที่มีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมและสภาวะการแช่ตามวิธีที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2 กวนที่ค่าเร

โนลด์นัมเบอร์ที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.1 และควบคุมอุณหภูมิที่ระดับที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.3 ใช้เวลา 100 นาทีในแต่ละความเข้มข้นของน้ำเชื่อม รวมเวลา 5 ชั่วโมง สุ่มตัวอย่าง ขึ้นมะม่วงที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60 และ 100 นาที ตรวจสอบขึ้นมะม่วง และคำนวณค่าตัวแปรเช่นเดียวกับข้อ 3.2 วางแผนการทดลองแบบ CRD นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และการถดถอย เพื่อคัดเลือกขนาดของขึ้นมะม่วงที่เหมาะสมในการผลิต

นำทฤษฎีการแพร่มาอธิบายกลไกการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด และผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ ความเข้มข้นและวิธีการปรับสารถลาย อุณหภูมิ และขนาดและรูปร่างต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในทฤษฎีการแพร่

4. ศึกษาสภาวะการอบแห้งของมะม่วงแช่อิ่ม

4.1 อัตราการอบแห้ง

นำมะม่วงที่ผ่านการเตรียมที่คัดเลือกได้จากข้อ 2 และแช่อิ่มตามวิธีการที่คัดเลือกสภาวะได้จากข้อ 3 มาอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยความเร็วลม 1.03 เมตรต่อวินาที อบให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 18 มาตรฐานเปียก ระหว่างการทดลองทำการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง เก็บตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้น และบันทึกความสิ้นเปลืองพลังงานที่อ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าทุก ๆ 30 นาที

4.2 การหาความชื้นสมดุล

เตรียมมะม่วงแช่อิ่มแห้งตามวิธีการในข้อ 4.1 ตัดให้มีขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์ เซนติเมตร หาความชื้นสมดุลแบบดูดความชื้น (Adsorption) โดยทำให้ความชื้นลดต่ำลงด้วยการทำแห้งแบบระเหิด (freeze drying) ที่อุณหภูมิ -50 ถึง -54°C ในระบบสุญญากาศ 25 ถึง 130 มิลลิทอร์ ซึ่งตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มแห้ง 3 - 5 กรัมวางบนตะแกรงอะลูมิเนียมแขวนไว้ในขวดที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (ตารางที่ 3) นำขวดบรรจุตัวอย่างทั้งหมดใส่ในตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิ 30°C ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างมาหาความชื้น และหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น (Desorption) โดยหั่นมะม่วงแช่อิ่มแห้งให้มีขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งตัวอย่างมะม่วงแช่อิ่มแห้ง 3 - 5 กรัมวางบน

ตะแกรงอะลูมิเนียม แขนงไว้ในขวดที่บรรจุสารละลายเกลืออิมิตัว และนำไปหาความชื้น เช่นเดียวกับวิธีการหาความชื้นสมดุลแบบดูดความชื้น

ตารางที่ 3 ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เหนือสารละลายอิมิตัวของเกลือสำหรับการดูดและการคายความชื้น ที่อุณหภูมิ 30°ซ

สารละลายเกลืออิมิตัว	LiCl	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	NaCl	KNO ₃
อุณหภูมิ 30°ซ	13.3	32.4	51.4	75.0	92.3

ที่มา : Palipane และ Driscoll (1992)

5. การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า และแบบพัฒนา

5.1 ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารของชิ้นมะม่วงในขั้นตอนการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่อิ่ม ขั้นตอนการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่อิ่มของกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้าและแบบพัฒนามีวิธีการเหมือนกัน โดยหันให้ชิ้นมะม่วงมีขนาดตามที่คัดเลือกจากข้อ 3.4 แช่ในสารละลายผสมโซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นและเวลาตามที่คัดเลือกจากข้อ 2 แช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 90 นาที นำมาลวกในน้ำเดือด 1 นาที และทำให้เย็น สุ่มตัวอย่างชิ้นมะม่วงที่เวลา 0, 10, 30, 70, 150, 310 และ 360 นาที ในระหว่างการแช่สารละลายผสมโซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ และที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ในระหว่างการแช่สารละลายเกลือ ชับสารละลายส่วนเกินบริเวณผิวให้แห้ง เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำตาล และกรดภายในชิ้นมะม่วง

5.2 การแช่ส้ม

5.2.1 การหาระยะเวลาของการแช่ส้มในกระบวนการผลิตมะม่วงแช่ส้มแบบซ้ำ

นำขึ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมตามข้อ 5.1 แช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→40→50→60→70° บริกซ์ ปรับพีเอชของน้ำเชื่อมเป็น 3.5 ด้วยกรดซิตริกเฉพาะในน้ำเชื่อมความเข้มข้นแรก (30° บริกซ์) ระยะเวลาในการแช่ขึ้นมะม่วงในน้ำเชื่อมความเข้มข้นละ 24 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งหมด 5 วัน ในอัตราส่วนเนื้อมะม่วงต่อสารละลายซูโครส 1:3 สุ่มตัวอย่างวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่เวลา 0, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง และหาระยะเวลาแช่ส้มในแต่ละความเข้มข้น โดยกำหนดจุดยุติเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลภายในขึ้นมะม่วงมีค่าเท่ากับร้อยละ 90 ของความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำเชื่อม

5.2.2 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงมวลสารในขึ้นมะม่วง ระหว่างการแช่ส้มแบบซ้ำ และแบบพัฒนา

ทดลองแช่ขึ้นมะม่วงในสารละลายซูโครส 2 วิธี คือ การแช่ส้มแบบซ้ำ โดยเตรียมมะม่วงภายใต้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 5.1 นำมาแช่ในสารละลายซูโครสมีขั้นตอนการผลิตและใช้เวลาที่คัดเลือกได้ตามข้อ 5.2.1 และการแช่ส้มแบบพัฒนามีขั้นตอนการผลิตตามข้อ 3.3 โดยการแช่ส้มทั้ง 2 วิธีใช้มะม่วงขนาดขึ้นที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.4 วางแผนการทดลองแบบ CRD สุ่มตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 30, 70, 150, 310 และ 630 นาที สำหรับการแช่ส้มแบบซ้ำ และที่เวลา 0, 10, 20, 40, 60 และ 100 นาที สำหรับการแช่ส้มแบบพัฒนา ตรวจสอบขึ้นมะม่วง และคำนวณค่าตัวแปรเช่นเดียวกับข้อ 3.2 นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบข้อแตกต่างของการถ่ายโอนมวลสารในขึ้นมะม่วง

5.3 ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

นำมะม่วงที่ผ่านการแช่ส้มแบบซ้ำและแบบพัฒนาตามวิธีการในข้อ 5.2.2 อบแห้งตามวิธีในข้อ 4.1 วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ดังนี้

- คุณภาพด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L, a, b) ค่าความแน่นเนื้อ
- คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้การทดสอบชิมแบบพรรณนาเชิงปริมาณ

สำหรับคุณลักษณะ สี เนื้อสัมผัส รสชาติ การหดตัวของผลิตภัณฑ์ สำหรับการยอมรับรวมใช้การทดสอบชิมแบบ Hedonic scale ประกอบด้วย 9 ระดับคะแนน เมื่อระดับคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และระดับคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด (ไพโรจน์ วิริยจारी, 2535) ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 10 คน วางแผนการทดลองแบบ CRD นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองแบบ LSD (Least Significant Difference)

5.4 การวิเคราะห์หาปริมาณผลผลิต

ทำการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้าและแบบพัฒนา บันทึกน้ำหนักของวัตถุดิบที่ได้และสูญเสียไปในแต่ละขั้นตอนของการผลิต นำมาคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียในแต่ละขั้นตอนจากกระบวนการผลิตจนถึงผลิตภัณฑ์ และเปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์กับวัตถุดิบเริ่มต้น เพื่อหาร้อยละของผลผลิตที่ได้จากการผลิต

5.5 การประเมินต้นทุนการผลิตเบื้องต้น

ศึกษาต้นทุนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า และแบบพัฒนา โดยรวบรวมข้อมูลราคาวัตถุดิบดังนี้

- มะม่วงเบา
- น้ำตาลซูโครส
- สารเคมี ได้แก่ กรดซิตริก แคลเซียมคลอไรด์ และโซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์

1. การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ

ผลมะม่วงเบาที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นมะม่วงดิบที่มีอายุน้อยกว่า 60 วัน ซึ่งเป็นระยะที่นิยมนำมา บริโภคสด (นพรัตน์ บำรุงรักษ์, 2533) และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะเป็นระยะที่เปลือกหุ้มเมล็ดยังไม่แข็ง จึงสะดวกต่อการตัดแต่ง และผลมะม่วงเบาที่ใช้มีน้ำหนักประมาณ 50 - 70 กรัมต่อผล โดยมีน้ำหนักเนื้อ เปลือก และเมล็ดโดยเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละประมาณ 47.00 23.36 และ 29.63 ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนน้ำหนักเนื้อต่อผลต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงชนิดอื่นที่นิยมนำมาแปรรูป เช่น มะม่วงแก้ว มะม่วงสามปี และมะม่วงสายพันธุ์ต่างประเทศ (บุหลัน พิทักษ์ผล และคณะ, 2523; ภคินี อัครเวสสะพงศ์ และคณะ, 2532; สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์ และคณะ, 2536; Teotia, et al., 1987)

องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของมะม่วงเบา (ตารางที่ 4) ที่ใช้ศึกษามีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 90.36 ซึ่งสูงกว่ามะม่วงดิบทั่วไปที่มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 86.0 - 90.9 (Teotia, et al., 1989) โดยแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์และอายุ (บุหลัน พิทักษ์ผล และคณะ, 2523) มะม่วงเบาดิบมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ร้อยละ 6.51 ซึ่งต่ำกว่ามะม่วงสุก เนื่องจากในมะม่วงดิบมีปริมาณแป้งเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล (อารีย์ ใจเพชร และคณะ, 2530) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณร้อยละ 4.34 และ 2.96 ตามลำดับ มะม่วงดิบจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กลูโคส และฟรุคโตส) มาก ในขณะที่มะม่วงสุกจะพบน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (ซูโครส) มาก (นิริยา รัตนานนท์ และ ดนัย บุญเกียรติ, 2533) มะม่วงเบาที่มีปริมาณกรดซิตริกสูงถึงร้อยละ 3.27 จึงมีรสเปรี้ยวมากเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงแก้ว (ภคินี อัครเวสสะพงศ์ และคณะ, 2532)

สำหรับคุณภาพทางกายภาพจะใช้เป็นดัชนีที่บอกถึงอายุ และลักษณะของมะม่วงที่เหมาะสมในการแปรรูป การเก็บเกี่ยวสามารถดูจากความถ่วงจำเพาะ มะม่วงเบาที่ใช้ในการทดลองมีความหนาแน่น 0.983 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ความถ่วงจำเพาะ 0.983) การเลือกใช้มะม่วงเบาที่มีความหนาแน่นดังกล่าว เป็นระยะที่เปลือกหุ้มเมล็ดยังไม่แข็งตัว

จึงตัดแต่งได้ง่าย เมื่อวัดความแน่นเนื้อมีค่าโดยเฉลี่ย 7.08 นิวตัน ในมะม่วงดิบมีความแน่นเนื้อสูงกว่ามะม่วงสุก เพราะมีเพคตินซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่และไม่ละลายน้ำอยู่เป็นปริมาณมาก ทำให้เซลล์ยึดเกาะกันแน่น (สายชล เกตุษา และสุนทร โปทา, 2535) สีเนื้อมะม่วงเบาวัดตามระบบ Hunter ค่าความสว่าง (L) 31.31 มีลักษณะสีเขียวอ่อน (ค่า a) ระดับ -1.48 ผสมกับสีเหลือง (ค่า b) ที่ระดับ 9.27

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเนื้อมะม่วงเบา

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ทางเคมี*	
ความชื้น (ร้อยละ)	90.36 \pm 0.92
กรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (ร้อยละ)	3.27 \pm 0.91
ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (°บริกซ์)	6.51 \pm 0.53
น้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	4.34 \pm 0.19
น้ำตาลรีดิวิซ์ (ร้อยละ)	2.96 \pm 0.07
ทางกายภาพ**	
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	7.08 \pm 1.54
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	983.1 \pm 0.02
ค่า L	31.06 \pm 1.16
ค่า a	-1.48 \pm 0.28
ค่า b	9.27 \pm 1.48

หมายเหตุ * จากการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์โดยน้ำหนักเปียก

** จากการทดลอง 10 ซ้ำ

2. การศึกษาผลของสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และแคลเซียมคลอไรด์ต่อลักษณะการเกิดสีน้ำตาลและเนื้อสัมผัสของมะม่วงเบา

ลักษณะการเกิดสีน้ำตาล จากผลการทดลองตารางที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายผสม และเวลาในการแช่ไม่มีผลต่อคุณภาพด้านสีของมะม่วงหลังการแช่สารละลาย โดยค่า L และ ค่า a ที่วัดได้จากเครื่อง JUKI ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ค่า b มีแนวโน้มลดลง ($p < 0.05$) เมื่อใช้เวลานานขึ้น แสดงให้เห็นว่าสีของเนื้อมะม่วงมีสีเหลืองซีด และจากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีพรรณนาเชิงปริมาณอธิบายลักษณะสี 1 หมายถึงสีเหลืองอ่อน 10 หมายถึงสีน้ำตาล ให้ผลสอดคล้องกับค่าสีที่วัดจากเครื่อง JUKI พบว่าคะแนนของค่าสีค่อนข้างต่ำไปทางสีเหลืองอ่อน ไม่ปรากฏสีน้ำตาลในทุกชุดการทดลอง และผลไม่แตกต่างกันในระหว่างชุดการทดลองที่ใช้สารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.2 และการปรับเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์จากร้อยละ 0.4 เป็น 0.7 ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน ดังนั้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ร้อยละ 0.1 สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดแต่งชิ้นผลไม้ และมีผลส่งเสริมจากแคลเซียมคลอไรด์ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (ประสารสวัสดิ์ชิตัง, 2538) จึงไม่พบลักษณะการเกิดสีน้ำตาลกับชิ้นมะม่วง

ลักษณะเนื้อสัมผัส จากผลการตรวจสอบความแน่นเนื้อโดยใช้เครื่องมือ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่ำ (ร้อยละ 0.4) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จากร้อยละ 0.1 เป็นร้อยละ 0.2 มีผลทำให้ความแน่นเนื้อของมะม่วงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับการทดลองของ Levi และคณะ (1980) ซึ่งได้ศึกษาผลของการแช่สารละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อความแน่นแข็งของกล้วยอบแห้ง พบว่ากล้วยอบแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการลวกให้ค่าความแน่นเนื้อที่มีแนวโน้มสูงขึ้น หลังจากการแช่กล้วยในสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 0.25 เนื่องจากซัลไฟต์สามารถยับยั้งเอนไซม์เพคโตไลติก แต่ที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์สูงขึ้น (ร้อยละ 0.7) การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ไม่มีผลต่อความแน่นเนื้อของมะม่วง ($p < 0.05$) แสดงว่าแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูงมีอิทธิพลต่อความแน่นเนื้อของชิ้นมะม่วงมากกว่าโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ส่วนผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีพรรณนาเชิงปริมาณ อธิบายลักษณะเนื้อสัมผัส 1

หมายถึง ความแน่นเนื้อน้อย 10 หมายถึงความแน่นเนื้อมาก พบว่าคะแนนเฉลี่ยของชุด การทดลองที่เข้าในสารละลายผสมแคลเซียมเข้มข้นร้อยละ 0.7 มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นร้อยละ 0.4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงว่าที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มีผลทำให้ความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น ดังนั้นสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.7 จึงเหมาะสมต่อการผลิตเพื่อให้ได้ชิ้นมะม่วงที่มีความแน่นเนื้อสูงสุด

สำหรับเวลาที่ใช้ในการแช่ไม่มีผลต่อลักษณะการเกิดสีน้ำตาล และความแน่นเนื้อของชิ้นมะม่วง การแช่มะม่วงในสารละลายผสมเป็นเวลานานไม่ส่งเสริมให้ลักษณะทางกายภาพของชิ้นมะม่วงดีขึ้น จึงไม่จำเป็นต้องแช่มะม่วงในสารละลายผสมเป็นเวลานาน ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่คือ 6 ชั่วโมง

จากผลการทดลองดังกล่าว โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ก็เพียงพอในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และการผลิตเพื่อให้ชิ้นมะม่วงมีความแน่นเนื้อสูงสุด ควรใช้สารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.7 โดยใช้เวลาในการแช่ชิ้นมะม่วง 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมเมตาโบซัลไฟต์ผสมกับแคลเซียมคลอไรด์ และเวลาในการแช่ต่อลักษณะปรากฏของมะม่วงหลังการแช่สารละลาย

ความเข้มข้น (ร้อยละ)		เวลา (ชม.)	ค่าวัดสีจากเครื่อง JUKI			ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	คะแนนทางประสาทสัมผัส	
Na ₂ S ₂ O ₅	CaCl ₂		L	a	b		สี	ความแน่นเนื้อ
0.1	0.4	6	30.520 ^{ns}	-1.760 ^{ns}	6.060 ^a	5.991 ^b	0.715 ^{ns}	5.900 ^{ab}
0.1	0.4	12	31.420	-1.895	6.690 ^a	5.790 ^b	0.585	5.655 ^b
0.1	0.4	24	29.775	-1.660	4.910 ^b	5.758 ^b	0.580	5.450 ^b
0.1	0.7	6	31.075	-1.860	6.015 ^a	7.547 ^a	0.715	6.680 ^a
0.1	0.7	12	30.630	-1.725	5.545 ^{ab}	6.796 ^a	0.595	6.330 ^a
0.1	0.7	24	31.110	-1.620	5.160 ^b	6.449 ^b	0.505	5.375 ^b

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ความเข้มข้น (ร้อยละ)		เวลา (ชม.)	ค่าวัดสีจากเครื่อง JUKI			ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	คะแนนทางประสาทสัมผัส	
Na ₂ S ₂ O ₅	CaCl ₂		L	a	b		สี	ความแน่นเนื้อ
0.2	0.4	6	30.220	-1.805	5.715 ^{ab}	6.570 ^{ab}	0.625	5.315 ^b
0.2	0.4	12	30.540	-1.775	5.130 ^b	6.449 ^b	0.525	4.895 ^{bc}
0.2	0.4	24	31.070	-1.630	4.280 ^b	6.653 ^{ab}	0.460	4.490 ^c
0.2	0.7	6	31.570	-1.925	6.150 ^a	6.713 ^{ab}	0.590	5.595 ^b
0.2	0.7	12	30.970	-1.845	5.655 ^{ab}	6.367 ^b	0.495	5.605 ^b
0.2	0.7	24	30.970	-1.765	5.050 ^b	6.446 ^b	0.475	4.770 ^{bc}

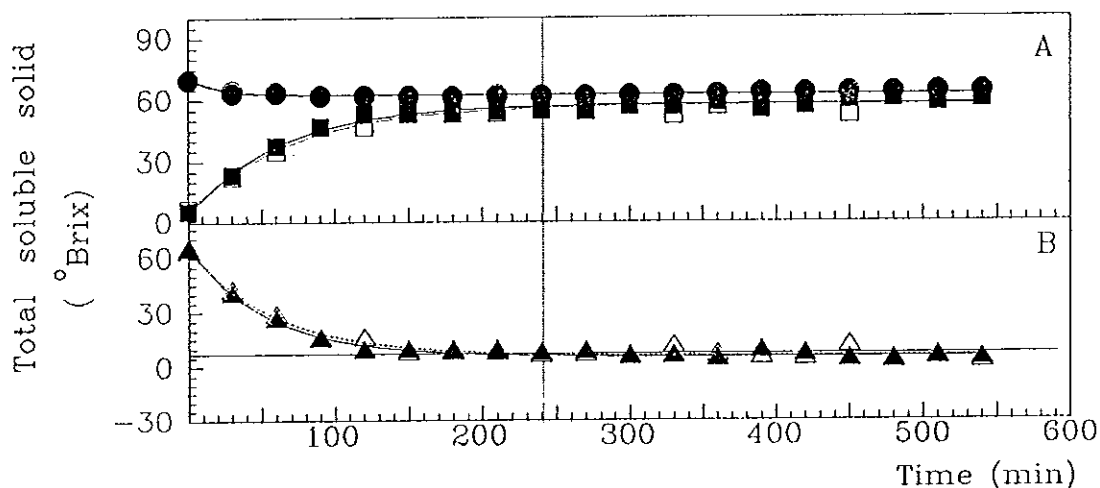
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันในกลุ่มบ่งชี้ว่าแตกต่างกัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ns : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายน้ำตาลซูโครส

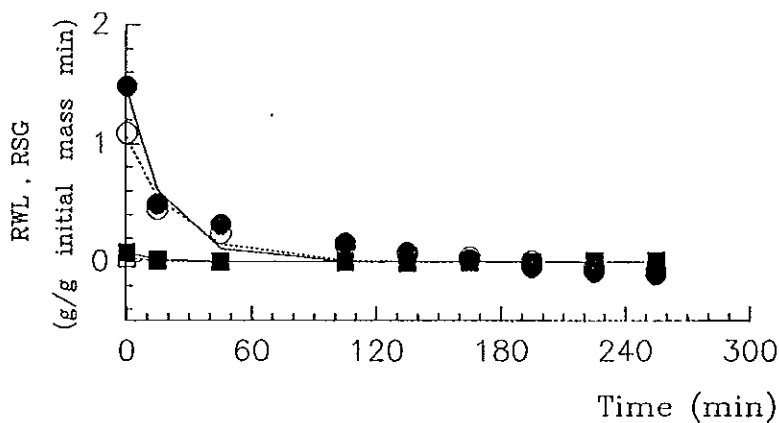
3.1 ลักษณะทั่วไปของการถ่ายโอนมวลในระหว่างการแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายน้ำตาล

จากการวิเคราะห์ผลต่างระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดภายในชิ้นมะม่วงกับน้ำเชื่อม(driving force) ที่เวลาแตกต่างกัน สามารถกำหนดเวลายุติสำหรับการแช่โดยคัดเลือกเวลาที่ความเข้มข้นของน้ำตาลภายในชิ้นมะม่วงมีค่าเท่ากับร้อยละ 90 ของน้ำตาลในน้ำเชื่อม (คือผลต่างระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดภายในชิ้นมะม่วงกับน้ำเชื่อมมีค่าแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 7) จากรูปที่ 19 (A) พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำเชื่อมลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 1 ชม.แรกของการแช่และเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในชิ้นมะม่วง หลังจากแช่ประมาณ 240 นาที การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อเพิ่มเวลาแช่เป็น 270 นาที พบว่าไม่มีความแตกต่างของผลของความแตกต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกชิ้นมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังรูปที่ 19 (B) ซึ่งให้ผลเหมือนกันทั้งสภาวะที่มีการกวนและไม่มีการกวน ดังนั้นการพิจารณาคัดเลือกจุดยุติของการแช่เพื่อใช้ศึกษาในลำดับต่อไปจึงใช้เวลา 240 นาทีเป็นบรรทัดฐานตามกำหนดไว้ข้างต้น



รูปที่ 19 (A) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ภายในชิ้นมะม่วงเบา (■ : $N_{Re} 200$, □ : $N_{Re} 0$) และในน้ำเชื่อม (● : $N_{Re} 200$, ○ : $N_{Re} 0$), (B) ผลต่างของความเข้มข้นภายในและภายนอกชิ้นมะม่วงเบาที่เวลาต่างกัน (▲ $N_{Re} 200$, △ : $N_{Re} 0$)

เมื่อพิจารณาอัตราเร็วของสูญเสียน้ำและอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลจะลดลงในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการแช่ต้ม หลังจากนั้นอัตราการสูญเสียน้ำและอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลจะลดลง (รูปที่ 20) ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วง 1 ชั่วโมงแรกความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ใช้ และความเข้มข้นของสารละลายภายในเนื้อเยื่อมะม่วงมีมาก จึงทำให้เกิดแรงขับ (driving force) ในการถ่ายโอนของน้ำและน้ำตาลสูง แต่เมื่อน้ำได้ซึมผ่านออกจากชั้นมะม่วงและน้ำตาลได้แพร่เข้าไปในชั้นมะม่วงแล้วทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นดังกล่าวลดลง แรงขับในการถ่ายโอนของน้ำและน้ำตาลจึงลดลง ทำให้อัตราการถ่ายโอนของน้ำและน้ำตาลลดลง จากผลปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำมากกว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และอัตราเร็วในการสูญเสียน้ำสูงมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลแสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถแพร่ผ่านออกจากเนื้อเยื่อผลไม้ได้ดีกว่าน้ำตาลแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อผลไม้ (ช่อนวี รัตนาพันธุ์, 2533 ; สงวนศรี เจริญเหรียญ และ วิชาญ วงศ์สิทธิ์, 2534 ; Wongkrajang, 1996)

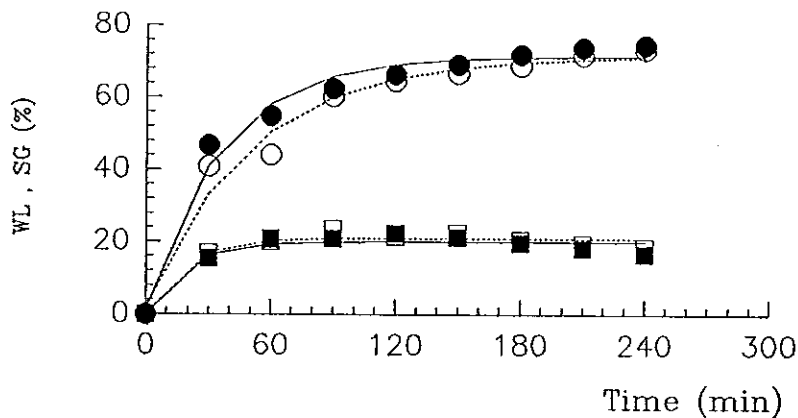


รูปที่ 20 อัตราการสูญเสียน้ำ (● : $N_{Re} 200$, ○ : $N_{Re} 0$) และอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (■ : $N_{Re} 200$, □ : $N_{Re} 0$) ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70° บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50° ซ

3.2 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อการถ่ายโอนมวลสาร

3.2.1 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่ออัตราการแพร่

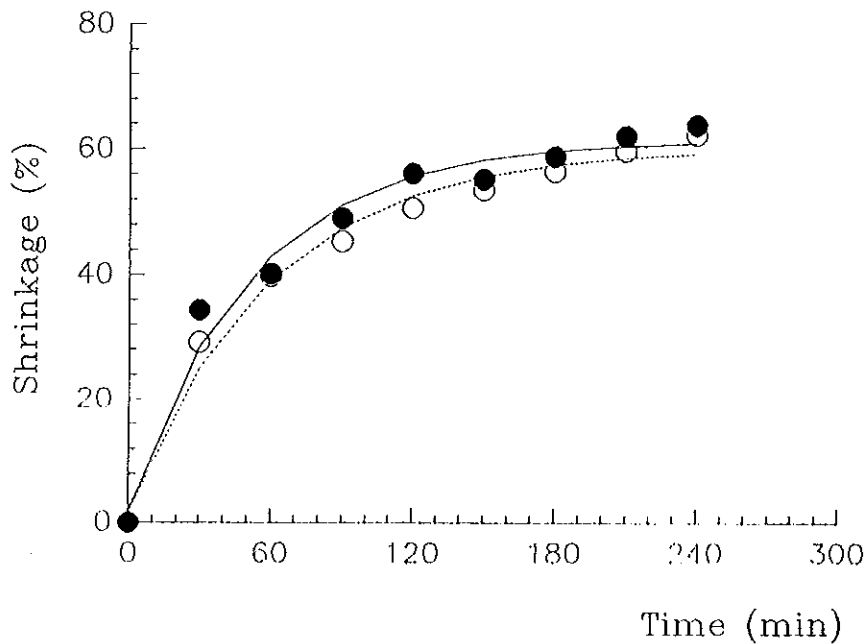
จากรูปที่ 21 แสดงปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชั้นมะม่วง หลังการแช่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 70° บริกซ์ ปรับพีเอช 3.5 ด้วยกรดซิตริก ในอัตราส่วนมะม่วงต่อสารละลาย 1 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50° ซ และกำหนดสภาวะการกวนที่ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (N_{Re}) เป็น 0 และ 200 คือมีการกวนที่ระดับ 0 และ 118 รอบต่อนาทีตามลำดับ เป็นระยะเวลาต่าง ๆ รวมเวลา 4 ชม. จะเห็นว่าที่สภาวะค่าเรโนลด์นัมเบอร์เป็น 0 จะสูญเสียน้ำไปประมาณร้อยละ 73.24 และมีน้ำตาลเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.63 โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่สภาวะค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200 จะสูญเสียน้ำประมาณร้อยละ 74.61 โดยน้ำหนักและมีน้ำตาลเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.57 โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าเรโนลด์นัมเบอร์จาก 0 เป็น 200 ไม่ทำให้การสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 21 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อการสูญเสียน้ำ (● : N_{Re} 200, ○ : N_{Re} 0)

และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (■ : N_{Re} 200, □ : N_{Re} 0) ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70° บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50° ซ

สำหรับการหดตัวของมะม่วงเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงลักษณะปรากฏทางกายภาพโดยวัดปริมาณของมะม่วงทั้งหมดที่แช่ในน้ำเชื่อม พบว่าการเพิ่มค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ไม่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมพบว่ามะม่วงมีการหดตัวร้อยละ 63.88 และ 62.34 (รูปที่ 22) ที่ค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ 0 และ 200 ตามลำดับ



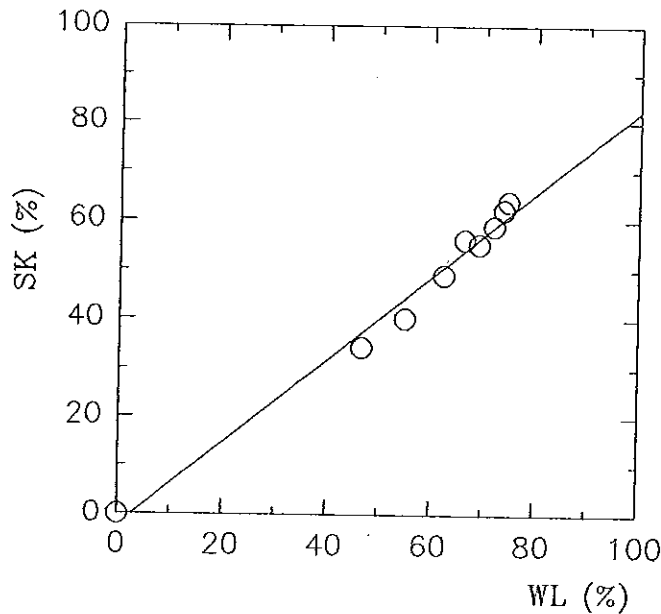
รูปที่ 22 ผลของค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง (● : $N_{Re} = 200$, ○ : $N_{Re} = 0$) ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70° ปริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50° ซ

การลดลงของชิ้นมะม่วงเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นมะม่วง เมื่อวิเคราะห์การถดถอยจะได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 23 ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (25)

$$SK = 0.81 \times WL \quad (R^2 = 0.98) \quad (25)$$

เมื่อ SK คือ การหดตัวของชิ้นมะม่วง (ร้อยละ)

WL คือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นมะม่วง (ร้อยละ)



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำกับการหดตัวของชิ้นมะม่วงแช่อิ่มในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70° บริกซ์ ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่อุณหภูมิ 50° ซ สภาพวะที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200

3.2.2 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในเนื้อเยื่อผลไม้โดยตรง ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คือการกวน โดยการกวนทำให้น้ำเชื่อมไหลเวียนได้ดีและมีความเข้มข้นสม่ำเสมอเป็นผลให้ความต้านทานภายนอกลดลง การส่งผ่านมวลสารระหว่างผิวชิ้นผลไม้จึงเพิ่มขึ้น จากผลการทดลอง (ตารางที่ 6) พบว่าการเพิ่มค่าเรโนลด์จาก 0 เป็น 200 ไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลเพิ่มขึ้น ($p > 0.05$) เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงในการแช่อิ่มจึงเกิดกระแสการพาตามธรรมชาติอย่างเพียงพอ ทำให้น้ำที่เคลือบออกจากเซลล์ผลไม้เข้าไปละลายรวมกับน้ำเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกที่กีดขวางการแพร่ภายนอกชิ้นผลไม้มีค่าน้อยลง จึงทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารในเนื้อเยื่อมะม่วงที่สภาพวะมีการกวนไม่แตกต่างกับสภาพวะที่ไม่มีการกวน (จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2536 ;

Siripatana, 1997) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาลพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำจะสูงมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าเนื้อเยื่อมะม่วงยอมให้น้ำแพร่ได้ดีกว่าการแพร่เข้าของน้ำตาลเนื่องจากน้ำมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าน้ำตาลจึงแพร่ผ่านเนื้อเยื่อได้ดีกว่า (สงวนศรี เจริญเหรียญ และวิชาญ วงศ์สิทธิ์, 2534 ; Saurel, et al., 1994)

ตารางที่ 6 ผลของค่าเรโนลด์นัมเบอร์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและน้ำตาล

ค่าเรโนลด์นัมเบอร์	สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\times 10^{10}$ เมตร ² /วินาที)	
	น้ำ	น้ำตาล
0	3.037 ^{aA}	2.859 ^{aB}
200	3.220 ^{aA}	2.957 ^{aB}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันภายในแถวเดียวกัน ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

การวิเคราะห์การถ่ายโอนมวลสารสำหรับการทดลองนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Siripatana (1997) ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถใช้ได้ดีกับกรณีศึกษาที่มีการกวนอย่างเพียงพอ ($Bi \rightarrow \infty$) ดังนั้นถึงแม้ว่าการกวนจะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการแพร่ขององค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกชั้นผลไม้มີมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้ง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงต้องแช่ส้มในสภาวะที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์เป็น 200 แต่สำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น ไม่จำเป็นต้องมีการกวนแต่อย่างใดถ้าใช้สภาวะดังในการทดลองนี้

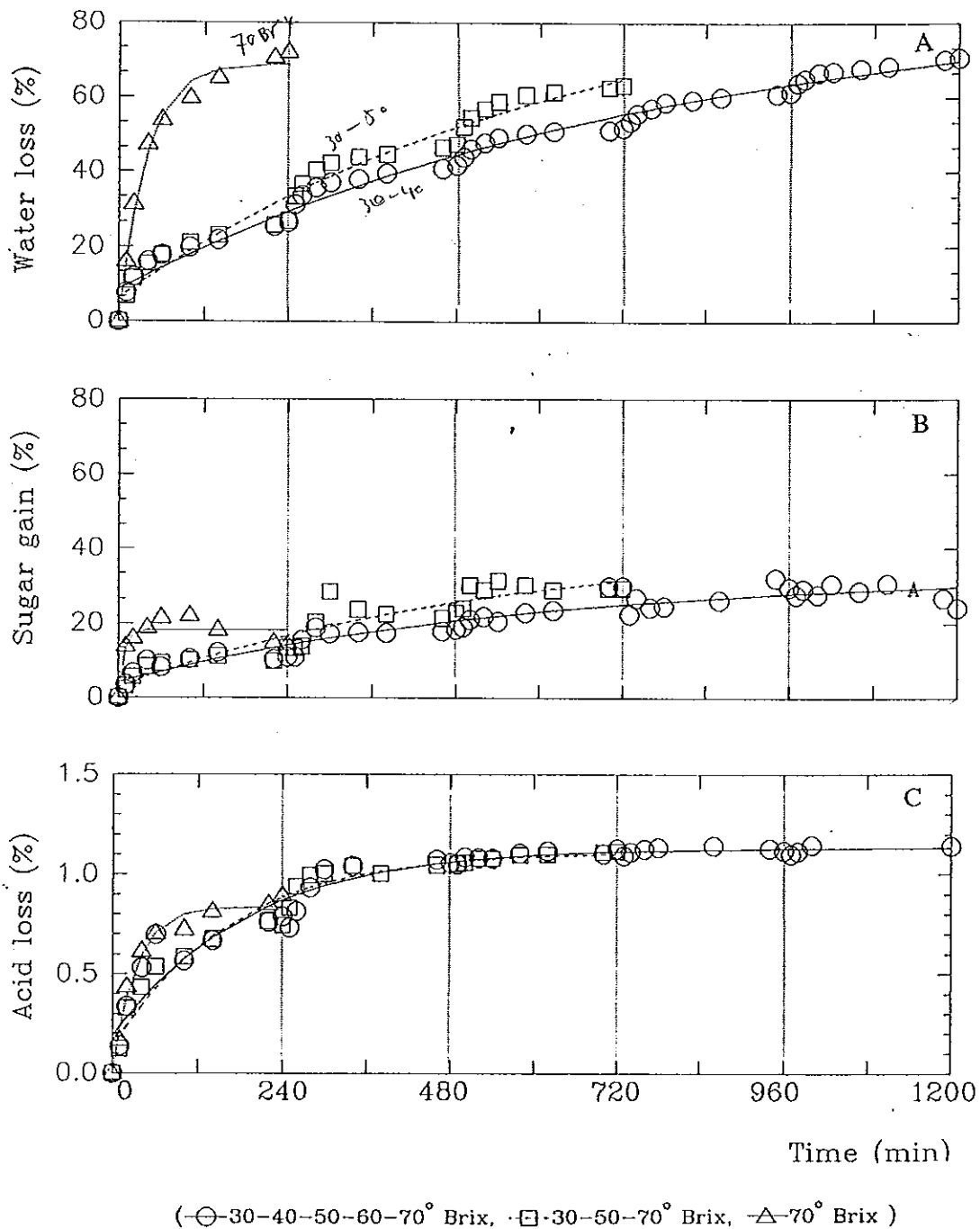
3.3 ผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม

แช่ชิ้นมะม่วงในน้ำเชื่อมที่มีรูปแบบการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 3 แบบ คือ แบบแรกไม่ปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมโดยแช่ในน้ำเชื่อมความเข้มข้นสูง 70° บริกซ์ แบบปรับเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อม 10° บริกซ์ทุก 4 ชั่วโมงโดยมีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นระดับแบบ 30→40→50→60→70° บริกซ์ และแบบที่สามปรับเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อม 20° บริกซ์ บริกซ์ทุก 4 ชั่วโมงโดยความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มแบบ 30→50→70° บริกซ์ ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารโดยพิจารณาการสูญเสียน้ำและกรด การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล การหดตัวของชิ้นมะม่วง และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ได้ผลการทดลองดังนี้

3.3.1 ผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่ออัตราการแพร่

จากผลการทดลอง (รูปที่ 24) พบว่าการแช่ชิ้นมะม่วงในน้ำเชื่อมความเข้มข้นสูง 70° บริกซ์ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำ น้ำตาลและกรดอย่างรวดเร็วในเวลา 1 ชั่วโมงแรกของการแช่ชิ้นเท่านั้น และการถ่ายโอนมวลสารมีค่าคงที่ในช่วงหลังของการแช่ชิ้น เมื่อสิ้นสุดการแช่ชิ้นพบว่าการสูญเสียน้ำและกรดออกจากชิ้นมะม่วงมีค่าร้อยละ 72.19 และ 1.141 ตามลำดับ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีปริมาณร้อยละ 14.31 ทั้งนี้ก็เพราะในช่วงต้น ๆ นั้น ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของมวลสารภายในชิ้นมะม่วงกับภายนอกนั้นต่างกันมากทำให้เกิดแรงขับ (driving force) ของการถ่ายโอนมวลสารสูง (Yang and Maguer, 1997) ในขณะที่การแช่ชิ้นมะม่วงโดยปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นลำดับขั้นตลอดกระบวนการผลิตพบว่าการสูญเสียน้ำมีค่าต่ำกว่า ค่าการสูญเสียน้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละนิดเป็นลำดับขั้น และมีค่าสูงเมื่อใช้เวลานานขึ้น โดยการปรับน้ำเชื่อมเป็นระดับแบบ 30→40→50→60→70° บริกซ์ ใช้ระยะเวลา 20 ชั่วโมง ให้ค่าการสูญเสียน้ำร้อยละ 26.31, 41.48, 51.79, 61.60 และ 70.80 ภายหลังการแช่ชิ้นในน้ำเชื่อมเข้มข้นจาก 30 ถึง 70° บริกซ์ ตามลำดับ ส่วนการปรับน้ำเชื่อมเป็นระดับแบบ 30→50→70° บริกซ์ ซึ่งใช้เวลา 12 ชั่วโมง ให้ค่าการสูญเสียน้ำร้อยละ 26.97, 47.41 และ 72.19 บริกซ์ภายหลังการแช่ชิ้นในน้ำเชื่อมเข้มข้นจาก 30 ถึง 70° บริกซ์ตามลำดับ เมื่อเทียบค่าการสูญเสียน้ำที่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเหมือนกัน (50 และ 70° บริกซ์) ของทั้งสองแบบการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมพบว่า ค่าการสูญเสียน้ำของการปรับเพิ่มครั้งละ 10° บริกซ์ มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับเพิ่มครั้งละ 20 การสูญเสียกรดจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการสูญเสียน้ำออกจากชั้นมะม่วง แต่กรดแพร์ออกจากชั้นมะม่วงได้อย่างรวดเร็วกว่าน้ำ โดยการลดลงของกรดในแต่ละชั้นของการปรับน้ำเชื่อมไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมพบว่ามีค่าร้อยละ 1.14 และ 1.12 สำหรับการปรับน้ำเชื่อมแบบ 30→40→50→60→70° บริกซ์และแบบ 30→50→70° บริกซ์ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับขั้นที่ละนิดอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะการแพร์ของน้ำตาลเข้าสู่ชั้นมะม่วงเป็นไปอย่างช้า ๆ ตามแรงขับ (driving force) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.90, 18.30, 24.83, 24.54 และ 24.10 สำหรับการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมครั้งละ 10° บริกซ์จากน้ำเชื่อมเข้มข้น 30 ถึง 70° บริกซ์ตามลำดับ ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) กับการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมครั้งละ 20° บริกซ์มีค่าร้อยละ 13.45, 22.71 และ 29.31 ที่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30, 50 และ 70° บริกซ์ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแพร์ของน้ำตาลผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงค่อนข้างยาก และเป็นไปได้ช้ากว่าการแพร์ของน้ำและกรด เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงต้องอาศัยเวลามากขึ้นเพื่อให้น้ำตาลมีโอกาสแพร์เข้าสู่เนื้อเยื่อได้สูง ดังนั้นเพื่อส่งเสริมให้มีการแพร์ของน้ำตาลเข้าสู่ชั้นมะม่วงมากขึ้นจึงต้องมีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมโดยอาศัยเวลาอย่างเพียงพอ



รูปที่ 24 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ต่อการสูญเสียน้ำ (A) การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล(B) และการลดลงของกรด (C) ในชิ้นมะม่วงที่อุณหภูมิ 50° ซ มีการกวน 118 รอบต่อนาที

การแพร่ของโมเลกุลในสภาวะที่ไม่คงที่สามารถอธิบายได้โดยอาศัยกฎข้อที่สองของฟิคค์ (Fick's second law) จากความสัมพันธ์ของข้อมูลการสูญเสียน้ำหรือการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลกับเวลาที่เป็นไปตามสมการถดถอยแบบเอ็กโปเนนเชียล สามารถหาอัตราการแพร่ได้โดยนำความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวมาฟิต (fit) กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยต้องคำนึงถึงรูปทรงของชิ้นผลไม้ที่ใช้ศึกษาภายใต้สภาวะที่มีการกวนและปริมาตรของสารละลายคงที่ (Crank, 1975) สำหรับในการศึกษาคั้งนี้ลักษณะของชิ้นมะม่วงมีรูปทรงวงรีจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Siripatana (1997) มีความสัมพันธ์ดังสมการ (26) (27) และ (28)

จากสมการการแพร่ของมวลสาร

$$\text{น้ำ} \quad E_w = 1 - \left(\frac{WL_t}{WL_\infty} \right) = C_1 \exp \left(- \frac{Sh (\gamma + 1)}{2 \gamma} v \frac{Dt}{a^2} \right) \quad (26)$$

$$\text{น้ำตาล} \quad E_s = 1 - \left(\frac{SG_t}{SG_\infty} \right) = C_1 \exp \left(- \frac{Sh (\gamma + 1)}{2 \gamma} v \frac{Dt}{a^2} \right) \quad (27)$$

$$\text{กรด} \quad E_a = 1 - \left(\frac{AL_t}{AL_\infty} \right) = C_1 \exp \left(- \frac{Sh (\gamma + 1)}{2 \gamma} v \frac{Dt}{a^2} \right) \quad (28)$$

$$\text{หรือรูปทั่วไป} \quad E = C_1 \exp \left[- \frac{Sh (\gamma + 1)}{2 \gamma} v \frac{Dt}{a^2} \right]$$

ดังนั้นอัตราการแพร่

$$\frac{d(1-E)}{dt} = EC_1 \left[\frac{Sh (\gamma + 1)}{2 \gamma} v \frac{D}{a^2} \right] \quad (29)$$

เมื่อ WL_t, WL_∞ = ปริมาณน้ำที่แพร่จากชิ้นมะม่วงที่เวลาใด ๆ และที่เวลาอนันต์ (ร้อยละ)

SG_t, SG_∞ = ปริมาณน้ำตาลที่แพร่เข้าชิ้นมะม่วงที่เวลาใด ๆ และที่เวลาอนันต์ (ร้อยละ)

AL_t, AL_∞ = ปริมาณกรดที่แพร่จากชิ้นมะม่วงที่เวลาใด ๆ และที่เวลาอนันต์ (ร้อยละ)

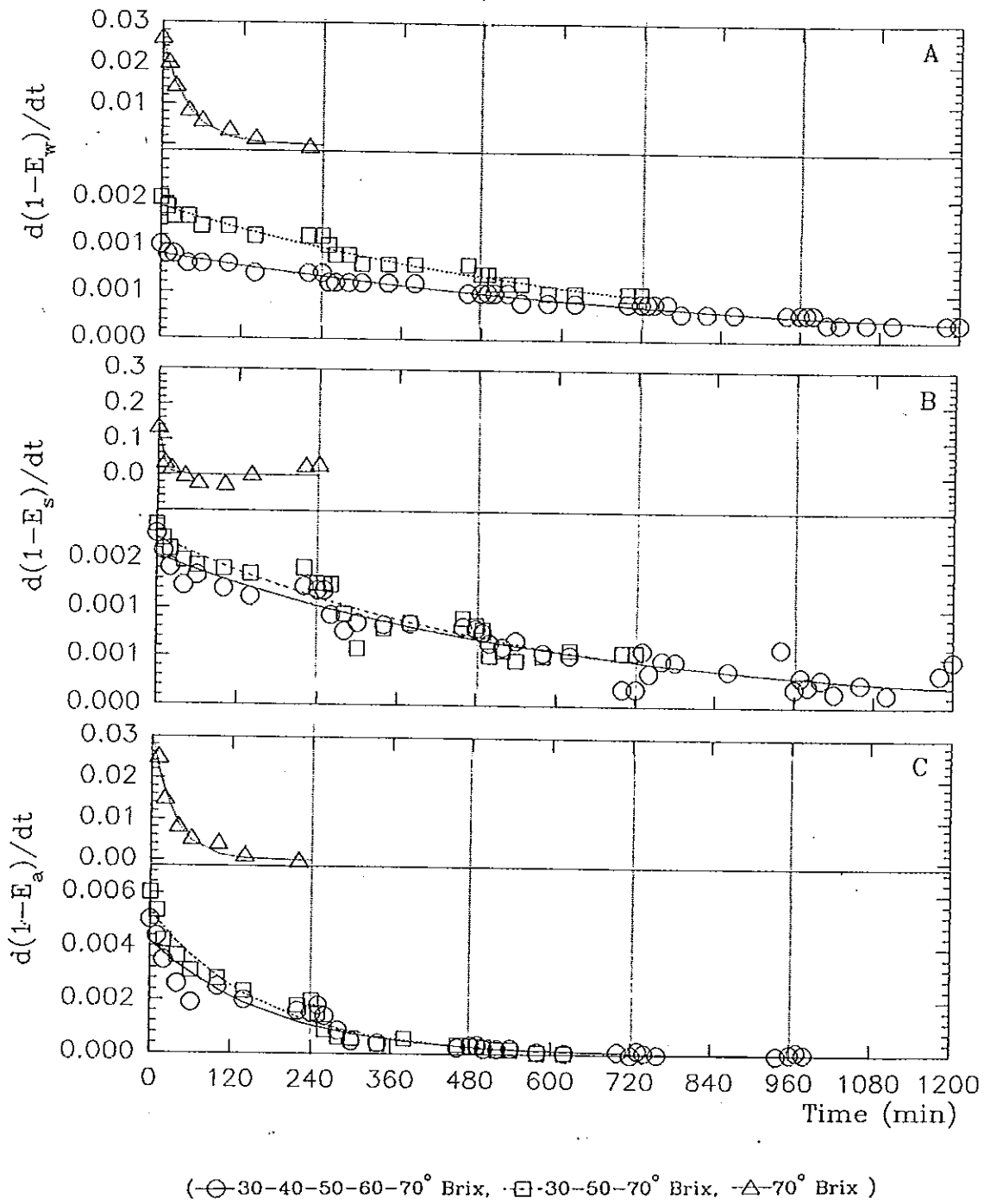
D_w, D_s, D_a = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (เมตร²/วินาที)

t = เวลาแช่อิ่ม (นาที)

C_1 = พารามิเตอร์อันเนื่องมาจากสภาวะเริ่มต้นของการกระจายความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเฟสของแข็ง

Sh	=	จำนวนเซอร์วูด
γ	=	แฟกเตอร์การสกัดสมมูล
v	=	แฟกเตอร์รูปทรงของของแข็ง
a	=	ความยาวเชิงลักษณะ (เมตร)

อัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (รูปที่ 25) สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (29) จากผลการทดลองพบว่าอัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ในชั้นมะม่วงเมื่อแช่อิ่มในน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 70° บริกซ์มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ แสดงว่าชั้นมะม่วงซึ่งแช่ในน้ำเชื่อมที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวมีโอกาสสูญเสียน้ำและกรดสูงในระยะเวลาสั้น แต่ในระยะเวลาดังกล่าวน้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงได้น้อย ส่วนการแช่อิ่มแบบปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นลำดับขั้นมีอัตราการแพร่ของมวลสารต่ำ โดยอัตราการแพร่ลดลงน้อยในช่วงต้นของการแช่อิ่ม และลดลงมากเป็นลำดับขั้น ซึ่งเป็นผลมาจากแรงขับ (driving force) และในกระบวนการผลิตต้องใช้เวลาานานจึงทำให้น้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงได้มากขึ้น สำหรับการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมชั้นละ 10° บริกซ์ให้อัตราการแพร่ของมวลสารไม่แตกต่างจากการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมชั้นละ 20° บริกซ์ เนื่องจากในสภาวะการแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 50°C และมีการกวนตลอดเวลาทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำเชื่อมอย่างสม่ำเสมอจึงทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของมวลสารภายในชั้นมะม่วงกับภายนอกของทั้งสองรูปแบบการปรับน้ำเชื่อมไม่ค่อยแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำนายได้โดยใช้ทฤษฎีการแพร่



รูปที่ 25 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ต่ออัตราการแพร่ของน้ำ (A) น้ำตาล (B) และกรด (C) ในชั้นมะม่วงที่ อุณหภูมิ 50°ซ มีการกวน 118 รอบต่อนาที

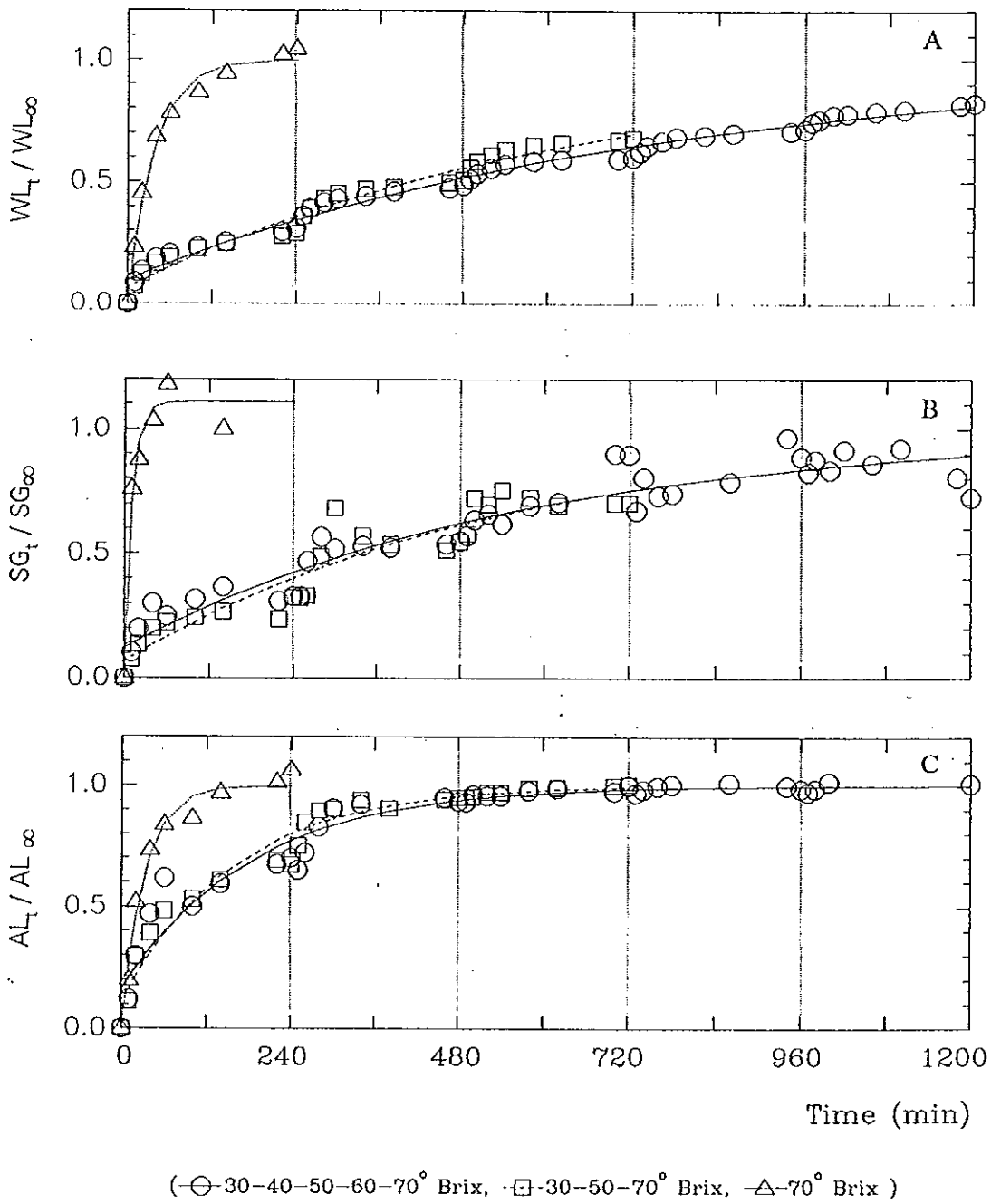
เมื่อนำข้อมูลรวมการสูญเสียน้ำ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่เวลาต่าง ๆ มาวิเคราะห์การถดถอยตามสมการ (29) เพื่อหา WL_{∞} , SG_{∞} , AL_{∞} , C_1 และ B (ตารางที่ 7) โดยกำหนดให้

$$B = \left(-\frac{Sh}{2} \frac{\gamma + 1}{\gamma} \nu \frac{Dt}{a^2} \right)$$

สมการ (26), (27) และ (28) อาจเขียนอยู่อีกในรูปแบบหนึ่งดังรูป

$$\frac{WL_t}{WL_{\infty}} \text{ หรือ } \frac{SG_t}{SG_{\infty}} \text{ หรือ } \frac{AL_t}{AL_{\infty}} = 1 - C_1 \exp(-Bt) \quad (30)$$

สมการที่ (30) แสดงสัดส่วนการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรด สัดส่วนดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการแพร่ โดยมวลสารมีอัตราการแพร่สูง ถ้าสามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็ว จากผลการทดลอง (รูปที่ 26) พบว่าการแช่อิมมersion ในน้ำเชื่อมเข้มข้นร้อยละ 70° ปริกซ์มีค่าสัดส่วนการแพร่สูง ในขณะที่การแช่อิมแบบปรับเพิ่มความเข้มข้นเป็นลำดับขั้นต้องใช้เวลาานเพื่อให้ความเข้มข้นของน้ำ น้ำตาล และกรดเข้าใกล้สภาวะสมดุล



รูปที่ 26 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ต่อสัดส่วนการสูญเสียน้ำ (A) การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (B) และการลดลงของกรด (C) ในชั้นมะม่วงที่อุณหภูมิ 50°ซ มีการกวน 118 รอบ ต่อนาที

ตารางที่ 7 ค่า WL_{∞} , SG_{∞} , AL_{∞} , C_1 และ B ที่พื้ดได้จากสมการที่ (30)

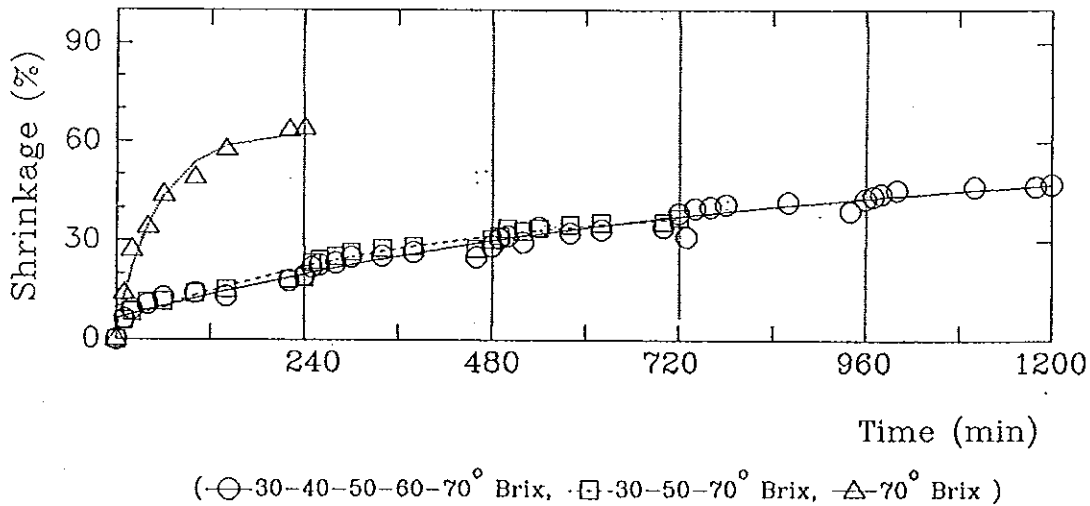
สมการ	การปรับน้ำเชื่อม	WL_t	WL_{∞}^*	SG_t	SG_{∞}^*	AL_t	AL_{∞}^*	B	C_1
การสูญเสียน้ำ	30→40→50→60→70°บริกซ์	70.80	82.58	-	-	-	-	0.0014	0.900
	30→50→70°บริกซ์	63.40	73.49	-	-	-	-	0.0024	0.930
	70°บริกซ์	72.19	69.10	-	-	-	-	0.0264	0.990
การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล	30→40→50→60→70°บริกซ์	-	-	24.10	33.21	-	-	0.0018	0.880
	30→50→70°บริกซ์	-	-	29.31	41.64	-	-	0.0018	0.930
	70°บริกซ์	-	-	14.31	18.21	-	-	0.1323	1.000
การสูญเสียกรด	30→40→50→60→70°บริกซ์	-	-	-	-	1.14	1.13	0.0053	0.840
	30→50→70°บริกซ์	-	-	-	-	1.12	1.11	0.0060	0.890
	70°บริกซ์	-	-	-	-	0.89	0.84	0.0310	1.010

หมายเหตุ : WL_t , SG_t , AL_t ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และปริมาณกรดลดลง ที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง

* เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการถดถอย ซึ่งไม่ใช่ค่าสุดท้ายที่เกิดจากการถ่ายโอนจริง

3.3.2 ผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง

สำหรับการหดตัวของชิ้นมะม่วง เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงมวลสารที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อผลไม้ จากรูปที่ 27 แสดงให้เห็นว่ามะม่วงแช่ลุ่มในน้ำเชื่อมเข้มข้นสูง 70° บริกซ์มีการหดตัวมากที่สุดสูงถึงร้อยละ 64 ($p < 0.05$) เนื่องจากการแช่ลุ่มในน้ำเชื่อมความเข้มข้นสูงเกิดการสูญเสียน้ำมาก โดยน้ำจะแพร่ออกจากชิ้นมะม่วงด้วยอัตราที่สูงในระยะเวลาสั้น ทำให้เกิดการหดตัวของเนื้อเยื่ออย่างรวดเร็ว แม้ว่าในเวลาเดียวกันจะมีการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วง แต่มีปริมาณน้อยเพราะน้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงค่อนข้างยากและมีการแพร่ช้า เมื่อมีการหดตัวของเนื้อเยื่อก็ยังเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของน้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วง ส่วนมะม่วงที่แช่ลุ่มโดยวิธีการปรับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นละ 10° บริกซ์ มีการหดตัวของชิ้นมะม่วงน้อยกว่า โดยการปรับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นละ 10° บริกซ์ มีการหดตัวร้อยละ 19.37, 28.31, 38.42, 42.90 และ 47.24 ที่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมจาก 30 ถึง 70° บริกซ์ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่าง ($p < 0.05$) จากการปรับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นละ 20° บริกซ์ มีการหดตัวร้อยละ 18.74, 30.36 และ 37.01 ที่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมจาก 30 ถึง 70° บริกซ์ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นมะม่วงดำเนินไปอย่างช้า ๆ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อย การหดตัวของเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างช้า ๆ พร้อมกันกับการสูญเสียน้ำ และในขณะเดียวกันมีการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงทันช่วงที่ก่อนที่จะมีการสูญเสียน้ำมาก ทำให้ระดับน้ำตาลในชิ้นมะม่วงมีสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นมะม่วงเพียงเล็กน้อย มะม่วงจึงมีลักษณะการเหี่ยวยุบน้อยกว่าการแช่ลุ่มในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 70° บริกซ์ จากผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน (2530) พบว่าการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นลำดับขั้นสามารถลดการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นผลไม้ จากวิธีการปรับเพิ่มความเข้มข้นร้อยละ 5 ทุก 12 ชั่วโมงสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักได้มากกว่าการปรับเพิ่มความเข้มข้นร้อยละ 20 ทุก 24 ชั่วโมง แต่ในงานวิจัยนี้ไม่มีข้อแตกต่างของระดับการปรับเพิ่มความเข้มข้นต่อการลดลงของปริมาตร อาจเป็นผลเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการแช่ลุ่มไม่เท่ากันจึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของผลการทดลอง ซึ่งในเชิงทฤษฎีแล้วการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมครั้งละ 20° บริกซ์ น่าจะมีการหดตัวมากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมครั้งละ 10° บริกซ์



รูปที่ 27 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ที่มีต่อการหดตัวของซีรัมมะม่วง

3.3.3 ผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ที่ได้จากผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงของความเข้มข้นของแต่ละรูปแบบการแช่ส้ม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดในมะม่วงที่ถูกแช่ในน้ำเชื่อมความเข้มข้นต่ำ (30° บริกซ์) มีค่าสูงกว่ามะม่วงที่ถูกแช่ในน้ำเชื่อมความเข้มข้นสูง 70° บริกซ์ ($p < 0.05$) ในช่วงต้นของการแช่ส้ม (4 ชั่วโมงแรก) และเมื่อพิจารณาเฉพาะมะม่วงที่แช่ส้มโดยวิธีปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นลำดับอย่างต่อเนื่องค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสูงขึ้น ซึ่งให้ผลเหมือนกันในแต่ละรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลของรูปแบบการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ที่เชื่อมมะม่วงด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่อุณหภูมิ 50°ซ ในสภาวะที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200

การปรับ น้ำเชื่อม (°บริกซ์)	ความเข้มข้น น้ำเชื่อม (°บริกซ์)	ความเข้มข้น ในชั้นมะม่วง (°บริกซ์)	ครึ่งของ ความหนา ของมะม่วง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (x 10 ¹⁰ เมตร ² /วินาที)		
				น้ำ	น้ำตาล	กรด
ชั้นละ 10	30	14.08	0.0036	5.19 ^a	3.30 ^a	6.02 ^a
	40	25.71	0.0033	4.78 ^{ab}	3.04 ^a	2.41 ^b
	50	35.99	0.0028	2.81 ^{cd}	1.29 ^{cd}	2.72 ^b
	60	44.45	0.0022	2.58 ^{cd}	0.54 ^d	0.07 ^c
	70	52.25	0.0019	1.46 ^d	0.37 ^d	0.27 ^c
ชั้นละ 20	30	13.45	0.0035	5.02 ^{ab}	3.67 ^a	5.93 ^a
	50	27.81	0.0031	5.15 ^a	1.76 ^{bc}	3.10 ^b
	70	40.56	0.0026	3.40 ^{bc}	1.17 ^{cd}	1.66 ^{bc}
-	70	27.69	0.0027	3.06 ^{cd}	2.61 ^{ab}	3.45 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากผลการทดลองอาจอธิบายได้ว่า ในสภาวะที่ภายในชั้นมะม่วงมีความเข้มข้นของสารละลายภายในสูงขึ้น ส่งผลทำให้เนื้อเยื่อของชั้นมะม่วงมีการหดตัวมากเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้น้อยจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏมีค่าต่ำ ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นได้มากถึงขั้นเมื่อแช่ชั้นมะม่วงในสารละลายน้ำเชื่อมเข้มข้น 70 °บริกซ์ ซึ่งมีการสูญเสียน้ำมากในเวลาอันรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของน้ำตาลภายในชั้นมะม่วงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการแพร่ของน้ำตาลจากน้ำเชื่อมและการลดลงของน้ำออกจากชั้นมะม่วง ยิ่งทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลภายในชั้นมะม่วงมีค่าสูงขึ้น จึงเกิดการหด

ตัวของเนื้อเยื่อ ช่องว่างภายในเซลล์ลดขนาดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้การแพร่ของมวลสารภายในเนื้อเยื่อเกิดขึ้นยากกว่าสภาพปกติ จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเฉลี่ยทั้งระบบมีค่าต่ำ แต่การเชื่อมแบบปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นการค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในชั้นมะม่วง โดยสภาวะเริ่มต้นของการเชื่อมความเข้มข้นของน้ำตาลภายในชั้นมะม่วงมีค่าต่ำ การลดลงของน้ำในชั้นมะม่วงเป็นไปอย่างช้า ๆ ขณะเดียวกันก็มีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล โดยน้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงได้มากพอก่อนที่จะมีการสูญเสียน้ำมาก ลักษณะของเนื้อเยื่อมะม่วงจึงเกิดการหดตัวต่ำในช่วงแรกของการเชื่อมและค่อย ๆ หดตัวมากขึ้นเมื่อใช้เวลานานขึ้น ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารสูงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเฉลี่ยทั้งระบบมีค่าสูง และลดลงตามลำดับขั้นของการปรับน้ำเชื่อม

ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของสารละลาย และความหนาของชั้นมะม่วงมาวิเคราะห์การถดถอยจะได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 28 ซึ่งอธิบายได้จากสมการ (31), (32) และ (33)

$$D_w = 4.82 - 0.02 X - 2730 a \quad (R^2 = 0.87) \quad (31)$$

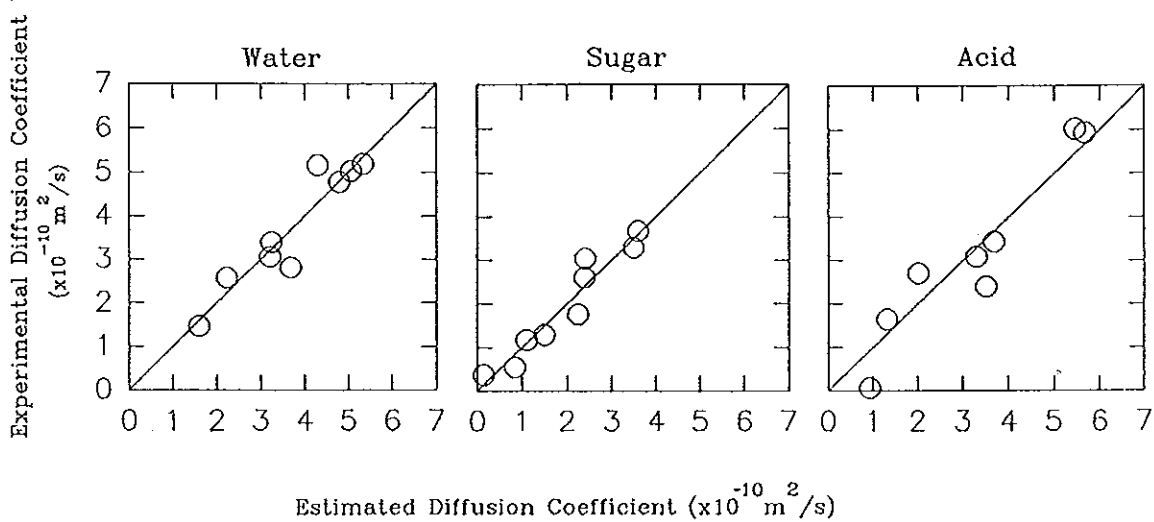
$$D_s = 6.16 - 0.10 X - 335.82 a \quad (R^2 = 0.92) \quad (32)$$

$$D_o = 11.42 - 0.19 X - 909.10 a \quad (R^2 = 0.91) \quad (33)$$

เมื่อ D_w, D_s, D_o = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (เมตร²/วินาที)

X = ความเข้มข้นของน้ำตาลในชั้นมะม่วง (ํปริกซ์)

a = ครึ่งของความหนาของชั้นมะม่วง (เมตร)



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากผลการทดลอง
กับการทำนาย

จากผลการทดลองพบว่าวิธีการปรับความเข้มข้นเป็นลำดับขั้น สามารถลดการสูญเสียน้ำ โดยการแพร่ของน้ำออกจากชั้นมะม่วงเป็นไปอย่างช้า ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อย น้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงมากขึ้น ส่งผลให้ชั้นมะม่วงมีลักษณะเหนียวแน่นน้อยกว่าการแช่ส้มในน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นสูง และการปรับน้ำเชื่อมครั้งละ 20° บริกซ์ใช้เวลาน้อยกว่าการปรับน้ำเชื่อมแบบครั้งละ 10° บริกซ์ ดังนั้นจึงเลือกวิธีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นระดับแบบ $30 \rightarrow 50 \rightarrow 70^{\circ}$ บริกซ์ เพื่อใช้เป็นวิธีการผลิตในการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป

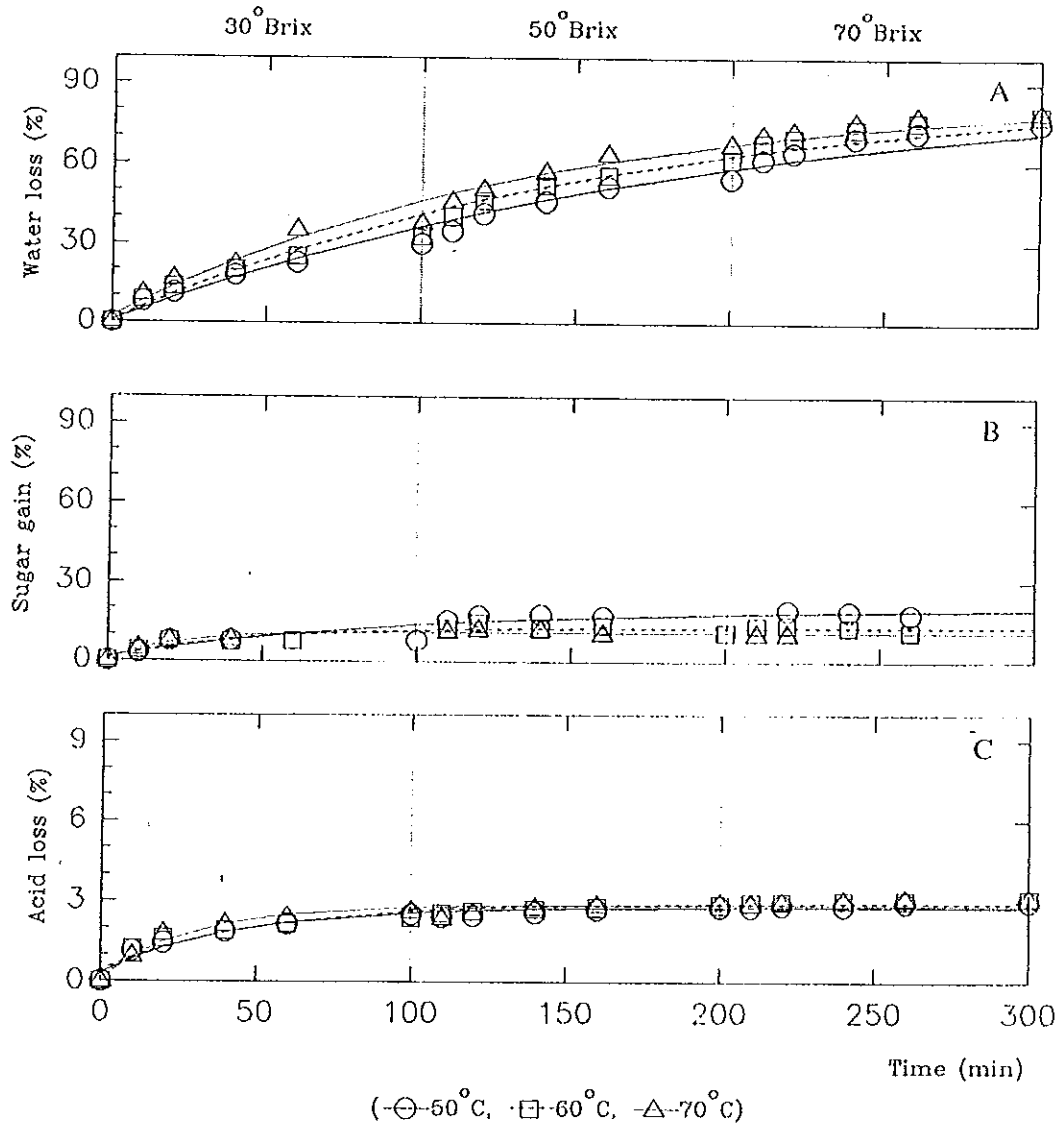
3.4 ผลของอุณหภูมิ

แช่มะม่วงในน้ำเชื่อมที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70°ซ ปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (แต่ละความเข้มข้นของน้ำเชื่อมใช้เวลา 100 นาที) ติดตามการเปลี่ยนแปลงการสูญเสีย น้ำ กรด การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของปริมาตร นำข้อมูลมาหาค่าอัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล กรด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร ได้ผลดังนี้

3.4.1 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการแพร่

จากผลการทดลอง (รูปที่ 29) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 ถึง 70°ซ ทำให้มีการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นมะม่วงสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ($p>0.05$) โดยมีการสูญเสียน้ำร้อยละ 75.21 78.48 และ 79.44 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°ซ ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นช่วยส่งเสริมแรงขับให้สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำมีการเคลื่อนที่มากขึ้นกว่าเดิม (จิราภรณ์ สอดจิตร์, 2535) และมีผลทำลายคุณสมบัติการคัดเลือกสารของเซลล์เมมเบรนจึงเกิดการถ่ายโอนมวลสารดีขึ้น (Liu, 1992) ในผลการทดลองนี้ไม่มีความแตกต่างของการสูญเสียน้ำเนื่องจากอุณหภูมิเพราะว่าก่อนการแช่มีมีการลวกชิ้นมะม่วงจึงทำให้เนื้อเยื่อยอมให้มีการซึมผ่านของสารเข้าออกจากเซลล์ได้ดีในช่วงการแช่มีทุกระดับอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างจากการทดลองของ Lenart และ Lewicki (1990) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมิผลต่อการสูญเสียน้ำพบว่าการแช่มีชิ้นแครอทที่อุณหภูมิ 70 และ 90°ซ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำสูงมากกว่าการแช่มีที่อุณหภูมิ 30 และ 50°ซ เนื่องจากชิ้นแครอทไม่ผ่านการลวกก่อนการแช่มีเนื้อเยื่อจึงยังคงมีคุณสมบัติในการคัดเลือกสารผ่านเข้าออกจึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำน้อยที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่ชิ้นมะม่วงพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไม่ทำให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงเพิ่มขึ้น โดยการแช่มีที่อุณหภูมิ 50°ซให้ค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลร้อยละ 13.99 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 (ร้อยละ 7.82) และ 70°ซ (ร้อยละ 7.79) เพียงเล็กน้อย ($p>0.05$) แม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจะช่วยให้โมเลกุลสารมีการเคลื่อนที่สูงขึ้นกว่าปกติแต่ในขณะเดียวกันก็มีผลทำให้สารเพคตินที่ผนังเซลล์เกิดการละลายอุดตันช่องว่างภายในเซลล์ ซึ่งไปขัดขวางการแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่ชิ้นมะม่วง จากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ Rahman และ Lamb (1990) ได้ทดลองแช่ชิ้นสับปะรดในน้ำเชื่อมเข้มข้น 30°บริกซ์ และปรับอุณหภูมิจาก 20 ถึง 65°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

พบว่าที่อุณหภูมิ 50°ซ ให้ค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสูงที่สุดและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับการแพร่ของกรดออกจากชิ้นมะม่วงให้ค่าการลดลงของกรดใกล้เคียงกันคือร้อยละ 3.01 3.10 และ 3.11 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°ซ ตามลำดับ



รูปที่ 29 ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำ (A) การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (B) และการลดลงของกรด (C) ในชิ้นมะม่วงที่แช่ในน้ำเชื่อมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70°บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200

จากผลการทดลอง (รูปที่ 30) พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50 ถึง 70°ซ ไม่ส่งผลทำให้อัตราการแพร่ของน้ำตาลลดลงอย่างเด่นชัด ในขณะที่อัตราการแพร่ของน้ำตาลลดลงมากที่สุดที่อุณหภูมิ 70°ซ เฉพาะช่วงต้นของการแช่ต้มเท่านั้น ส่วนช่วงหลังมีอัตราการแพร่คงที่เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เพคตินในผนังเซลล์ละลายหลุดและขัดขวางการแพร่เข้าของน้ำตาล ซึ่งให้ผลแตกต่างจากที่อุณหภูมิ 50°ซ แม้ว่าในช่วงต้นมีอัตราการแพร่ลดลงต่ำ แต่ในช่วงหลังอัตราการแพร่ยังสูงกว่าจึงเป็นผลทำให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงได้มากและมีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง (60 และ 70°ซ) ส่วนอัตราการแพร่ของกรดจะลดลงมากที่สุดที่อุณหภูมิ 70°ซ เฉพาะช่วงต้นของการแช่ต้ม แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการแพร่ของน้ำตาล และกรดมากกว่าน้ำ

เมื่อนำข้อมูลการสูญเสีย น้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการสูญเสียกรดจากชิ้นมะม่วงที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาวิเคราะห์การถดถอยได้สมการสัดส่วนการแพร่ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (30) และสามารถทำนายค่าการสูญเสีย น้ำและกรด การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่เวลาอนันต์ได้ดังตารางที่ 9

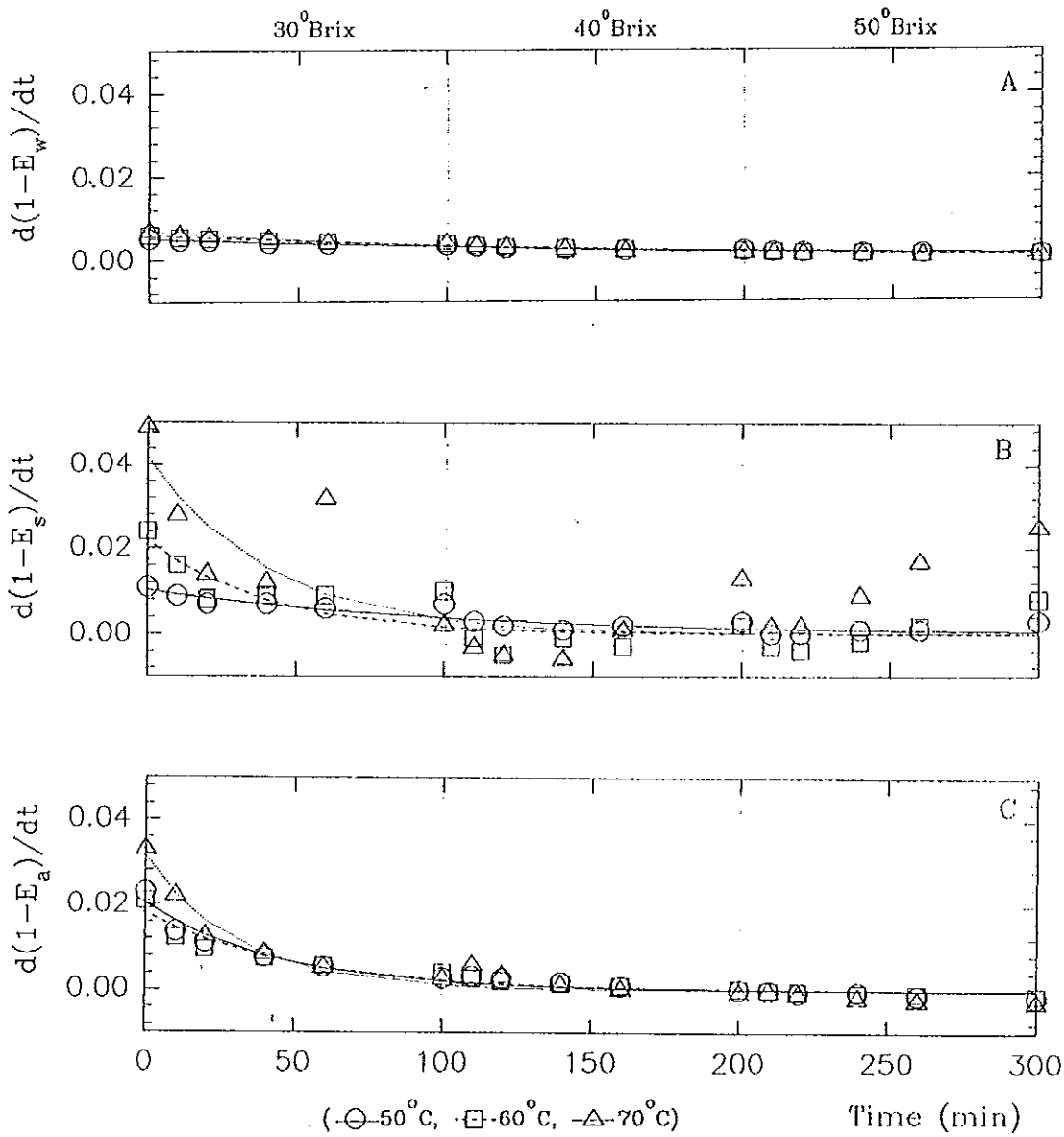
เมื่อพิจารณาสัดส่วนการแพร่ (รูปที่ 31) โดยดูจากความสามารถของสารเข้าสู่สมดุตามสมการที่ (30) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50 ถึง 70°ซ จะทำให้สัดส่วนการสูญเสีย น้ำสูงขึ้นแต่ไม่เด่นชัด โดยสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสูงมากที่อุณหภูมิ 60 และ 70°ซ เฉพาะช่วงต้นของการแช่ต้มเท่านั้น ส่วนช่วงหลังมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิ 50°ซ มีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นต่ำในช่วงแรก และยังคงมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เพคตินในผนังเซลล์ละลายหลุดและขัดขวางการแพร่เข้าของน้ำตาล ส่วนสัดส่วนการสูญเสียกรดสูงมากเฉพาะช่วงต้นของการแช่ต้ม เนื่องจากปริมาณกรดที่เหลือตกค้างในชิ้นมะม่วงมีปริมาณต่ำจึงเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น

ตารางที่ 9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า WL_{∞} SG_{∞} AL_{∞} C_1 และ B ที่พื้ได้ตามสมการที่ (30)

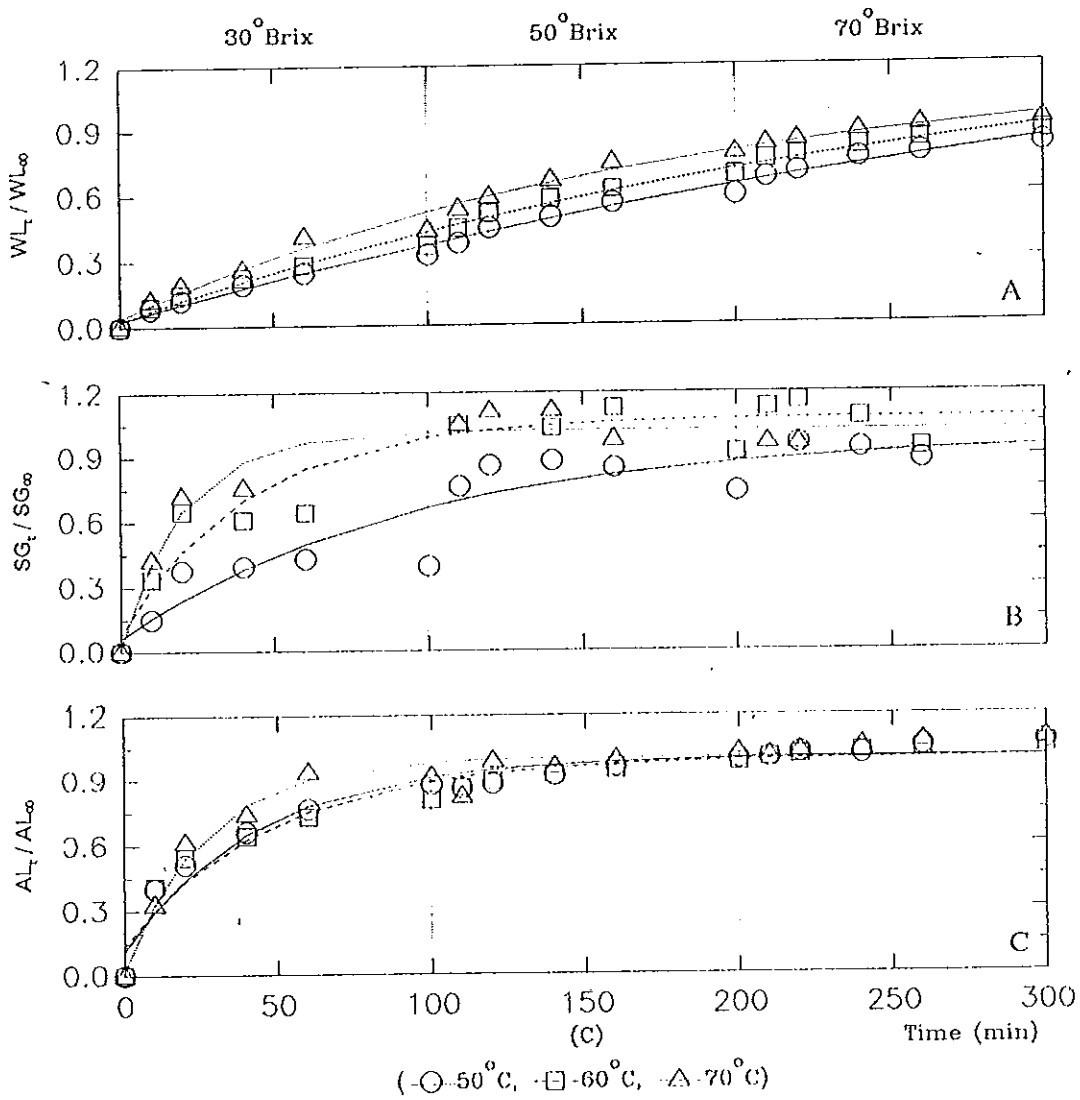
สมการ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	WL_f	WL_{∞}^*	SG_f	SG_{∞}^*	AG_f	AL_{∞}^*	B	C_1
การสูญเสียน้ำ	50	75.54	92.48	-	-	-	-	0.005	0.99
	60	78.48	90.33	-	-	-	-	0.006	0.99
	70	79.44	87.58	-	-	-	-	0.007	0.98
การเพิ่มขึ้นของ น้ำตาล	50	-	-	13.99	18.90	-	-	0.011	0.94
	60	-	-	7.82	11.90	-	-	0.024	0.93
	70	-	-	7.79	10.75	-	-	0.049	0.98
การสูญเสียกรด	50	-	-	-	-	3.01	2.80	0.023	0.89
	60	-	-	-	-	3.10	2.94	0.021	0.86
	70	-	-	-	-	3.11	2.87	0.033	0.95

หมายเหตุ : WL_f , SG_f , AL_f ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และปริมาณกรดลดลง ที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง

* เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการถดถอย ซึ่งไม่ใช่ค่าสุดท้ายที่เกิดจากการถ่ายโอนจริง



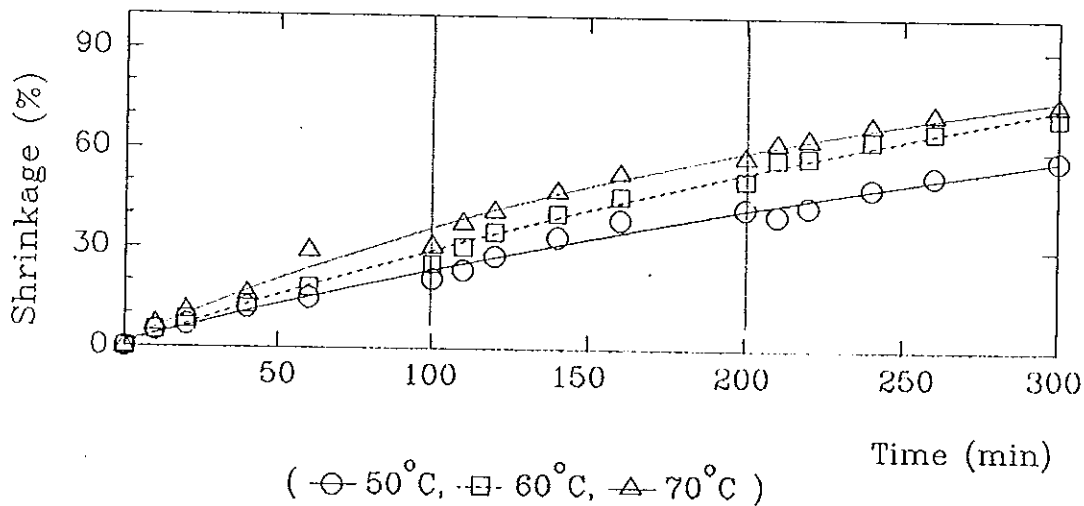
รูปที่ 30 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการแพร่ของน้ำ (A) น้ำตาล (B) และกรด (C) ในชั้นมะม่วงที่แช่้อมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200



รูปที่ 31 ผลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนการสูญเสียน้ำ (A) การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (B) และการลดลงของกรด (C) ในชั้นมะม่วงแช่จุ่มโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200

3.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อลักษณะเนื้อเยื่อผลไม้ โดยศึกษาจากการหดตัวของชิ้นมะม่วง (รูปที่ 32) พบว่าที่อุณหภูมิ 50 °ซ ให้ค่าการลดลงของปริมาตรร้อยละ 57.43 ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °ซ ร้อยละ 70.49 และ 73.95 ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การลดลงของปริมาตรเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำ โดยที่ระดับอุณหภูมิสูง (60 และ 70 °ซ) ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมากและในขณะเดียวกันการแพร่เข้าของน้ำตาลมีปริมาณน้อย จึงมีผลต่อรูปร่างของเซลล์เกิดการหดตัวมาก การลดลงของปริมาตรจึงมีค่าสูงมากกว่าที่อุณหภูมิ 50 °ซ



รูปที่ 32 ผลของอุณหภูมิต่อการหดตัวของในชิ้นมะม่วงที่แช่ต้มโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70 °บริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์์นัมเบอร์ 200

3.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่

สำหรับผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดแสดงดังตารางที่ 10 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดที่อุณหภูมิ 50°ซ มีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนช่วงหลังค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีแนวโน้มลดลงและไม่แตกต่างจากอุณหภูมิ 60 และ 70°ซ ($p > 0.05$) อันเนื่องมาจากผลของความหนาของชั้นมะม่วง ซึ่งที่อุณหภูมิ 50°ซ นั้นชั้นมะม่วงหดตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 60°ซ และ 70°ซ ทำให้เกิดการอุดตันในโครงสร้างของมะม่วงน้อยกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ปรากฏสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 70 ที่อุณหภูมิสูง (60 และ 70°ซ) จะส่งเสริมให้อัตราการแพร่ของน้ำสูงเฉพาะในช่วงต้นของการแช่ส้มเท่านั้นและช่วงหลังมีอัตราการแพร่ลดลงจึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่พิจารณาโดยเฉลี่ยทั้งระบบมีค่าลดลง จากผลอัตราการแพร่ของน้ำต่ำที่ระดับอุณหภูมิ 50°ซ จึงทำให้น้ำแพร่ออกจากชั้นมะม่วงในปริมาณน้อยเนื้อเยื่อมีการหดตัวต่ำทำให้น้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อได้มากขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิสูงจากผลของการแพร่ออกของน้ำจากชั้นมะม่วงอย่างรวดเร็วและมีปริมาณมากในช่วงต้นจึงทำให้น้ำเยื่อหดตัวอย่างรวดเร็วเช่นกัน น้ำตาลจึงแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงในปริมาณต่ำแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้เกิดการแพร่สูงขึ้นแต่แพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อมะม่วงได้ยากขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงยังมีผลต่อการสลายตัวของเพคตินและเป็นตัวขัดขวางการแพร่ของน้ำตาลในเนื้อเยื่อมะม่วงดังที่กล่าวแล้วในเบื้องต้น สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดมีผลเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ โดยมีค่าสูงมากเฉพาะช่วงแรกเท่านั้นเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ค้ำในชั้นมะม่วงเพียงเล็กน้อย

ในทางทฤษฎีแล้วสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Bird, et al., 1960) ในระดับโมเลกุลซึ่งก็คงใช้ได้ สำหรับในกรณีการแพร่ในมะม่วงถ้าไม่มีผลของการอุดตันในโครงสร้างเนื้อเยื่อเข้ามาเกี่ยวข้อง จากสมการถดถอย (34), (35) และ (36) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของเทอมที่เป็นอุณหภูมินั้นเป็นบวก แต่เนื่องจากผลของความหนา (การอุดตันในระดับโครงสร้าง) มีอิทธิพลมากกว่าจึงทำให้ดูเหมือนว่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 50°ซ ไปเป็น 70°ซ

ตารางที่ 10 ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ในการแช่ อิมมูมวงโดยปรับเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70 °บริกซ์ เป็น เวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200

ความเข้มข้น ของน้ำเชื่อม (°บริกซ์)	อุณหภูมิ (°ซ)	ครึ่งของ ความหนา ของมะม่วง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\times 10^{10}$ เมตร ² /วินาที)		
			น้ำ	น้ำตาล	กรด
30	50	0.0037	8.97 ^a	9.70 ^a	10.34 ^a
	60	0.0029	6.79 ^b	8.65 ^a	7.61 ^b
	70	0.0026	5.31 ^c	3.84 ^b	4.65 ^c
50	50	0.0024	5.80 ^b	2.90 ^b	4.25 ^{cd}
	60	0.0017	3.66 ^d	3.25 ^b	2.32 ^{de}
	70	0.0018	2.81 ^{de}	2.18 ^b	2.62 ^{de}
70	50	0.0018	1.88 ^{ef}	1.72 ^b	2.33 ^{de}
	60	0.0013	1.22 ^f	1.33 ^b	0.79 ^e
	70	0.0012	1.12 ^f	0.82 ^b	1.05 ^e

หมายเหตุ : ตัวอักษรเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อเยื่อ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การถดถอยจะได้ความสัมพันธ์ร่วมกันตามรูปที่ 33 ซึ่งอธิบายได้ดังสมการ (34) (35) และ (36)

$$D_w = -2.93 + 0.001 \times T + 3256.6 \times a \quad (R^2 = 0.95) \quad (34)$$

$$D_s = -5.46 + 0.025 \times T + 3583.7 \times a \quad (R^2 = 0.81) \quad (35)$$

$$D_a = -5.20 + 0.015 \times T + 3803.4 \times a \quad (R^2 = 0.95) \quad (36)$$

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อเยื่อ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การถดถอยจะได้รับความสัมพันธ์ร่วมกันตามรูปที่ 33 ซึ่งอธิบายได้ดังสมการ (34) (35) และ (36)

$$D_w = -2.93 + 0.001 \times T + 3256.6 \times a \quad (R^2 = 0.95) \quad (34)$$

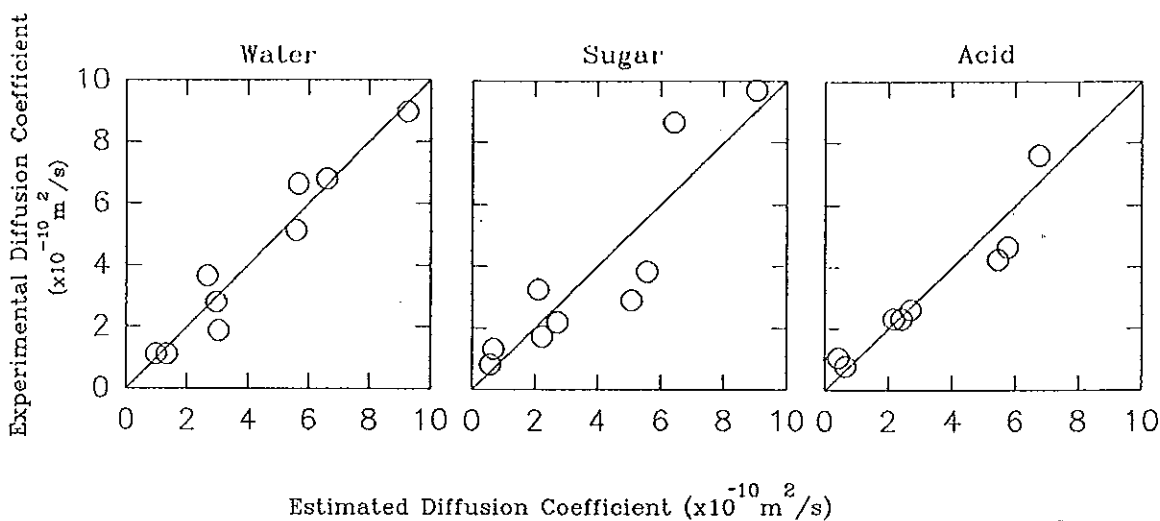
$$D_s = -5.46 + 0.025 \times T + 3583.7 \times a \quad (R^2 = 0.81) \quad (35)$$

$$D_a = -5.20 + 0.015 \times T + 3803.4 \times a \quad (R^2 = 0.95) \quad (36)$$

เมื่อ D_w , D_s , D_a = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (เมตร²/วินาที)

T = อุณหภูมิในการแช่zim (°ซ)

a = ครึ่งของความหนา (มิติที่แคบที่สุด) ของชั้นมะม่วง (เมตร)



รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากผลการทดลองกับจากการทำนายที่อุณหภูมิต่าง ๆ

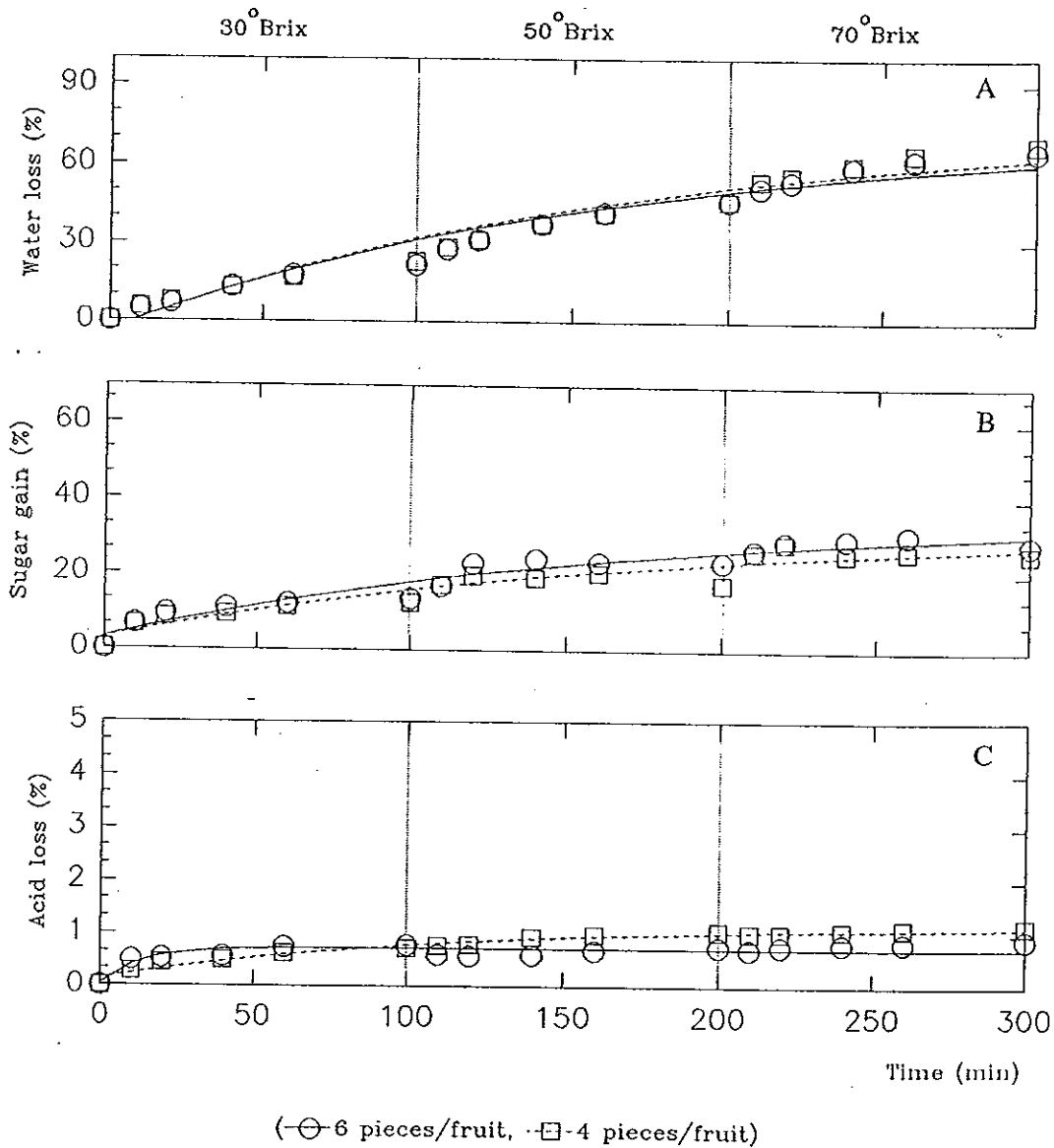
จากผลการทดลองพบว่าการใช้อุณหภูมิในการแช่zim ที่ 50°ซ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสภาพของเนื้อเยื่อมีอิทธิพลสูงต่อการถ่ายโอนมวลสาร โดยการสูญเสียน้ำจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการ

3.5 ผลของขนาดและรูปร่าง

จากการทดลองใช้ชิ้นมะม่วงรูปวงรี 2 ขนาดแตกต่างกันคือ ชิ้นเล็กหั่น 4 ชิ้นต่อผล โดยมีรูปทรงเทียบเท่าวงรี (ตามรูปที่ 12) ความยาวโดยเฉลี่ยด้าน a, b และ c เท่ากับ 0.6, 1.3 และ 2.5 เซนติเมตรตามลำดับ และหั่น 6 ชิ้นต่อผล มีความยาวโดยเฉลี่ยด้าน a, b และ c เท่ากับ 0.6, 0.8 และ 2.5 เซนติเมตรตามลำดับ แช่อยู่ในน้ำเชื่อมที่ปรับความเข้มข้นแบบ 30→50→70°บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ ในสภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำผลการทดลองมาหาอัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล กรด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล กรด ได้ผลดังนี้

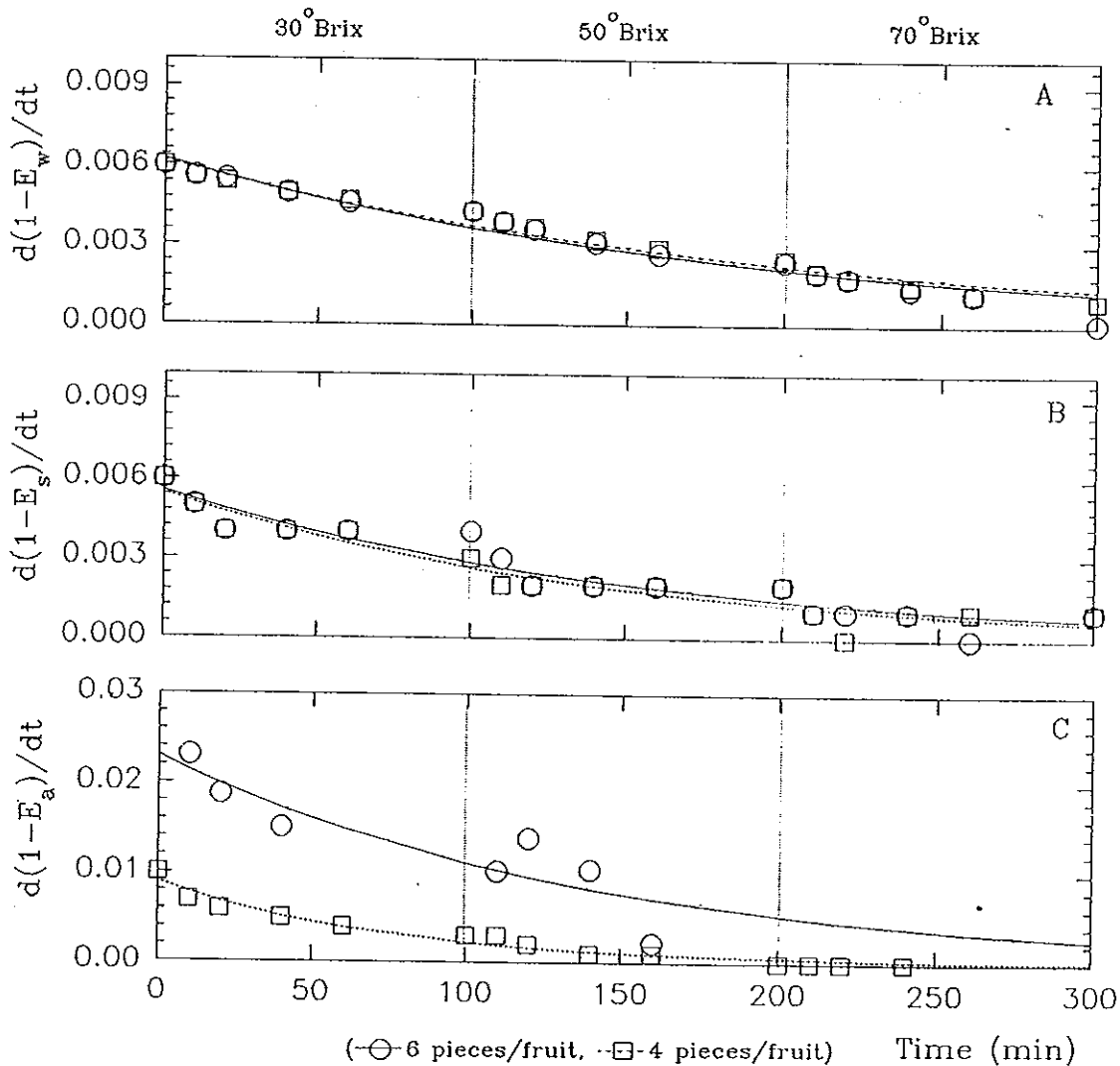
3.5.1 ผลของขนาดและรูปร่างต่ออัตราการแพร่

จากผลการทดลอง (รูปที่ 34) พบว่าเมื่อสิ้นสุดการแช่ชิ้นมะม่วงทั้งสองขนาดมีค่าการสูญเสีย น้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) เนื่องจากมะม่วงมีมิติที่แคบที่สุดคือความยาวด้าน a (ความหนา) ใกล้เคียงกัน และขนาดของชิ้นมะม่วงที่ใช้ในการทดลองมีขนาดแตกต่างกันไม่ชัดเจนจึงทำให้ลักษณะการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ไม่ต่างกัน ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Lericci และคณะ (1985) ได้แช่ชิ้นแอปเปิ้ลรูปทรงแตกต่างกันคือ รูปร่างเป็นแท่ง (strick) รูปร่างชิ้นบาง (slide) รูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) และรูปร่างเป็นแหวน (ring) ในไซรัฟเฟฟ (ประกอบด้วยกลูโคส ร้อยละ 52 ฟรุคโตส ร้อยละ 42 มอลโตสร้อยละ 3 และโพลีแซ็กคาไรด์ร้อยละ 3) ความเข้มข้น 70°บริกซ์ ในอัตราส่วนแอปเปิ้ลต่อไซรัฟ 1:5 ที่อุณหภูมิห้อง (20°ซ) พบว่ารูปร่างเป็นแหวนมีการสูญเสียน้ำสูงสุดในขณะรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีการสูญเสียน้ำลดลง เนื่องจากสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อครึ่งของความหนาของชิ้นผลไม่มีผลโดยตรงกับการถ่ายโอนมวลสาร เมื่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อครึ่งของความหนาของชิ้นผลไม่เพิ่มขึ้นค่าการสูญเสียน้ำลดลง ทำให้การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าสูงซึ่งพบในรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ นอกจากอาจเป็นผลจากลักษณะของเนื้อเยื่อผลไม้โดยแอปเปิ้ลมีโครงสร้างเป็นรูพรุนสูงจึงให้ผลของขนาดและรูปร่างต่อการถ่ายโอนมวลสารสูงกว่ามะม่วงที่มีเนื้อเยื่อค่อนข้างแน่นทึบ

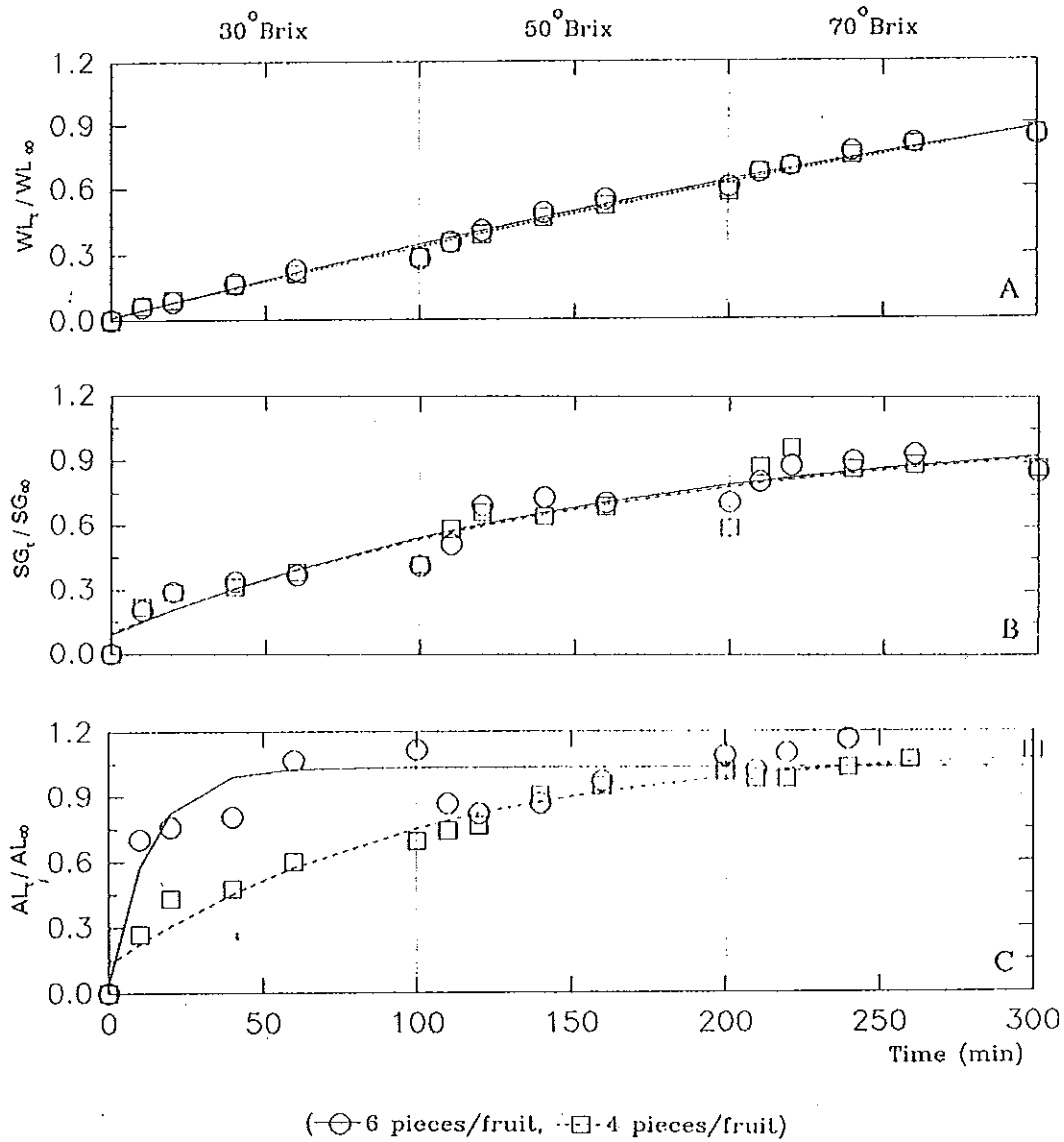


รูปที่ 34 ผลของขนาดต่อการสูญเสีย (A) การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (B) และการลดลงของกรด (C) ในชิ้นมะม่วงแช่อิ่มโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์์นัมเบอร์ 200

เมื่อนำผลของการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดมาหา อัตราการแพร่ตามรูปสมการที่ (29) และสัดส่วนการแพร่ตามสมการที่ (30) พบว่าขนาดของ ชิ้นมะม่วงไม่มีผลต่ออัตราการแพร่ (รูปที่ 35) และสัดส่วนการแพร่ (รูปที่ 36) จากสมการที่ (30) สามารถทำนายการถ่ายโอนมวลสารที่เวลาอนันต์ดังตารางที่ 11



รูปที่ 35 ผลของขนาดต่ออัตราการแพร่ของน้ำ (A) น้ำตาล (B) และกรด (C) ในชิ้น มะม่วงแช่จุ่มโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ที่ อุณหภูมิ 50° ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200



รูปที่ 36 ผลของขนาดต่อสัดส่วนการแพร่ของน้ำ (A) น้ำตาล (B) และกรด (C) ในชิ้นมะม่วงแช่ลิมโดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70° บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200

ตารางที่ 11 ผลของขนาดขึ้นที่มีต่อค่า WL_{∞} SG_{∞} AL_{∞} C_1 และ B ที่พื้ได้ตามสมการที่ (30)

สมการ	ขนาดหัน (จำนวนขึ้น/ผล)	WL_t	WL_{∞}	SG_t	SG_{∞}	AL_t	AL_{∞}	C_1	B
การสูญเสียน้ำ	6	64.95	73.19	-	-	-	-	1.05	0.006
	4	67.82	76.25	-	-	-	-	1.05	0.006
การเพิ่มขึ้น ของน้ำตาล	6	-	-	28.27	36.00	-	-	0.92	0.006
	4	-	-	25.85	32.62	-	-	0.91	0.006
การสูญเสียกรด	6	-	-	-	-	0.90	0.73	0.96	0.078
	4	-	-	-	-	1.15	1.20	0.87	0.010

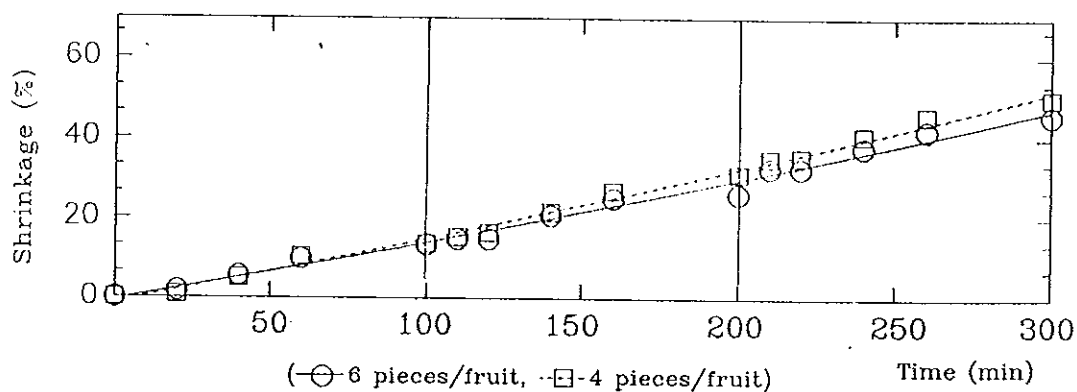
หมายเหตุ : WL, SG, AL ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และปริมาณกรดลดลง ที่เวลาสุดท้ายของการทดลอง

* เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการถดถอย ซึ่งไม่ใช่ค่าสุดท้ายที่เกิดจากการถ่ายโอนจริง

จากผลการทำนายในสมการที่ (30) พบว่าขนาดไม่มีผลต่อการถายโอนมวลสาร ถ้า มิติที่แคบที่สุดของชิ้นมะม่วงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่เวลานั้นทำให้ค่าการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรดใกล้เคียงกัน

3.5.2 ผลของขนาดและรูปร่างต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วง

จากผลของการเปลี่ยนแปลงมวลสารไม่ต่างกัน จะสอดคล้องกับผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งให้ผลไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) (รูปที่ 36) เนื่องจากรูปร่างของชิ้นมะม่วงที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นวงรีเหมือนกัน และมีขนาดแตกต่างกันไม่มาก โดยเฉพาะความหนาของชิ้นผลไม่มีขนาดเกือบเท่ากันจึงทำให้ผลของการสูญเสียน้ำไม่ต่างกัน (Lerici, et al., 1985)



รูปที่ 37 ผลของขนาดต่อการหดตัวของชิ้นมะม่วงแช่จุ่มโดยปรับความเข้มข้นของ น้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วย อัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์สันัมเบอร์ 200

3.5.3 ผลของขนาดและรูปร่างต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

จากผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่าขนาดของชั้นมะม่วงที่แตกต่างกันในการทดลองนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในทุกความเข้มข้นของน้ำเชื่อม โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล กรดมีค่าสูงมากในช่วงต้น (น้ำเชื่อม 30°บริกซ์) ของการเชื่อม และมีค่าลดลงเมื่อปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสูงขึ้น (50 และ 70°บริกซ์) จึงส่งผลให้อัตราการแพร่สูงมากในช่วงแรก และต่อมามีอัตราลดต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายภายในชั้นมะม่วงที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล กรดมีค่าใกล้เคียงกัน ($p > 0.05$) ในแต่ละความเข้มข้นของน้ำเชื่อม แสดงว่าน้ำ น้ำตาล และกรดสามารถแพร่ผ่านเนื้อเยื่อมะม่วงได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งในสภาวะปกติน้ำตาลจะแพร่ผ่านเนื้อเยื่อได้ต่ำเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ในการทดลองนี้ได้ลวกชั้นมะม่วงเบื้องต้นก่อนการเชื่อม และการใช้อุณหภูมิสูงในระหว่างการผลิตก็ช่วยส่งเสริมให้มีการแพร่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของชั้นมะม่วงลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Siripatana (1997) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงคือ ระบายด้านหนาของชั้นผลไม้ (a) การลดลงของความหนาเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำออกจากชั้นมะม่วงมากกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล ทำให้เนื้อเยื่อของชั้นมะม่วงเกิดการหดตัว

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบผลของขนาดต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ที่เชื่อมมะม่วงในน้ำเชื่อมด้วยอัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 50°ซ สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200

ความเข้มข้น ของน้ำเชื่อม (°บริกซ์)	ขนาดมะม่วง (จำนวนชิ้น/ผล)	ครึ่งของความหนา ของชั้นมะม่วง (เมตร)	สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\times 10^{10}$ เมตร ² /วินาที)		
			น้ำ	น้ำตาล	กรด
30	6	0.0041 ^a	11.48 ^{abA}	9.02 ^{aA}	11.93 ^{abA}
	4	0.0039 ^{ab}	11.94 ^{aA}	9.51 ^{aA}	12.49 ^{aA}
50	6	0.0036 ^{cd}	8.02 ^{cdA}	6.99 ^{abA}	11.14 ^{aA}
	4	0.0034 ^{cd}	9.02 ^{bcA}	7.09 ^{abA}	8.22 ^{abA}
70	6	0.0032 ^d	5.88 ^{da}	4.55 ^{ba}	3.64 ^{ba}
	4	0.0031 ^d	7.17 ^{cdA}	4.70 ^{ba}	4.70 ^{ba}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
($p > 0.05$)

ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่เหมือนกันในแถวเดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
($p > 0.05$)

เมื่อนำผลของสัมประสิทธิ์การแพร่มาหาการถดถอยร่วมกับความหนาของชั้นมะม่วง ได้ความสัมพันธ์ (รูปที่ 38) เส้นซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (37) (38) และ (39)

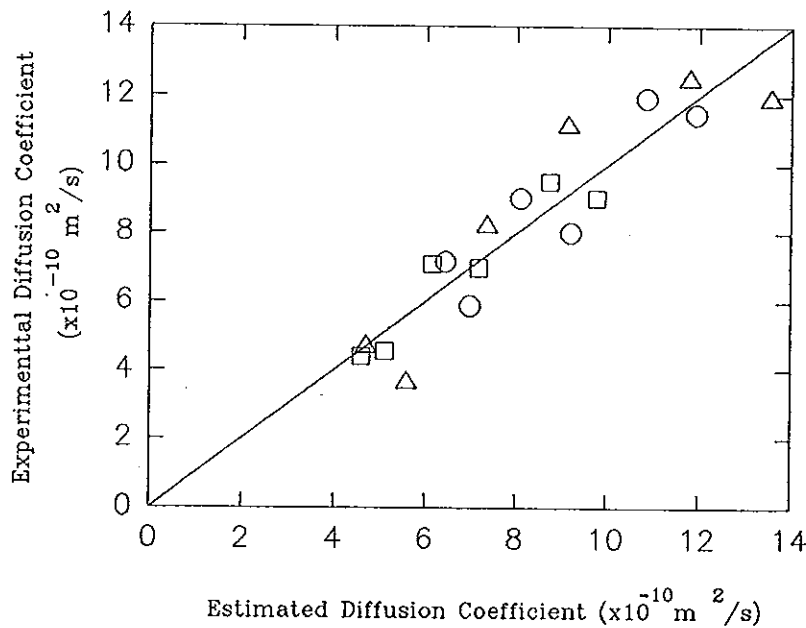
$$D_w = -10.58 + 5492.20 a \quad (R^2 = 0.81) \quad (37)$$

$$D_s = -11.43 + 5170.90 a \quad (R^2 = 0.89) \quad (38)$$

$$D_a = -22.77 + 8861.80 a \quad (R^2 = 0.84) \quad (39)$$

เมื่อ D_w, D_s, D_a = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด (เมตร²/วินาที)

a = ครึ่งของความหนาของชั้นมะม่วง (เมตร)



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (o) น้ำตาล (□) และกรด (Δ) จากผลการทดลองกับค่าจากการทำนายที่ขนาดความหนาแตกต่างกัน โดยปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70°บริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50°ซ ด้วยอัตราส่วนมะม่วงต่อน้ำเชื่อม 1:3 ที่สภาวะเรโนลด์นัมเบอร์ 200

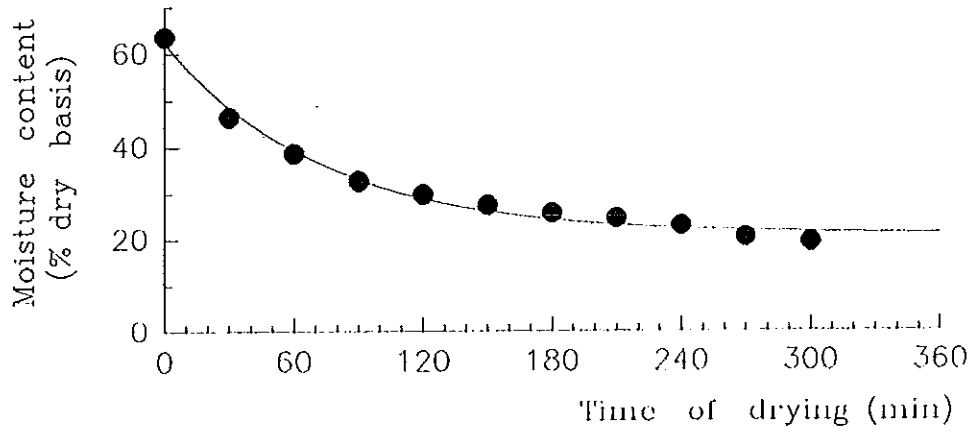
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของชิ้นมะม่วงที่แบ่งตามจำนวนชิ้นต่อผล ให้ค่าการถ่ายโอนมวลสาร และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรไม่ต่างกัน เนื่องจากรูปร่างของชิ้นผลไม้ที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปทรงวงรีเหมือนกัน และมีขนาดแตกต่างกันไม่ชัดเจน ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Monsalve-Gonzalez และคณะ (1993) พบว่ารูปร่างและขนาดของชิ้นผลไม้ ผลต่อการถ่ายโอนมวลสาร โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้สูงน้ำจะซึมออกได้เร็ว ในขณะที่ผลไม้ชิ้นใหญ่หรือมีรูปร่างกลมน้ำจะซึมออกได้น้อย เพราะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ (ฮอนรวี รัตนาพันธุ์, 2533) ดังนั้นจึงใช้ชิ้นมะม่วงที่หั่น 4 ชิ้นต่อผลเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการตัดแต่ง

4. ศึกษาสภาวะการอบแห้งของมะม่วงแช่แข็ง

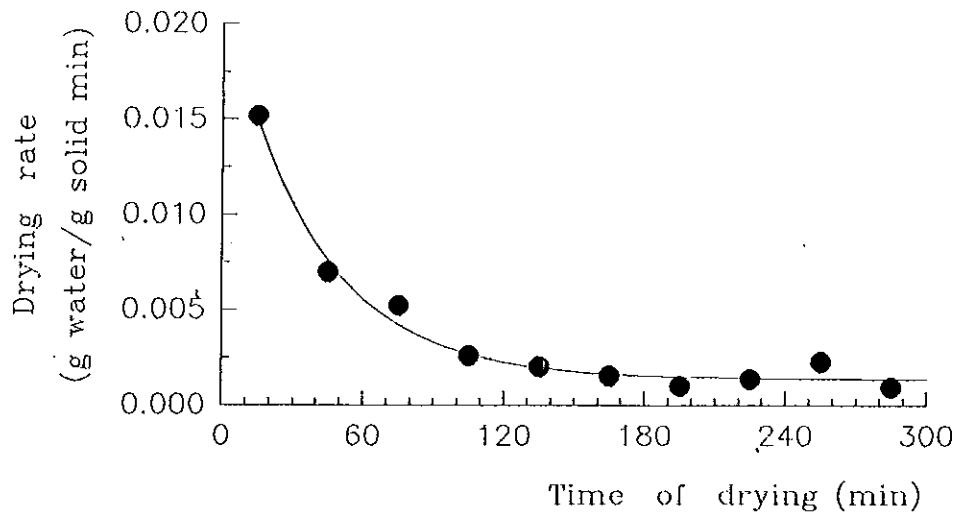
4.1 อัตราการอบแห้ง

จากการศึกษาผลการอบแห้งมะม่วงที่ผ่านการแช่แข็ง โดยปรับน้ำเชื่อมแบบ 30→50 →70°บrix ที่อุณหภูมิ 50°ซ กวนด้วยความเร็ว 118 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งมีความชื้นร้อยละ 63.51 (มาตรฐานแห้ง) แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°ซ ความเร็วลมร้อน 1.03 เมตรต่อวินาที ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกร้อยละ 30 ใช้เวลาและพลังงานในการอบแห้ง 5 ชั่วโมง และ 6.4 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงตามลำดับ พบว่า (รูปที่ 39) ในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำหรือความชื้นที่บริเวณผิวหนัง ซึ่งลมร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำโดยตรง และน้ำที่ระเหยออกมาก็จะถูกพัดพาออกจากผิวหนังไปเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไปการระเหยของน้ำจะลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงที่ 4 ถึง 5 เพราะน้ำที่อยู่ผิวหนังได้ระเหยหมดไปแล้ว เหลือแต่น้ำที่อยู่ภายในชั้นมะม่วง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของน้ำเกิดขึ้นภายในชั้นมะม่วง ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในชั้นมะม่วงมายังผิวช้ากว่าการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวมะม่วงไปยังอากาศ จึงทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

สำหรับอัตราการอบแห้ง (รูปที่ 40) พบว่าอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ และจากการสังเกตเส้นโค้งของอัตราการอบแห้งพบว่าไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คงมีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ ศิวะ อัจฉริยะวิริยะ และ สมชาติ ไสภณรณฤทธิ (2531) ได้ศึกษาการอบแห้งมะละกอแช่แข็ง และ จิราภรณ์ สอดจิตร์ (2536) ศึกษาการอบแห้งสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิส แสดงว่าในการอบแห้งมะม่วงแช่แข็งมีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ (Critical moisture content) คือ ความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) จนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง

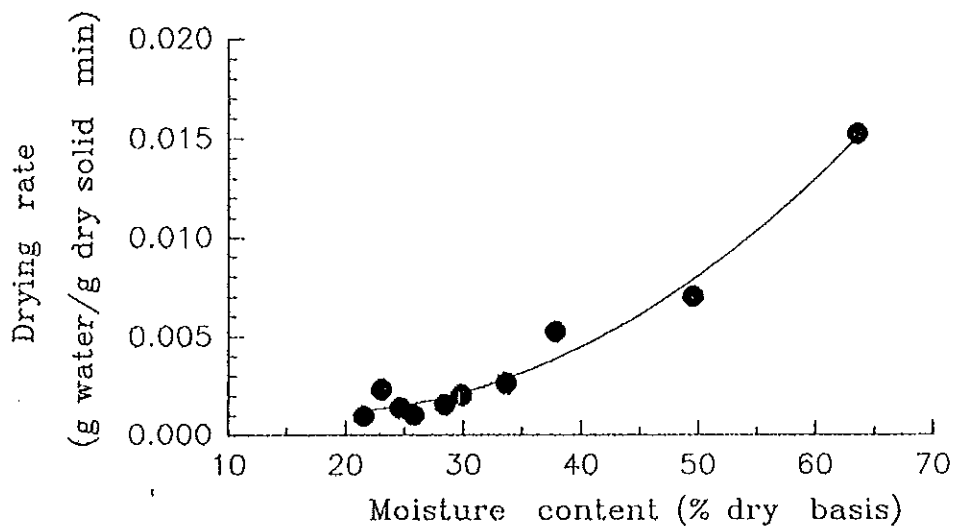


รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมะม่วงที่ผ่านการแช่ส้มโดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70°บริกซ์ กับเวลาเมื่อใช้อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งของมะม่วงที่ผ่านการแช่ส้ม โดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30→50→70°บริกซ์ กับเวลา เมื่อใช้ อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งลดลงเมื่อความชื้นของชิ้นมะม่วงมีค่าลดลง (รูปที่ 41) ซึ่งอธิบายได้ว่า การอบแห้งที่สภาวะเริ่มต้นความชื้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในชิ้นมะม่วง ความแตกต่างของความดันไอของน้ำที่ผิวชิ้นมะม่วงกับความดันไอของน้ำในบรรยากาศมีค่าสูงสุด ทำให้เกิดแรงขับของการแพร่สูงสุด เมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นในชิ้นมะม่วงมีปริมาณลดลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในชิ้นมะม่วงมีความดันไอเท่ากับความดันไอของบรรยากาศรอบ ๆ จึงทำให้อัตราการอบแห้งลดลง

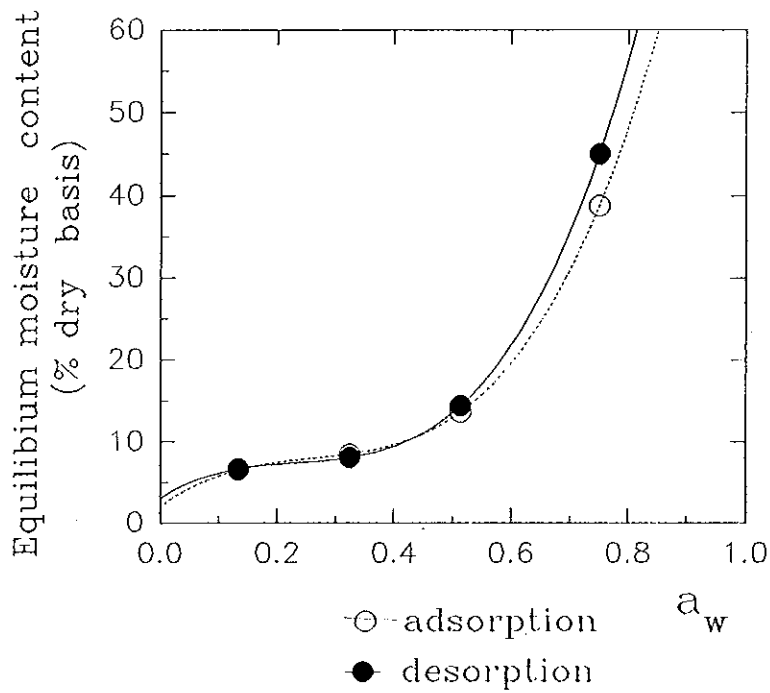


รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นในชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่หิม โดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบ 30→50→70 °บริกซ์ กับเวลา เมื่อใช้อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

4.2 การหาความชื้นสมดุล

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลเพื่อหาซอร์พชันไอโซเทอม (Sorption isotherm) ของมะม่วงแช่อิ่มแบบการดูดความชื้น (adsorption) และการคายความชื้น (desorption) ที่อุณหภูมิคงที่ 30°ซ โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นสารควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศระหว่างร้อยละ 10 - 90 การศึกษาซอร์พชันไอโซเทอมของอาหารมีประโยชน์ในการทำนายสภาวะการอบแห้ง การบรรจุ และการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Isse, et al., 1992) สำหรับในการทดลองนี้พิจารณาเฉพาะการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ โดยเลือกความชื้นที่ให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้อยที่สุด จากผลการทดลอง (รูปที่ 42) พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูง ๆ มีการเพิ่มขึ้นของความชื้นสมดุลอย่างรวดเร็วเนื่องจากมะม่วงแช่อิ่มมีน้ำตาลสูงมาก ดังนั้นผลึก น้ำตาลจะดูดความชื้นไว้มาก (สมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์, 2535) และในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ เส้นไอโซเทอมของการดูดความชื้น (adsorption isotherm) และการคายความชื้น (desorption isotherm) ซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกัน แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเส้นไอโซเทอมการคายความชื้นสูงมากกว่าการดูดความชื้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) จากเส้นซอร์พชันไอโซเทอม(รูปที่ 42) พบว่าเมื่อผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นร้อยละ 19.39 (มาตรฐานแห้ง) การดูดความชื้น (adsorption isotherm) มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.60 ซึ่งที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีดังกล่าวมีโอกาสเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์น้อยมาก แต่ยีสต์ซึ่งชอบเจริญในที่ ๆ มีน้ำตาลสูง (Osmophilic yeast) และราซึ่งชอบเจริญในที่แห้ง (Xerophilic fungi) จะสามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีนี้ แต่ถ้าลดค่าวอเตอร์แอกติวิตีให้ต่ำกว่านี้จะทำให้มะม่วงมีเนื้อสัมผัสเหนียว และแข็ง ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นในการรักษาผลิตภัณฑ์ให้ได้นาน อาจเก็บผลิตภัณฑ์นี้ในสภาพสุญญากาศและออกซิเจนซึมผ่านไม่ได้ หรืออาจใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการลดปริมาณเชื้อยีสต์และเชื้อรา เช่นกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) โพแทสเซียมซอร์เบท (Potassium sorbate) และกรดซอร์บิก (Sorbic acid) เป็นต้น (ไพโรจน์ วิริยจारी, 2539) นอกจากนี้ยังพบที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.60 -0.70 มีโอกาสเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีคือ การเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ซึ่งสามารถเกิดได้ดีในช่วงในอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (Erickson, 1982) สำหรับในการทดลองนี้ได้มีการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ดังนั้นการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อ

การเสื่อมเสียของอาหารและ คุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้วค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ที่เหมาะสม ในการเก็บรักษาควรมีค่า 0.60 ความชื้นไม่เกินร้อยละ 19 มาตรฐานแห้ง) ซึ่งไม่เกินข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรมผลไม้แห้ง (มอก., 2532)

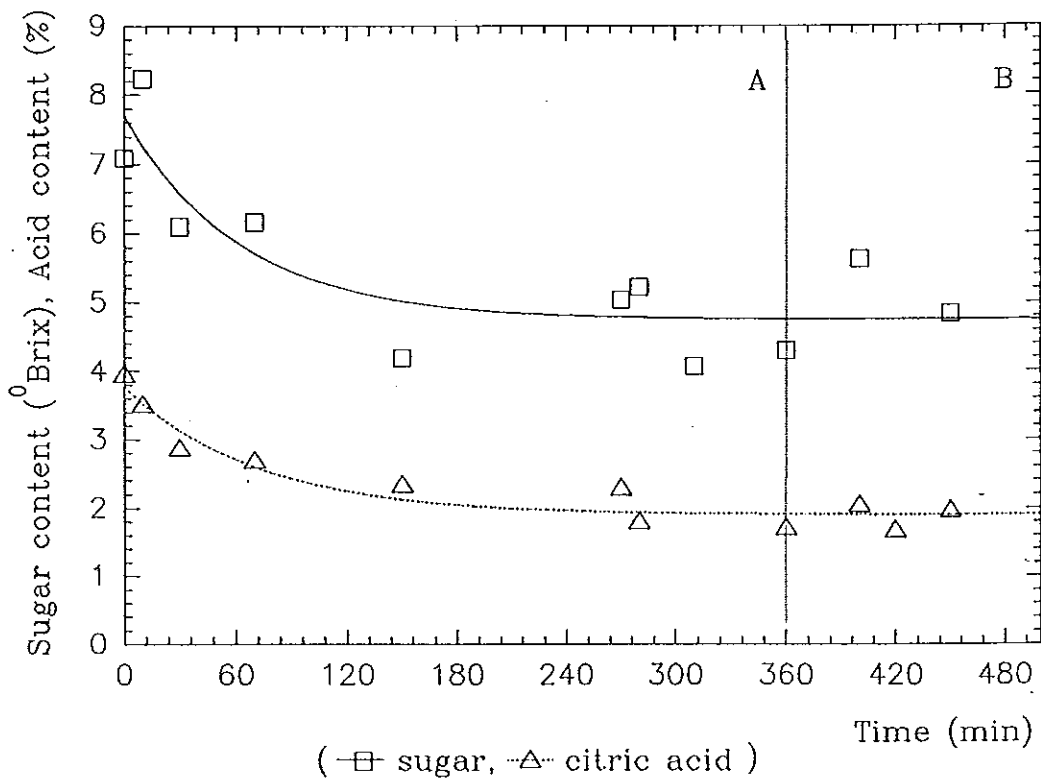


รูปที่ 42 ซอร์พชันไอโซเทอมของมะม่วงแช่แข็งแห้ง จากการทดลองที่ 30°C

5. การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า และแบบที่พัฒนา

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงมวลสารในระหว่างการผลิตและเปรียบเทียบกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า และแบบที่พัฒนา

5.1 ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารของชิ้นมะม่วงในขั้นตอนการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่อิ่ม จากผลการทดลอง (รูปที่ 43) พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลและกรดลดลงมากในช่วงการแช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 กับ แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.7 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลและรักษาลักษณะเนื้อสัมผัส โดยความเข้มข้นของน้ำตาลและกรดในวัตถุดิบเริ่มต้นลดลงจาก 7.09° บrix เหลือ 4.76° บrix และกรดลดลงจากร้อยละ 3.77 เหลือปริมาณร้อยละ 1.91 จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อปรับปรุงรสชาติโดยลดความเปรี้ยวของผลไม้ลง (ฉลองชัย จันทร์เพ็ญ, 2532) และนำไปลวกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อให้เนื้อเยื่อยอมให้มีการซึมผ่านของสารเข้าออกจากเนื้อเยื่อได้ดี (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527 ; สุวิช ศิริวัฒนโยธิน, 2530) สำหรับในการทดลองนี้พบว่าขณะแช่สารละลายเกลือ ความเข้มข้นของกรดลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อาจตัดขั้นตอนการแช่เกลือเพื่อลดความเปรี้ยวของมะม่วงลง เนื่องจากความเข้มข้นของกรดลดลงมากแล้วก่อนการแช่สารละลายเกลือ



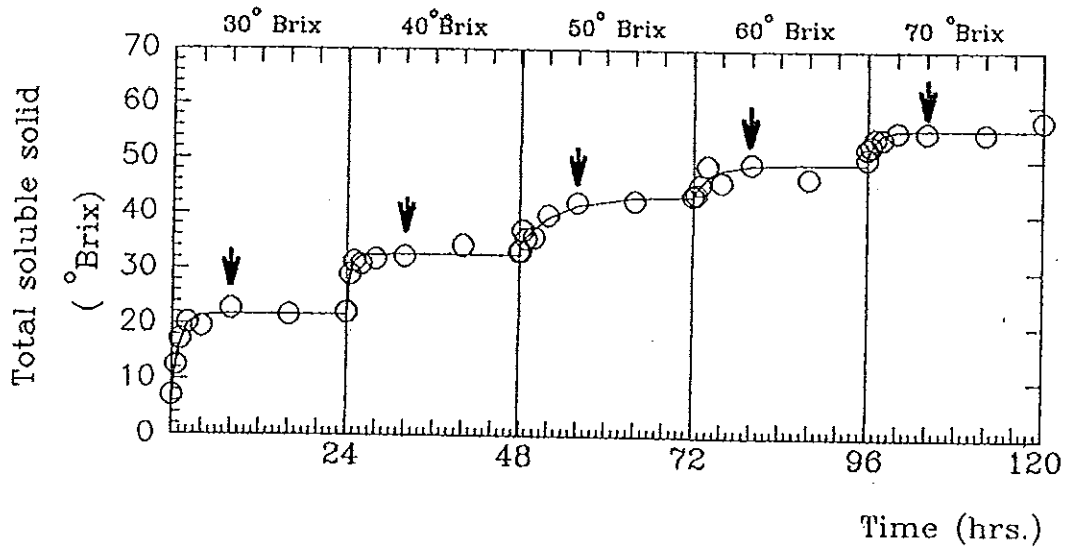
รูปที่ 43 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลและกรดในซึ้นมะม่วง ระหว่างแช่ในสารละลายผสมไซเดียมเมตาไบซัลไฟต์กับแคลเซียมคลอไรด์ (A) และแช่ในสารละลายเกลือ (B) ที่เวลาต่าง ๆ

5.2 การแช่

5.2.1 การหาระยะเวลาของการแช่ในกระบวนการผลิตมะม่วงแช่แบบซ้า

เพื่อกำหนดจุดยุติในการแช่ซึ้นมะม่วงในสารละลายน้ำตาล โดยนำซึ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมภายใต้สภาวะในข้อ 5.1 แช่ในสารละลายน้ำตาลที่มีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเป็นขั้นแบบ 30→40→50→60→70°บริกซ์ ความเข้มข้นละ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของแต่ละขั้นการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อม และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังการแช่เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ไม่เกินร้อยละ 7 (รูปที่ 44) ในทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในช่วงการแช่ทั้งหมดใช้เวลาประมาณ 40 ชั่วโมง (1 - 2 วัน) ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ทั้งหมด

ไปเป็นเวลา 6 - 7 วัน (ธนวรรณ บุญปั้น, 2537) จึงใช้เวลาดังกล่าวในกระบวนการแช่ส้มแบบซ้ำสำหรับการทดลองต่อไป

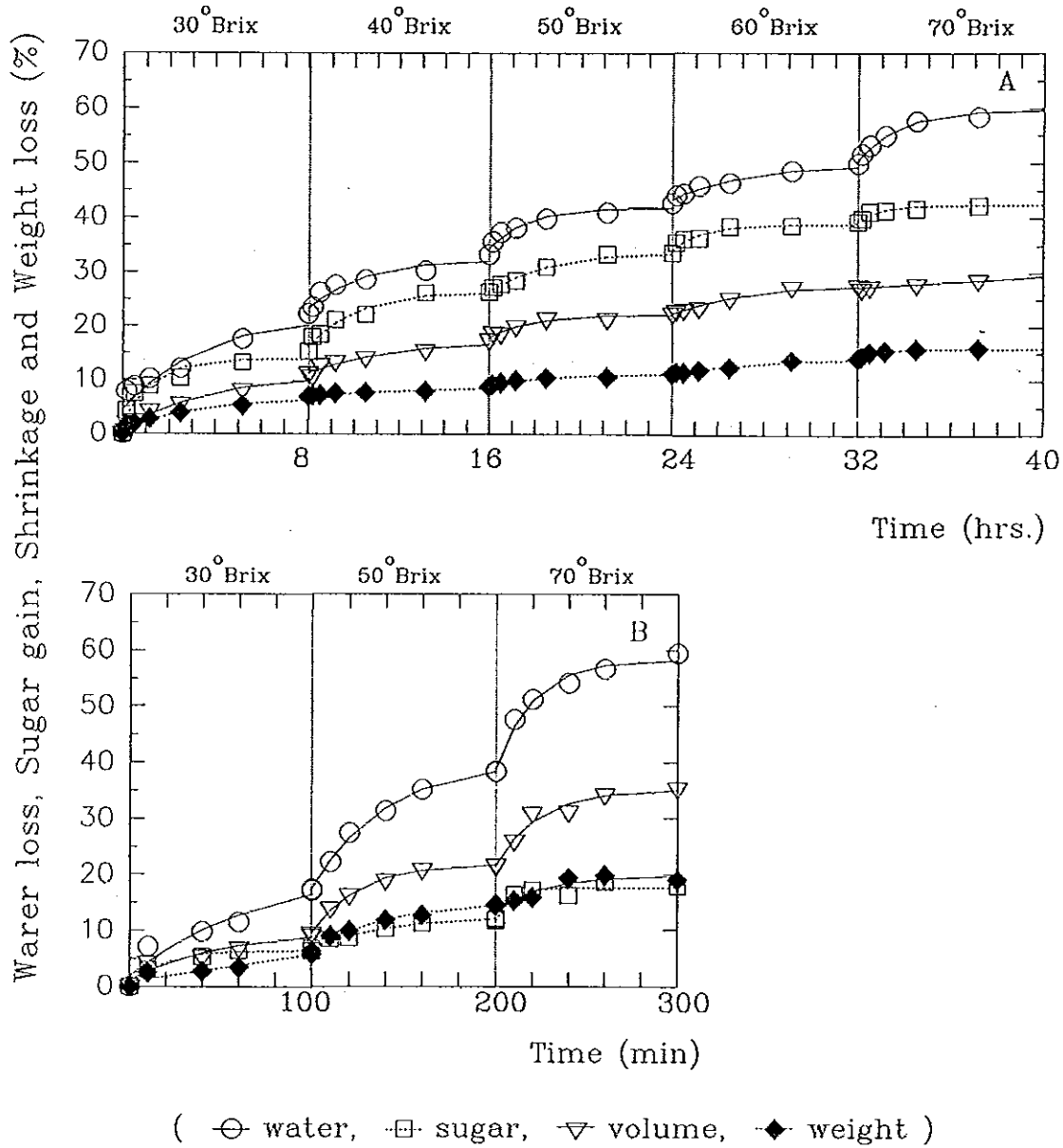


รูปที่ 44 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดภายในชั้นมะม่วง ระหว่างการแช่ส้มในน้ำเชื่อมที่มีการปรับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 30 → 40 → 50 → 60 → 70° บริกซ์

5.2.2 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงมวลสารในขึ้นมะม่วง ระหว่างวิธีการแช่อิ่มแบบ ช้าและแบบพัฒนา

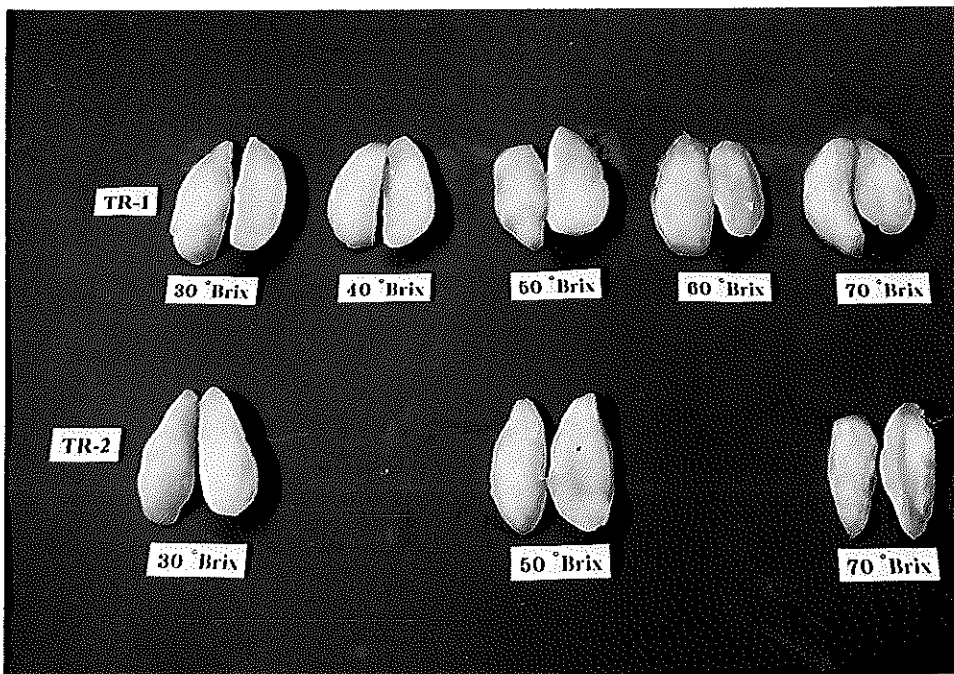
นำขึ้นมะม่วงที่ผ่านการเตรียมภายใต้สภาวะตามข้อ 5.1 มาแช่อิ่มในสารละลายซูโครสโดยทำการเปรียบเทียบการผลิต 2 วิธี คือการแช่อิ่มแบบช้า ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตตามข้อ 5.2.1 เป็นเวลา 40 ชั่วโมง และการแช่อิ่มแบบที่ได้พัฒนาขึ้น โดยแช่อิ่มในน้ำเชื่อมที่มีการปรับเพิ่มความเข้มข้นแบบ 30→50→70 °บrix ที่อุณหภูมิ 50 °ซ และกวนด้วยความเร็ว 118 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการแช่อิ่มพบว่า (รูปที่ 45) การแช่อิ่มแบบช้าให้ค่าการสูญเสียน้ำร้อยละ 59.49 ซึ่งไม่แตกต่างจากการแช่อิ่มแบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าร้อยละ 59.48 ($p>0.05$) โดยลักษณะการสูญเสียน้ำออกจากขึ้นมะม่วงของวิธีการแช่อิ่มแบบช้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทีละนิดเป็นลำดับขั้นและมีค่าสูงมากเมื่อใช้เวลานานขึ้น ในขณะที่การแช่อิ่มแบบพัฒนาขึ้นให้ค่าการสูญเสียน้ำสูงมากในช่วงเวลาสั้นกว่า เนื่องจากในสภาวะการแช่อิ่มแบบพัฒนามีการใช้อุณหภูมิสูง (50 °ซ) มีการกวนในระหว่างการแช่อิ่มและการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่สูงมากกว่า (เพิ่มขึ้นละ 20 °บrix) ทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ภายในขึ้นมะม่วงกับน้ำเชื่อมสูงกว่าการแช่อิ่มแบบช้า จากปัจจัยดังกล่าวช่วยส่งเสริมทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (driving force) สูงจึงเกิดการแพร่ของน้ำออกจากขึ้นมะม่วงในปริมาณมากอย่างรวดเร็ว

สำหรับการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลพบว่ามะม่วงที่แช่อิ่มแบบพัฒนาขึ้นให้ค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลต่ำกว่าการแช่อิ่มแบบช้า ($p<0.05$) ซึ่งมีค่าเพียงร้อยละ 17.96 ส่วนการแช่อิ่มแบบช้ามีค่าสูงถึงร้อยละ 42.58 เนื่องจากการแช่อิ่มแบบพัฒนาทำให้มีการสูญเสียน้ำมากอย่างรวดเร็ว ทำให้ช่องว่างภายในเซลล์ผลไม้มีการหดตัวลงจึงทำให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อได้ยาก และใช้เวลาสั้นในการแช่อิ่มจึงทำให้น้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่ขึ้นมะม่วงได้น้อย ซึ่งแตกต่างจากการแช่อิ่มแบบช้าที่น้ำแพร่ออกทีละนิดโครงสร้างของเนื้อเยื่อเกิดการหดตัวน้อยทำให้น้ำตาลมีโอกาสแพร่เข้าสู่ขึ้นมะม่วงได้มากขึ้น ดังนั้นเพื่อส่งเสริมให้มีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในขึ้นมะม่วงมากขึ้นในการแช่อิ่มแบบพัฒนา จึงควรลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 50 °ซ แต่ไม่ควรต่ำกว่า 30 °ซ เพื่อลดอัตราการแพร่ของน้ำออกจากขึ้นมะม่วงลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่เป็นอุปสรรคต่อการแพร่เข้าของน้ำตาล



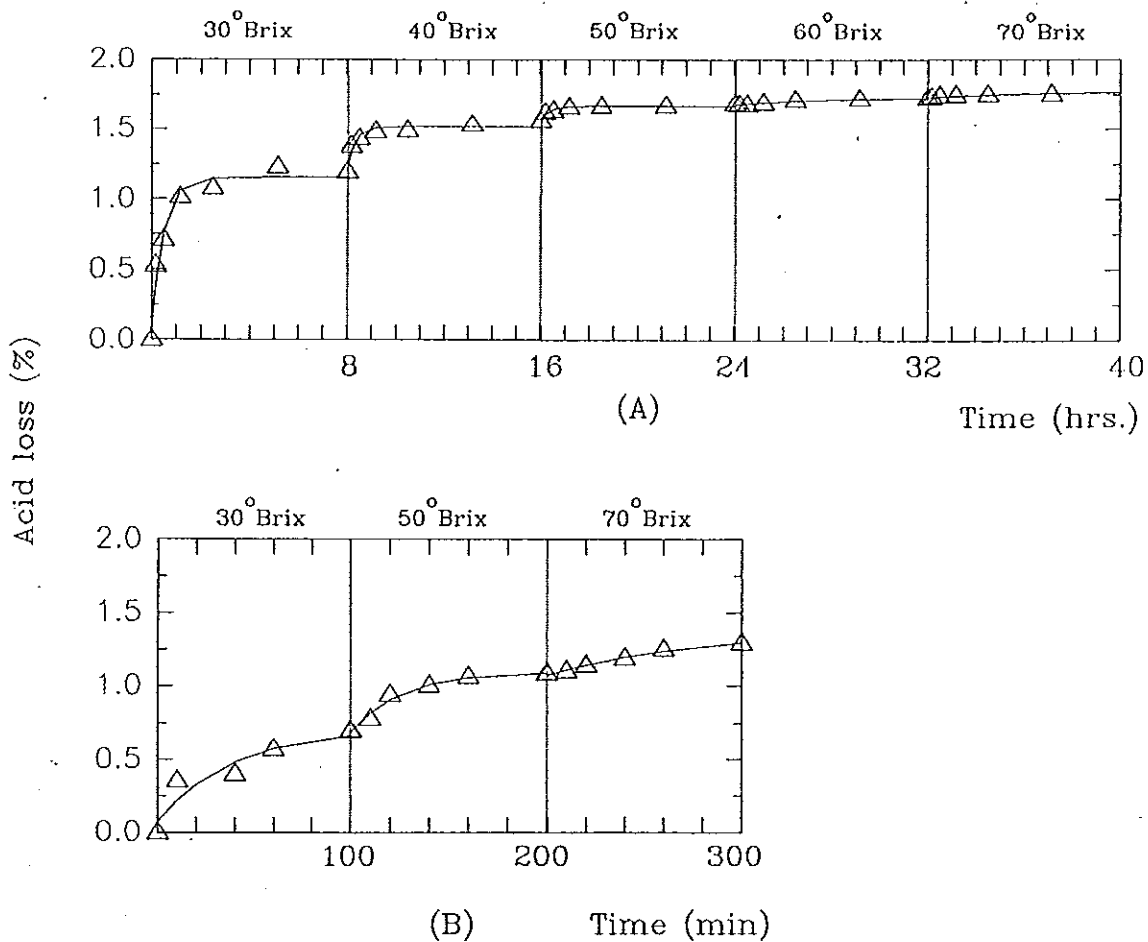
รูปที่ 45 การเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล การหดตัว และการสูญเสียน้ำหนัก ของมะม่วงแช่อิ่มแบบซ้า (A) และแบบพัฒนา (B)

เมื่อพิจารณาการลดลงของปริมาตร (รูปที่ 45) เพื่อให้อธิบายลักษณะปรากฏที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการแช่ต้มพบว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มแบบพัฒนาขึ้นมีการหดตัวของชิ้นมะม่วงถึงร้อยละ 35.28 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มแบบซ้ามีค่าร้อยละ 30.05 เนื่องจากการแช่ต้มแบบพัฒนามีการสูญเสียน้ำสูงมาก ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้ชิ้นมะม่วงมีลักษณะเหี่ยวยุบมากหลังการแช่ต้ม (รูปที่ 46) ส่วนมะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มแบบซ้าแม้จะมีการสูญเสียน้ำไม่ต่างไปจากการแช่ต้มแบบพัฒนา แต่มีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมากจึงทำให้ปริมาตรของมะม่วงลดลงน้อยกว่า เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏของชิ้นมะม่วงพบว่าลักษณะเหี่ยวยุบเกิดขึ้นน้อยกว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มแบบพัฒนา นอกจากนี้ยังพบว่ามะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มแบบซ้ามีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 16.51 น้อยกว่าการแช่ต้มแบบพัฒนามีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 23.76 ($p < 0.05$) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการหดตัวของชิ้นมะม่วง โดยการแช่ต้มแบบซ้ามีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นมะม่วงสูงมากกว่าจึงส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่า



รูปที่ 46 การเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของชิ้นมะม่วงหลังการแช่ต้มในแต่ละชั้นของการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแช่ต้มแบบซ้า (TR-1) และแบบพัฒนา (TR-2)

การลดลงของกรด (รูปที่ 47) พบว่าการแช่ส้มแบบซ้ามีค่าร้อยละ 1.77 สูงกว่าการแช่ส้มแบบพัฒนาเพียงเล็กน้อย ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าร้อยละ 1.29 ซึ่งการแช่ส้มมะม่วงเป็นเวลานาน และถ้ามีปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารมากก็เป็นผลทำให้มีการสูญเสียกรดมากขึ้น โดยการลดลงของกรดมีผลกระทบต่อรสชาติของผลิตภัณฑ์ทำให้ความเปรี้ยวลดลง



รูปที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของกรดในชิ้นมะม่วงที่ผ่านการแช่ส้มแบบซ้า (A) และการแช่ส้มแบบพัฒนา (B)

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 13) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ของมะม่วงแช่อิ่มแบบพัฒนามีค่าสูงมากกว่ามะม่วงแช่อิ่มแบบชา (p<0.05) เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในแช่อิ่มแบบพัฒนามีปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารผ่านเนื้อเยื่อมะม่วงได้ดีกว่าการแช่อิ่มแบบชาดังเหตุผลที่กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นการถ่ายโอนมวลของน้ำ น้ำตาล และกรดในกระบวนการแช่อิ่มแบบพัฒนาจึงสูงมากกว่าในกระบวนการแช่อิ่มแบบชา

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ของมะม่วงในกระบวนการแช่อิ่มแบบชาและแบบพัฒนา

การแช่อิ่ม	ความเข้มข้น ของน้ำเชื่อม (°บrix)	สัมประสิทธิ์การแพร่ ($\times 10^{10}$ เมตร ² /วินาที)		
		น้ำ	น้ำตาล	กรด
แบบชา	30	3.92 ^c	3.53 ^{cd}	4.69 ^c
	40	3.64 ^c	3.34 ^{bc}	3.74 ^{cd}
	50	3.17 ^{de}	3.16 ^{de}	2.55 ^{cd}
	60	2.47 ^{de}	2.08 ^{de}	1.89 ^{cd}
	70	1.69 ^e	1.23 ^e	0.83 ^d
แบบพัฒนา	30	11.94 ^a	9.51 ^a	12.49 ^a
	50	9.03 ^b	7.09 ^b	8.22 ^b
	70	7.17 ^c	4.70 ^c	4.70 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05)

5.3 ตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงแช่อิ่มแห้งทั้งสองกระบวนการ (ตารางที่ 14) พบว่ามีความชื้นใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบขำมีค่าสูงมากกว่าแบบพัฒนา ทั้งนี้เนื่องจากมะม่วงแช่อิ่มแห้งมีการปรับน้ำเชื่อมที่ละน้อยและใช้เวลานานในการแช่อิ่มจึงทำให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่ชั้นมะม่วงมาก เมื่อพิจารณาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือตกค้างในผลิตภัณฑ์พบว่าปริมาณต่ำมาก จากค่าการวิเคราะห์ทางเคมีทั้งหมด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของผลไม้แห้งพบว่า เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน (มอก., 2532)

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของมะม่วงแช่อิ่มแห้ง โดยวัดค่าสีด้วยระบบ Hunter พบว่ามะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบพัฒนาขึ้นมีค่าสีเหลือง (ค่า b) และค่าความสว่าง (ค่า L) มากกว่า ($P < 0.05$) มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบขำเนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลต่ำกว่าจึงทำให้มีสีค่อนข้างสว่าง และจากค่า a แสดงถึงความเป็นสีเขียว ลักษณะสีของผลิตภัณฑ์จึงมีสีเหลืองเขียว (รูปที่ 48) เมื่อพิจารณาความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบพัฒนาให้ค่าความแน่นเนื้อสูงกว่ามะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบขำ เนื่องจากในผลิตภัณฑ์มีการสูญเสีย น้ำสูงและมีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลต่ำในระหว่างการแช่อิ่มจึงทำให้น้ำเยื่อมีการหดตัวอัดกันแน่น เมื่อผ่านการอบแห้งมีการสูญเสียน้ำมากขึ้นเนื้อเยื่อจึงมีลักษณะอัดตัวกันแน่นและแข็งมากกว่ามะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบขำ

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของมะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่าน
การแช่อิ่มแบบช้า และแบบพัฒนา

องค์ประกอบ	มาตรฐานผลไม้แห้ง (มอก.)	มะม่วงแช่อิ่มแห้ง	
		แบบช้า	แบบพัฒนา
ทางเคมี			
ความชื้น (ร้อยละมาตรฐานเปียก)	≤ 18.00	16.15	16.24 ^{ns}
น้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	≥ 65.00	75.26 ^a	69.77 ^b
น้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)	-	40.90 ^a	34.02 ^b
กรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (ร้อยละ)	-	0.58	0.98 ^{ns}
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์(มก./กก.)	≤ 1000	0.35 ^b	5.24 ^a
ทางกายภาพ			
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	-	7.62 ^b	11.81 ^a
ค่า L	-	20.5 ^b	21.69 ^a
ค่า a	-	-0.31	-0.42 ^{ns}
ค่า b	-	1.29 ^b	2.46 ^a

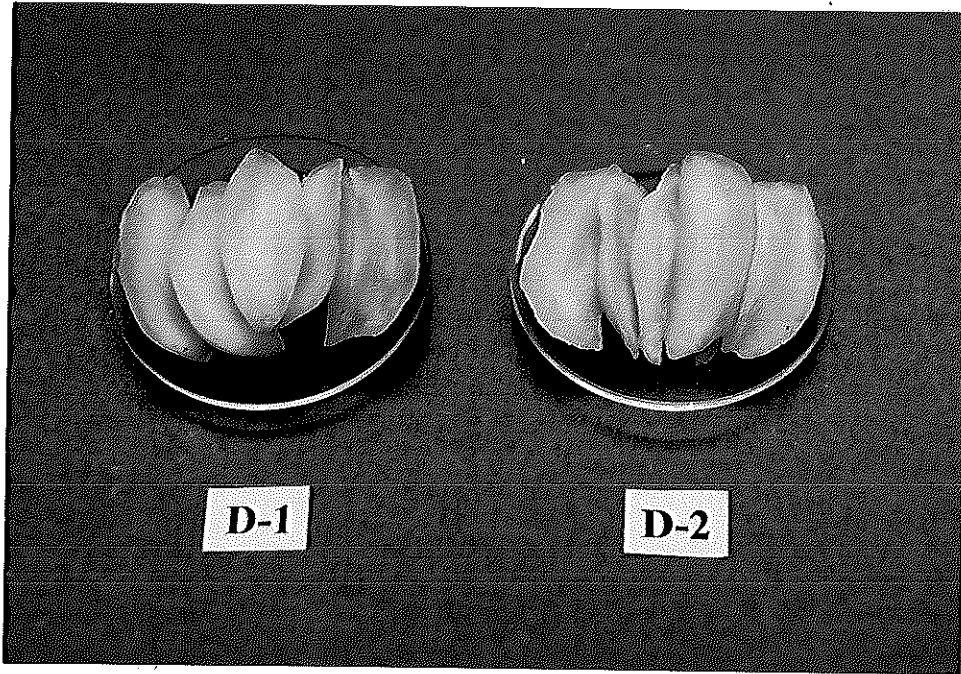
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ns : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

L : คือค่าความสว่างของสี ซึ่งมีค่าจาก 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว)

a : คือค่าที่บ่งบอกความเป็นสีแดง (+ a) และสีเขียว (- a)

b : คือค่าที่บ่งบอกความเป็นเหลือง (+ b) และสีน้ำเงิน (- b)



รูปที่ 48 ผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้า (D-1) และแบบพัฒนา (D-2)

จากผลการเปรียบเทียบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของมะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่ม 2 วิธี (ตารางที่ 15) พบว่ามะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้ามีคะแนนความชอบของสีสูงมากกว่าแบบพัฒนา ซึ่งให้ลักษณะสีเหลืองเข้มมากกว่าเป็นผลมาจากมีปริมาณน้ำตาลสูง ส่วนลักษณะกลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสมีคะแนนความชอบไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบช้ามีลักษณะเหี่ยวยุบน้อยกว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลสูงจึงทำให้โครงสร้างของชิ้นมะม่วงคงรูปมากกว่าในช่วงการแช่อิ่ม และอบแห้ง เมื่อพิจารณาการยอมรับรวมของผลิตภัณฑ์ ผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่อิ่มทั้ง 2 วิธี โดยคะแนนอยู่ในระดับชอบปานกลาง

ตารางที่ 15 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของมะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้า และแบบพัฒนา

มะม่วงแช่อิ่มแห้ง	แบบช้า	แบบพัฒนา
สี	8.00 ^a	6.80 ^b
กลิ่น	6.70	7.10 ^{ns}
รสชาติ	6.50	7.60 ^{ns}
เนื้อสัมผัส	7.10	8.80 ^{ns}
ความเหนียว	7.20 ^a	6.10 ^b
การยอมรับรวม	7.20	6.90 ^{ns}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ns : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

คะแนนความชอบจาก 1 (ไม่ชอบมากที่สุด) ถึง 9 (ชอบมากที่สุด)

5.4 การวิเคราะห์หาปริมาณผลผลิต

จากการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง 2 วิธี คือ มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้า และที่ผ่านการแช่อิ่มแบบพัฒนา (ตาราง ค. ในภาคผนวก) พบว่ามีการสูญเสียมากที่สุดในขั้นตอนการตัดแต่งวัตถุดิบสูงถึงร้อยละ 52.99 (การปอกเปลือกและเอาเมล็ดออก) เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงการแช่อิ่ม การแช่อิ่มแบบพัฒนามีการสูญเสียมากกว่าการแช่อิ่มแบบช้า โดยมีค่าร้อยละ 10.99 และ 7.84 ตามลำดับ เนื่องจากมีการสูญเสียสูงในระหว่างการผลิต ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั้งสองวิธีให้ผลผลิตต่างกัน คือ มีค่าร้อยละ 34.96 และ 32.58 ของวัตถุดิบทั้งหมดสำหรับมะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้า และแบบพัฒนาขึ้นตามลำดับ

5.5 การประเมินต้นทุนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง

จากวิธีการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการแช่อิ่มแบบช้า และแบบพัฒนาขึ้น สามารถนำมาประมาณการต้นทุนการผลิต โดยรวบรวมราคาวัตถุดิบทั้งหมด (ตารางที่ 16) ในช่วงเดือนตุลาคม 2539 ถึงเดือนมิถุนายน 2541 ในการทดลองนี้คิดเฉพาะต้นทุนของวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบ จากผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตดังตารางที่ 17 พบว่าผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผลิตแบบพัฒนามีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าแบบช้า แม้ว่าจะมีการใช้วัตถุดิบปริมาณสูง แต่ในขั้นตอนการแช่อิ่มใช้น้ำตาลปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นวิธีการผลิตแบบพัฒนาสามารถช่วยลดการใช้ปริมาณน้ำตาลในช่วงการแช่อิ่ม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังเวลาสั้น และสะดวกต่อการปฏิบัติงานมากกว่า

ตารางที่ 16 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์

วัตถุดิบ	บาทต่อกิโลกรัม
มะม่วงเบา	24
น้ำตาลซูโครส	14
เกลือ	10
กรดซิตริก	222.22
โซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์	266.67
แคลเซียมคลอไรด์	142.22

ตารางที่ 17 ปริมาณการใช้วัตถุดิบ และราคาต้นทุนในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งจำนวน 1 กิโลกรัมที่ผ่านการแช่อิ่มแบบพัฒนาและแบบช้า

ส่วนประกอบ	แบบช้า		แบบพัฒนา	
	น้ำหนัก (กรัม)	ราคา (บาท)	น้ำหนัก (กรัม)	ราคา (บาท)
มะม่วงเบา	2,860.00	68.64	3,069.37	73.66
โซเดียมเมตตาไบซัลไฟต์	4.03	1.07	4.32	1.15
แคลเซียมคลอไรด์	28.23	4.01	30.30	4.31
เกลือแกง	407.14	4.07	428.81	4.29
กรดซิตริก	5.63	1.25	5.73	1.27
น้ำตาลซูโครส	4,966.00	69.52	4,267.59	59.75
รวมราคา (บาท/กิโลกรัม)		148.56		144.43

บทที่ 4

สรุป

1. การศึกษาสภาวะเบื้องต้นสำหรับการเตรียมมะม่วงก่อนการแช่อิ่ม โดยแช่ชิ้นมะม่วงหลังการตัดแต่งในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เข้มข้นร้อยละ 0.1 กับแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.7 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในชิ้นมะม่วงหลังการตัดแต่งและอบแห้ง และทำให้เนื้อสัมผัสมีความแน่นแข็งขึ้น

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถายไอนมวลสาร โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ การสูญเสียน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล และการลดลงของกรด ภายในชิ้นมะม่วงระหว่างการแช่อิ่ม พบว่า การกวนด้วยค่าเรโนลด์นัมเบอร์ 200 ไม่ส่งเสริมการถายไอนมวลสาร เนื่องจากในการทดลองใช้อุณหภูมิ 50 °ซ ทำให้เกิดกระแสการพาตามธรรมชาติอย่างเพียงพอ และชิ้นมะม่วงมีการซ้อนทับกันน้อยในระหว่างการแช่อิ่ม จึงมีความต้านทานการถายไอนมวลสารภายนอกที่ขัดขวางการแพร่ต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องมีการกวนในระหว่างการผลิต แต่ในการทดลองนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายกลไกการถายไอนมวลสารและเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความต้านทานภายนอกเกิดขึ้นจึงต้องกวนในระหว่างการทดลอง

การปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบปรับเพิ่มครั้งละ 20° บริกซ์ มีผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลต่ำ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าสูงกว่าการแช่ชิ้นมะม่วงในน้ำเชื่อมเข้มข้น 70° บริกซ์ และไม่ต่างจากการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบปรับเพิ่มครั้งละ 10° บริกซ์ แต่ระยะเวลาในการแช่อิ่มสั้นกว่า จากการเปลี่ยนแปลงมวลสารมีผลต่อลักษณะการเหี่ยวยุบของชิ้นมะม่วง โดยการปรับเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมแบบปรับเพิ่มครั้งละ 20° บริกซ์ทำให้ชิ้นมะม่วงเกิดการเหี่ยวยุบน้อยกว่าการแช่ชิ้นมะม่วงในน้ำเชื่อมเข้มข้น 70° บริกซ์

การใช้อุณหภูมิ 50 °ซ ในการแช่อิ่มให้ค่าการสูญเสียน้ำตาลต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง และมีค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมากกว่าทุกอุณหภูมิ อาจเป็นผลเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 °ซ ทำให้สารเพคตินภายในเซลล์เกิดการละลาย และหลุดตันช่องว่างภายในเซลล์ขัดขวางการแพร่เข้าของน้ำตาล

ขนาดและรูปร่างของขึ้นมะม่วงไม่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสาร เนื่องจากขนาดของขึ้นที่ใช้ในการทดลองมีความหนาใกล้เคียงกัน และมีรูปร่างไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกขนาดของขึ้นมะม่วงเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตจึงควรห้ขึ้นมะม่วง 4 ขึ้นต่อผล ซึ่งสะดวกในการตัดแต่ง

3. การอบแห้งมะม่วงแช่อิ่ม พบว่าอัตราการอบแห้งที่ปรากฏมีเฉพาะในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น โดยผลิตภัณฑ์มะม่วงแช่อิ่มแห้งที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงมีปริมาณความชื้นร้อยละ 19.39 (มาตรฐานแห้ง) และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.60 ซึ่งมีความเหมาะสมในการเก็บรักษา

4. การเปรียบเทียบกระบวนการผลิต พบว่าการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนาโดยแช่อิ่มในน้ำเชื่อมที่มีการปรับเพิ่มความเข้มข้นครั้งละ 20° บริกซ์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C ในสภาวะที่มีการกวน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารสูง ปริมาณการสูญเสียน้ำมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตแบบพัฒนามีปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร แต่การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในขึ้นมะม่วงมีค่าต่ำ เป็นผลจากในช่วงการแช่อิ่มมีระยะเวลาสั้นเพียง 5 ชั่วโมง ในขณะที่การผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้าใช้เวลา 1 - 2 วัน

คุณภาพทางเคมีพบว่า มะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนามีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดต่ำกว่า และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรมผลไม้แห้ง ส่วนลักษณะทางกายภาพของมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนาจะมีลักษณะเหนียวแน่นมากกว่า ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียน้ำออกจากขึ้นมะม่วงในปริมาณสูง มีสีเหลืองอ่อนและมีเนื้อสัมผัสแน่นแข็งมากกว่า เมื่อพิจารณาการยอมรับรวมของผู้บริโภคมีคะแนนในระดับชอบปานกลาง และไม่แตกต่างจากมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบช้า

ผลผลิตของมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนามีปริมาณร้อยละ 32.58 ต่ำกว่าแบบช้ามีปริมาณร้อยละ 34.96 โดยทั้งสองกระบวนการมีการสูญเสียผลผลิตมากในช่วงการตัดแต่งถึงร้อยละ 52.99 และในระหว่างการแช่อิ่มมีการสูญเสียร้อยละ 10.91 และ 7.01 สำหรับแบบพัฒนา และแบบช้าตามลำดับ ต้นทุนในการผลิตโดยคิดเฉพาะวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบพบว่าแบบพัฒนามีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า คือ 144.43 บาทต่อกิโลกรัมของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ส่วนแบบช้ามีราคาต้นทุน 148.56 บาทต่อกิโลกรัมของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

จากข้อมูลในการศึกษานี้ได้นำมาพิจารณาเพื่อคัดเลือกหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้ง ในการพิจารณาจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้บริโภคและผู้ผลิต สำหรับการทดลองนี้ผู้วิจัยสนใจลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งคำนึงถึงลักษณะเหยี่ยว่นที่ปรากฏเป็นหลัก พบว่าการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนา โดยแช่อิ่มมะม่วงในน้ำเชื่อมที่มีการปรับความเข้มข้นครั้งละ 20° บริกซ์ ให้ลักษณะผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค แม้ว่าจะมีลักษณะเหยี่ยว่นมากกว่าแบบช้า แต่ระยะเวลาในการผลิตสั้นเพียง 5 ชั่วโมง และสะดวกต่อการปฏิบัติงาน ดังนั้นวิธีการผลิตดังกล่าวจึงน่าจะนำไปพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของผู้บริโภค และพัฒนากระบวนการให้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลสารในช่วงการแช่อิม พบปัญหาจากความไม่สม่ำเสมอของวัตถุดิบ จากความแก่อ่อนที่แตกต่างกันของมะม่วงสำหรับในแต่ละช่วงการศึกษา ควบคุมยากเพราะเป็นขีดจำกัดของฤดูกาล และชั้นมะม่วงมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อน นอกจากนี้ขนาดของชั้นมะม่วงที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเล็กเกินไปจึงทำให้เห็นผลไม่เด่นชัดในการทดลองบางหัวข้อ

2. การทดลองหาความชื้นสมดุล ในระหว่างการหาน้ำหนักคงที่ในช่วงการเก็บชั้นมะม่วงไว้ในขวดบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ปิดสนิท ควรมีการชั่งน้ำหนักหลังจากวันที่เริ่มเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วันเป็นอย่างน้อย และไม่ควรถั่งบ่อยครั้ง เพราะในระหว่างการชั่งน้ำหนักชั้นมะม่วงแช่อิมแห้งมีโอกาสสัมผัสกับอากาศ จะสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้อย่างรวดเร็วทำให้น้ำหนักคลาดเคลื่อน และน้ำหนักของตัวอย่างควรสูงมากพอ (ไม่ควรต่ำกว่า 5 กรัม) เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในการทดลอง

3. ในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป ควรมีการปรับปรุงทางด้านรสชาติ โดยนำแนวทางการศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงมวลสารที่เกิดขึ้นมาใช้ในการปรับปรุงรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

เอกสารอ้างอิง

กองโภชนาการ. 2530. ตารางแสดงคุณค่าอาหารไทยในส่วนที่กินได้ 100 กรัม. กองโภชนาการ กรมอนามัย.

จิราภรณ์ สอดจิตร์. 2535. กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จิตรชัย แก้ววัฒนะ. 2533. อุตสาหกรรรมมะม่วง. ข่าวเศรษฐกิจการเกษตร 36(399) : 7-21.

ฉลองชัย จันเพ็ญ, บรรณาธิการ. 2532. ครุเกษตร. อาชีพชาวเกษตร 9 : 37-41.

ชลดา มานะกุล. 2537. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นในอาหารที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการดึงน้ำออกจากอาหารด้วยแรงดันออสโมติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ณรงค์ นิยมวิทย์. 2529. ผลิตภัณฑ์มะม่วง ตอน 1. ถิ่นกำเนิดพันธุ์พื้นที่เพาะปลูก และผลผลิต. อาหาร 16(1) : 8-13.

ถวิล ข่ายสุวรรณ. 2523. พันธุ์มะม่วง. กสิกร 53(1) : 12-29.

ทอง ภัครัชพันธุ์. 2539. ผัก ผลไม้ และผลิตภัณฑ์. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. หน้า 314-347. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนวรรณ บุญปั้น. 2537. ผลไม้แช่อิ่ม. แนวเกษตร 10(10) : 139-143.

- นิธิยา รัตนปนนท์ และदनัย บุญยเกียรติ. 2533. มะม่วง. ใน วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ผักและผลไม้เศรษฐกิจ. หน้า 314 - 347. กรุงเทพฯ ฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นพรัตน์ บำรุงรักษ์. 2533. มะม่วงเบา. รุสมิแล 13(3) : 40 - 44.
- บุญมา ซึ่งสิทธิพร. 2528. มะม่วงแช่อิ่มแห้ง. อาหาร 15(3) : 151 - 157.
- บุหลัน พิทักษ์พล, สุจินดา นิมมานนิตย์, น้อย สาริกะภูติ, วารุณี วารุญญานนท์, สุภารัตน์ เรืองมณีไพบุลย์ และ สุภรัตน์ ชวนะ. 2523. มะม่วงบรรจุกระป๋อง. การอภิปรายพิเศษเกี่ยวกับปัญหาต่าง ๆ ในการปลูกมะม่วง และเรื่องเกี่ยวกับการผลิตและการแปรรูป ณ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ ฯ. 18 กันยายน 2523. หน้า 87 - 100.
- ประสาร สวัสดิ์ชิตัง. 2538. การเกิดสีน้ำตาลของอาหารและการควบคุมป้องกัน. อาหาร 25 (3) : 160 - 169.
- ประสิทธิ์ อติวีระกุล. 2527. เทคโนโลยีของผลไม้และผัก. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. 2529. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับการถนอมอาหาร. ใน กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. หน้า 168-204. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไพโรจน์ วิริยจารี. 2535. การวางแผนและการวิเคราะห์ทางด้านประสาทสัมผัส. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่.

- ไพโรจน์ วิริยจารี. 2539. อาหารกึ่งแห้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาลิขิตภัณฑ์ คณะ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ไพโรจน์ วิริยจารี, ธาธา ศรีสกุล และสุจินดา ศรีวัฒนะ. 2539. การใช้สารซัลเฟอร์ได
ออกไซด์ในการผลิตปลั๊กกึ่งแห้ง. ว.เกษตร 12 (2) : 187 - 202.
- ภคินี อัครเวสสะพงศ์, พูนศักดิ์ ดิษฐุกระจัน, ปัญจรัศม์ นันทพล, ศศิธร วสุนันต์,
กัลยาณี ตันติธรรม และ สุนันทา เวสสุรย์. 2532. ศึกษาอายุการเก็บเกี่ยว
มะม่วงแก้วเพื่อการดอง. ว. วิชาการเกษตร. 7 : 9 - 15.
- มอก. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง (มอก. 910) สำนักงานมาตรฐาน
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพฯ
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์พานิต. 2538. การยับยั้งปฏิริยาการเกิดสีน้ำตาลในการผลิตสับปะรด
แช่เชื่อมอบแห้ง. ว. เกษตรพระจอมเกล้า 13(3) : 50 - 55.
- รัชนี ตันทะพานิชกุล. 2536. ผักและผลไม้. ใน เคมีอาหาร. หน้า 127 - 210. ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. 2538. การถ่ายเทมวลสาร. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี.
- วราวุฒิ ครุสง. 2538. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแปรรูปอาหารโดยอาศัยการทำ
แห้ง. ใน จุลชีววิทยาในกระบวนการแปรรูปอาหาร. หน้า 117-130. กรุงเทพฯ ฯ :
สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

- ศิวะ อัจฉริยะวิริยะ และ สมชาติ ไสภนรณฤทธิ. 2531. การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่ส้ม. การประชุมสัมมนาทางวิชาการ “เครื่องมือและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม”. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 6 - 7 ตุลาคม 2531. หน้า 34 - 44.
- สงวนศรี เจริญเหรียญ และ วิชาญ วงศ์สิทธิ์. 2534. ผลการดื่มน้ำบางส่วนออกก่อนการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพของสับปะรดแช่เยือกแข็ง. ว.วิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร. 8 (3) : 44 - 52.
- สมชาติ ไสภนรณฤทธิ. 2535. การอบแห้งเมล็ดถั่วเขียว. คณะพลังงาน และวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมบัติ ขอทวีวัฒนา. 2529. หลักการอบแห้ง. ใน กรรมวิธีการอบแห้ง. หน้า 11 - 38. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์, ทวีเกียรติ ยิ้มสวัสดิ์ และ โสฬส จินดาประเสริฐ. 2536. การคัดเลือกพันธุ์มะม่วงเพื่อใช้เป็นพันธุ์รับประทานสด พันธุ์แปรรูปและต้นตอ. เกษตร 21 (3 - 4) : 131 - 140.
- สายชล เกตุษา และ สุนทร ไปรา. 2535. คุณภาพของผลมะม่วงสุกและการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่เก็บเกี่ยวอายุต่างกัน. ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย์.) 26 : 12 - 19.
- สุคนธ์ชื่น ศรีงาม. 2539. กระบวนการทำแห้งอาหาร. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร. หน้า 164-172. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สุวิช ศิริวัฒน์โยธิน. 2530. การศึกษาการถ่ายเทมวลสารในการผลิตมะละกอแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อ่อนรวี รัตนพันธ์. 2533. หลักการทำแห้งผลไม้ด้วยวิธี osmotic. อาหาร 20(4) : 240-245.
- อารีย์ ใจเพชร, สายชล เกตุษา, วิจิตร วัจโน และฉลองชัย แบบประเสริฐ. 2530. การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของผลมะม่วงมัน. ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย์.) 21 : 249 - 254. อาหาร หน้า 164 - 172. กรุงเทพฯ ฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- A.O.A.C. 1990. Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. 15th ed. Virginia : The Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H. S. and Beristain, C. I. 1992 Kinetic model for osmotic and its relationship with Fick's second law. Int. J. Food Sci. Technol.27 : 409 - 418.
- Bailon, G.L. 1990. Osmotic Dehydration of Mango and Its Effect on Quality. Thesis in Master of Science, Asian Institute of Technology.
- Beristain, C. I., Azuara, E., Cortes, R. and Garcia, H. S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. Int. J. Food Sci. Technol. 25 : 576 - 582.
- Bird, B.R., Stewart, E. W. and Lightfoot, N. E. 1960. Transport phenomena. New York. : John Wiley & Sons.

- Bolin, H. R., Huxsoll, C. C., Jackson, R. and NG, K. C. 1983. Effect of osmotic agents and concentration on fruit quality. *J. Food Sci.* 48 : 202 - 205.
- Bourne, M. C. 1976. Texture of fruits and vegetables. In *Rheology and Texture in Food Quality* (eds. I. M. Deman, *et al.*) pp. 255 - 307. Westport, Connecticut : The AVI Publishing Company Inc.
- Conway, J., Castaigne, F., Picard, G. and Voran, X. 1983. Mass transfer consideration in the osmotic dehydration of apple. *Can. Inst. Food Sci. Technol.* 16 : 25-29. อ้างถึงในจิราภรณ์ สอดจิตร์. 2535. กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. London : Oxford University Press.
- Dickey, D. S. and Fenic, J. G. 1976. Dimensional analysis for agitation system. *Chem. Eng.* 5(1) : 7 -13.
- Erickson, L. E. 1982. Recent developments in intermediate moisture foods. *J. Food Protection.* 45(5) : 484 - 491.
- Glosso, A. L. 1965. Candied and glazed fruit. *Impresso el la, Argentina*, อ้างถึงใน สุวิขศิริวัฒน์โยธิน. 2530. การศึกษาการถ่ายเทมวลสารในการผลิตมะละกอบรรจุขี้ผึ้ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- Isse, M. G., Schuchmann, H. and Schubert, H. 1992. Divided sorption isotherm concept : an alternative way to describe sorption isotherm data. *J. Food Pro. Eng.* 16 : 147 - 157.
- Lakshminarayana, S. 1980. Mango. In *Tropical and Subtropical Fruits* (eds. S. Nagy and P. E. Shaw) pp. 184-257. Westport, Connecticut : The AVI Publishing Company Inc.
- Lenart, A. and Flink, J. M. 1984. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmosis process. *J. Food Technol.* 19 : 45 - 63.
- Lénart, A. and Lewicki, P. P. 1990. Osmotic dehydration of carrot at high temperature. In *Engineer and Food Volume 2 Preservation Processes Related Techniques* (ed. W. E. L. Spiess and H. Schubert) pp. 731 - 739. Barking : Elsevier Science Publishers Ltd.
- Lerici, C. R., Rosa, M. D. and Bartolucci, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit : Influence of osmotic agent on drying behavior and product quality. *J. Food Sci.* 50 : 217 - 219.
- Levi, A., Ramirez-Martinez, J. R. and Padua, H. 1980. Influence of heat and sulphur dioxide treatments on some quality characteristics of intermediate - moisture banana. *J. Food Technol.* 15 : 557 - 566.
- Liu, L. 1992. A kinetic study of salt diffusion in potato at high temperature. *Inter. J. Food Sci. and Technol.* 27 : 443 - 455.

- Loncin, M. 1980. Diffusion phenomena in solids, Quoted in Swartzberg, H. G. Chao, R. Y. 1982. Solute diffusivity in leaching process. Food Technol. 36(2) : 73 - 86.
- Mauro, M. A. and Menegalli, F. C. 1995. Evaluation of diffusion coefficients in osmotic concentration of bananas (*Musa cavendish* Lambert). Int. J. of Food Sci. & Technol. 30 : 199 - 213.
- Meade, G. P. and Chen, J. C. P. 1977. Cane Sugar handbook. New York : John Wiley & Sons.
- Monsálve-González, A., Barbosa-Canovas, G. V. and Cavalieri, R. P. 1993. Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. J. Food Sci. 8(5) : 1118 - 1124.
- Palipane, K. B. and Driscoll, R. H. 1992. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nut. J. Food Eng. 18 : 63 - 76.
- Ponting, J. D. 1973. Osmotic dehydration of fruits : Recent modifications and applications. Proc. Biochem. 8(12) : 12-20, quoted in Rastogi, N. K. and Raghavarao, K. S. M. S. 1995. Kinetics of osmotic dehydration of coconut. J. Food Process Engineering. 18 : 187 - 197.
- Rahman, M. S. and Lamb, J. 1990. Osmotic dehydration of pineapple. J. Food Sci. Technol. 27 (3) : 150 - 152.
- Rastogi, N. K. and Raghavarao, K. S. M. S. 1995. Kinetics of osmotic dehydration of coconut. J. Food Process Engineering. 18 : 187 - 197.

- Tanner, J. R. and Cheischester, D. F. 1983. Antimicrobial food additive. In Handbook of Food Additive (ed. T. E. Furia) Florida : CRC Press.
- Teotia, M. S., Manan, J. K. and Saxena, A. K. 1987. Green mango processing. Indian Food Packer. 75 - 86
- Sapers, G. M. 1993. Browning of food : Control by sulfites, antioxidants and other means. Food Technol. 47 (10) : 75 - 84.
- Saurel, R., Raoult-Wack, A., Rios, G. and Guilbert, S. 1994. Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. Int. J. Food Sci. Technol. 29 : 531 - 542.
- Schwartzberg, H. G. Chao, R. Y. 1982. Solute diffusivity in leaching process. Food Technol. 36(2) : 73-86.
- Singh, L. B. 1968. Utilization. In The Mango Botany Cultivation and Utilization (ed. N. Polunin) pp. 359-394. London : Morgan-Grampian Books Ltd.
- Siripatana, C. 1997. Solute diffusion in fruit, vegetable and cereal processing I : Simplified solutions for diffusion in anomalous shapes. Songklanakarin J. Sci. Technol. 19 : 77-88.
- Spaninks, J. A. M. 1983. Calculation methods for solid-liquid extractors. In Progress in Food Engineering (eds. C. Canrarelli. and C. Peri) pp.109 - 126. Switzerland : Forster Publishing Ltd.

Wang, Wei-Chi and Sastry, K.S. 1993. Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating : Determination of parameters and mathematical model verification. *J. Food Eng.* 20 : 311 - 323.

Wongkrajang, K. 1996. Osmotic Dehydration of fruit. Training course on drying and juicing for Bhutanese Officer Bangkok, IFRPD. pp. 1 - 11.

Yang, D. C. and Maguer, M. L. 1992. Osmotic dehydration of strawberries in batch recirculation system. *J. Food Quality.* 15 : 387 - 397.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาความชื้น (A.O.A.C., 1990)

อุปกรณ์

1. ตู้อบไฟฟ้า
2. เดซิกเคเตอร์
3. ภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด

วิธีการวิเคราะห์

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าอุณหภูมิ 90°ซ เป็นเวลา 2 - 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในเดซิกเคเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนัก
2. กระทำข้อ 1 ซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม
3. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1 - 3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นซึ่งทราบน้ำหนักนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90°ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. นำออกจากตู้อบใส่เดซิกเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่าง จากนั้นนำกลับไปเข้าตู้อบและกระทำเช่นเดิม จนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้งสองครั้งติดกันไม่เกิน 1 - 3 มิลลิกรัม

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

2. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (โดยใช้ Abbe Refractometer)

วิธีการวิเคราะห์

นำตัวอย่างมะม่วงที่ผ่านการแช่ต้มมาบีบและคั้นน้ำ วัดด้วย Abbe Refractometer อ่านปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในหน่วยของศาบริกซ์

3. ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซिटริก (A.O.A.C., 1990)

วิธีการวิเคราะห์

นำตัวอย่างมะม่วง 10 กรัม เติมน้ำเล็กน้อย ต้มให้เดือด 2 - 3 นาที ทำให้เย็น ถ่ายใส่ขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นแล้วกรอง ปิดฝาส่วนที่กรองได้ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดชมพูขนาด 50 มิลลิลิตร เติมนีโอสัลฟทาลีน (1% phenolphthalein ใน 95% ethanol) 2 หยด นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิทริก (ร้อยละ)} = \frac{\text{ไตเตอร์} \times N \times n \times 100 \times 50}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง} \times 10}$$

เมื่อ N = นอร์มอลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

n = มิลลิควิวาเลนต์ของกรดซิทริก = 0.07

4. ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด โดย Lane and Eynon volumetric method (A.O.A.C., 1990)

อุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู ขนาด 250 มล.
2. ปิดขนาด 10 และ 50 มล.
3. บิวเรตต์ขนาด 50 มล.
4. ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 และ 500 มล.
5. เตาให้ความร้อน (hot plate)
6. กระดาษกรอง

สารเคมีและการเตรียม

1. สารละลายเฟลิ่ง A

- ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 34.639 กรัม
- ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล.
- กรองผ่านกระดาษกรอง

2. สารละลายเฟ-ลิง B

- ชั่งโปแทสเซียมเตตระไฮเดรต เดตราไฮเดรต ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) หนัก 346 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 กรัม
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

3. Methylene blue 1%

ละลาย methylene blue 1 กรัมในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 มล.

4. Neutral lead acetate solution 10%

ละลาย neutral lead acetate 50 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 500 มล.

5. Potassium oxalate solution 10%

ละลาย Potassium oxalate 50 กรัมในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 500 มล.

6. Standard dextrose 1%

ชั่ง dextrose ที่ปราศจากน้ำให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 3 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 300 มล.

วิธีการวิเคราะห์

1. การหาค่ามาตรฐานในสารละลายเฟ-ลิง

การหาค่ามาตรฐานใช้ Incremental method หรือ Preliminary และ Standard method หรือ Accurate method ดังนี้

1.1 Preliminary method

- ปิเปตสารละลายเฟ-ลิง A และ B มาอย่างละ 5 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

- เติมสารละลาย dextrose จากบิวเรตต์ประมาณ 15 มล. เขย่าให้เข้ากันและต้มให้เดือดโดยเร็ว นาน 15 วินาที

- เติม methylene blue 1% 1-2 หยด (ถ้าไม่มีสีน้ำเงินเกิดขึ้นแสดงว่า dextrose มากเกินไป) ไตเตรทจนสีน้ำเงินหายไป ขณะไตเตรทภายในขวดรูปชมพู่ต้องเดือดและเขย่าให้เข้ากันตลอด บันทึกปริมาณ dextrose ที่ใช้ไป

1.2 Accurate method

- บีบสารละลายฟลูออโรสเฟอริน A และ B มาอย่างละ 5 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มล.

- ใส่สารละลาย dextrose จากบิวเรตต์ลงในขวดรูปชมพู่ ให้ปริมาณน้อยกว่าจุดยุติประมาณ 1 มล.

- เขย่าต้มให้เดือดโดยเร็วสม่ำเสมอ 2 นาที

- เติม methylene blue 1-2 หยด

- ไตเตรทโดยปล่อยครั้งละ 2-3 หยด ให้ถึงจุดยุติภายในเวลา 1 นาที (ขณะไตเตรทสารละลายในขวดรูปชมพู่ต้องเดือดตลอดเวลาและเขย่าให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ)

- อ่านปริมาตรของ dextrose (มล.) ที่ใช้

- คำนวณค่า factor ของสารละลายฟลูออโรสเฟอริน

การคำนวณ

Factor (F) = ไตเตรต x กรัมของ dextrose ในสารละลาย 1 มล.

2. การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

2.1 การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

- ชั่งตัวอย่างผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วหนัก 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มล.

- ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล

- ต้มในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 70°C นาน 1 ชั่วโมง

- ทำให้เย็น แล้วเทสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มล.

- เติมสารละลาย Neutral lead acetate 2 มล. ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

- ตกตะกอนส่วนที่เกินพอดีด้วยสารละลาย Potassium oxalate 2 มล.

- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นแล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 (ตัวอย่างที่กรองได้แบ่งไว้ส่วนหนึ่งสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด)

- นำไปไตเตรทตามวิธีในข้อ 1 ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้

2.2 การหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

- บีบตัวอย่างที่กรองได้จากข้อ 2.1 มา 25 มล. เติมน้ำกลั่นเป็น 100 มล.
 - เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 50 ลงไป 5 มล.
 - ต้มให้เดือดเบา ๆ 10 นาที
 - ทำให้เย็นแล้วถ่ายใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มล. ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์
 - ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 250 มล.
 - นำไปไตเตรทตามวิธีในข้อ 1 บันทึกปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้
- การคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, น้ำตาลทั้งหมด} = \frac{F \times \text{ปริมาณเจือจาง} \times 100}{\text{ไตเตอร์} \times \text{ปริมาณตัวอย่าง}}$$

5. การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (A.O.A.C., 1984)

วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

1. อุปกรณ์การกลั่น
2. บีบ
3. บิวเรตต์
4. กรดฟอสฟอริก ร้อยละ 88 (ความหนาแน่น 1.75)
5. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล
6. เมธานอล (เกรดวิเคราะห์)
7. อินดิเคเตอร์ผสม (สารละลาย methyl red ความเข้มข้นร้อยละ 0.03 ในสารละลาย ethanol 50 มล. ผสมกับ สารละลาย methylene blue ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 ในสารละลาย ethanol 50 มล แล้วนำมากรอง)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งหรือบีบตัวอย่างใส่ในขวดกลั่นตามปริมาณที่แสดงในตาราง

ตาราง ก.1 น้ำหนักตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (มก./กก.) ที่คาดว่าจะมีในตัวอย่าง	ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (กรัม หรือ มล.)	ปริมาณน้ำกลั่นที่เติม (มล.)
< 10	40 - 50	20
10 - 100	20 - 25	30
> 100	5 - 10	40

2. เติมน้ำกลั่นตามปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางข้างบน
3. เติมนเมธานอลปริมาณ 50 มล. และผสมให้เข้ากัน
4. เติมหิโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 10 มล. น้ำกลั่น 60 มล. อินดิเคเตอร์ผสม 2 - 3 หยด เพื่อให้เกิดสีเขียวลงในขวดรองรับส่วนที่กลั่นได้
5. เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นกลางแล้วปริมาณ 10 มล. ลงในขวดใบสุดท้ายของชุดกลั่น
6. ประกอบอุปกรณ์กลั่นให้พร้อม
7. ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงในขวดกลั่นทางช่องทางด้านข้างของขวด ให้ได้อัตราประมาณ 60 ฟองต่อนาที
8. เติมกรดฟอสฟอริก 15 มล. ลงทางช่องด้านข้างของขวดกลั่น
9. ให้ความร้อนเพื่อให้ของผสมเดือดอย่างรวดเร็วแล้วค่อย ๆ ลดความร้อนลงใช้เวลาในการให้ความร้อนประมาณ 30 นาที
10. ถ่ายและล้างสารละลายจากขวดใบสุดท้ายลงในขวดรองรับส่วนที่กลั่นได้
11. ไตเตรทสารละลายในขวดรองรับส่วนที่กลั่นได้ทั้งหมด ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งได้สารละลายสีเขียว

การคำนวณ

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด (มก./กก. หรือ มก./ล.)

$$= a \times N \times 32 \times 100$$

Q

a = ปริมาณของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรท (มล.)

N = ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มอล)

Q = น้ำหนักหรือปริมาตรที่ใช้ (กรัม หรือ มล.)

ภาคผนวก ข. การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการแช่ลิม

ข.1 การสูญเสียน้ำ

คำนวณหาปริมาณน้ำที่แพร่ออกจากชิ้นมะม่วงที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากสมการ

$$\%WL = \frac{(W_0 \times M_0) - (W_t \times M_t)}{W_0} \times 100 \quad (ข1)$$

โดย WL = ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (ร้อยละ)

W_0, W_t = น้ำหนักมะม่วงที่เวลาเริ่มต้น และเวลาใด ๆ (กรัม)

M_0, M_t = ความชื้นที่เวลาเริ่มต้น และเวลาใด ๆ (ฐานเปียก)

ข.2 การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล

คำนวณหาปริมาณน้ำตาลที่แพร่เข้าสู่ชิ้นมะม่วงที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากสมการ

$$\%SG = \frac{(W_t \times B_t) - (W_0 \times B_0)}{W_0} \times 100 \quad (ข2)$$

โดย SG = ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)

B_0, B_t = ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ (°บริกซ์)

ข.3 การลดลงของกรด

คำนวณหาปริมาณกรดที่แพร่ออกจากชิ้นมะม่วงที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากสมการ

$$\%AL = \frac{(W_0 \times A_0) - (W_t \times A_t)}{W_0} \times 100 \quad (ข3)$$

โดย AL = ปริมาณกรดซिटริกที่ลดลง (ร้อยละ)

A_0, A_t = กรดซิทริกที่เวลาเริ่มต้น และเวลาใด ๆ (กรัม/100 กรัมของมะม่วง)

ข.4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

คำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมะม่วงโดยรวมที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากสมการ

$$\%VC = \frac{(V_0 - V_t)}{V_0} \times 100 \quad (\text{ข4.1})$$

โดย VC = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยรวม (ร้อยละ)

V_0, V_t = ปริมาตรที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลาใด ๆ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

การคำนวณหาปริมาตรของมะม่วงจากสมการ

$$V = \frac{W}{\rho} \quad (\text{ข4.2})$$

เมื่อ W = น้ำหนักของมะม่วง (กรัม)

ρ = ความหนาแน่นของมะม่วง (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

การหาความหนาแน่นของมะม่วง

1. ชั่งน้ำหนักขวดวัดความหนาแน่นที่บรรจุน้ำเต็มขวด
2. นำชิ้นมะม่วงที่ทราบน้ำหนักแน่นอนหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ บรรจุในขวดวัดความหนาแน่น และชั่งน้ำหนักขวดที่บรรจุน้ำและมะม่วง
3. นำน้ำหนักในข้อ 2 หักลบจากข้อ 1 จะได้น้ำหนักของน้ำที่หายไปซึ่งเป็นส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยชิ้นมะม่วง
4. จากความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น น้ำหนักน้ำที่หายไปก็คือปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยชิ้นมะม่วง และมีค่าเท่ากับปริมาตรของชิ้นมะม่วง

ข.5 การลดลงของน้ำหนัก

คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมะม่วงโดยรวมที่ระยะเวลาต่าง ๆ จากสมการ

$$\%Wt = \frac{(W_0 - W_t)}{W_0} \times 100 \quad (\text{ข5})$$

โดย Wt = น้ำหนักมะม่วงโดยรวมที่ลดลง (ร้อยละ)

W_0, W_t = น้ำหนักมะม่วงที่เวลาเริ่มต้น และเวลาใด ๆ (กรัม)

ข.6 อัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด

จากคำจำกัดความของอัตราการแพร่ในสมการที่ (29)

$$\frac{d(1-E)}{dt} = EC_1 \cdot \left(-\frac{Sh(\gamma+1)}{2\gamma} v \frac{Dt}{a^2} \right)$$

สามารถหาอัตราการแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด ได้ดังนี้

ข.6.1 อัตราการแพร่ของน้ำ

$$\frac{d(1-E_w)}{dt} = E_w \cdot C_1 \cdot B \quad (ข6.1)$$

โดย E_w = การแพร่ของน้ำ

$$E_w = 1 - \frac{WL_t}{WL_\infty}$$

เมื่อ WL_t = ปริมาณน้ำที่สูญเสียที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

WL_∞, C_1, B = พารามิเตอร์ที่พิตได้จากสมการที่ (30)

ข.6.2 อัตราการแพร่ของน้ำตาล

$$\frac{d(1-E_s)}{dt} = E_s \cdot C_1 \cdot B \quad (ข6.2)$$

โดย E_s = การแพร่ของน้ำ

$$E_s = 1 - \frac{SG_t}{SG_\infty}$$

เมื่อ SG_t = ปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

SG_∞, C_1, B = พารามิเตอร์ที่พิตได้จากสมการที่ (30)

ข.6.3 อัตราการแพร่ของกรด

$$\frac{d(1-E_a)}{dt} = E_a \cdot C_1 \cdot B \quad (ข6.2)$$

โดย E_a = การแพร่ของน้ำ

$$E_a = 1 - \frac{AL_t}{AL_\infty}$$

เมื่อ AL_t = ปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

AL_∞, C_1, B = พารามิเตอร์ที่พิตได้จากสมการที่ (30)

ข.7 ค่าเรโนลด์นัมเบอร์

$$N_{Re} = \frac{d^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (ข7)$$

โดย N_{Re} = เรโนลด์นัมเบอร์ (ไร้หน่วย)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

N = จำนวนรอบใบพัดในการกวน (รอบ/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (กิโลกรัม/เมตร วินาที)

ข.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด

กรณีขึ้นมะม่วงที่มีรูปทรงเทียบเท่าวงรี (equivalent) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล และกรด หาได้จากสมการ (Siripatana, 1997)

$$D = -\text{slope} \times \frac{2}{Sh} \times \frac{\gamma}{(\gamma+1)} \times \frac{a_2}{v} \quad (ข8.1)$$

โดย D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร/วินาที)

ข.8.1 slope

ความลาดชันของกราฟระหว่าง $\ln E$ กับเวลา โดย E คือสัดส่วนที่เหลืออยู่ของตัวละลายในขึ้นมะม่วง หาได้จากสมการดังนี้

$$E = \frac{X_t - X_\infty}{X_0 - X_\infty} \quad (ข8.2)$$

โดย X_0, X_t, X_∞ = ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ และความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (°บrix)

การหาความลาดชัน .

1. หาปริมาณความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรณีหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ)

เนื่องจากในการทดลองไม่สามารถทดลองจนถึงสภาวะสมดุล แต่สามารถหาจุดสมดุลได้จากการพลอตกราฟระหว่าง $\ln (M_0 - M_t)$ กับ $1/t$ และพิตข้อมูลด้วยสมการถดถอยอันดับที่ 2 จะได้จุดสมดุลที่เป็นจุดตัดบนแกน y ของกราฟ

ตัวอย่างการเขียนกราฟ

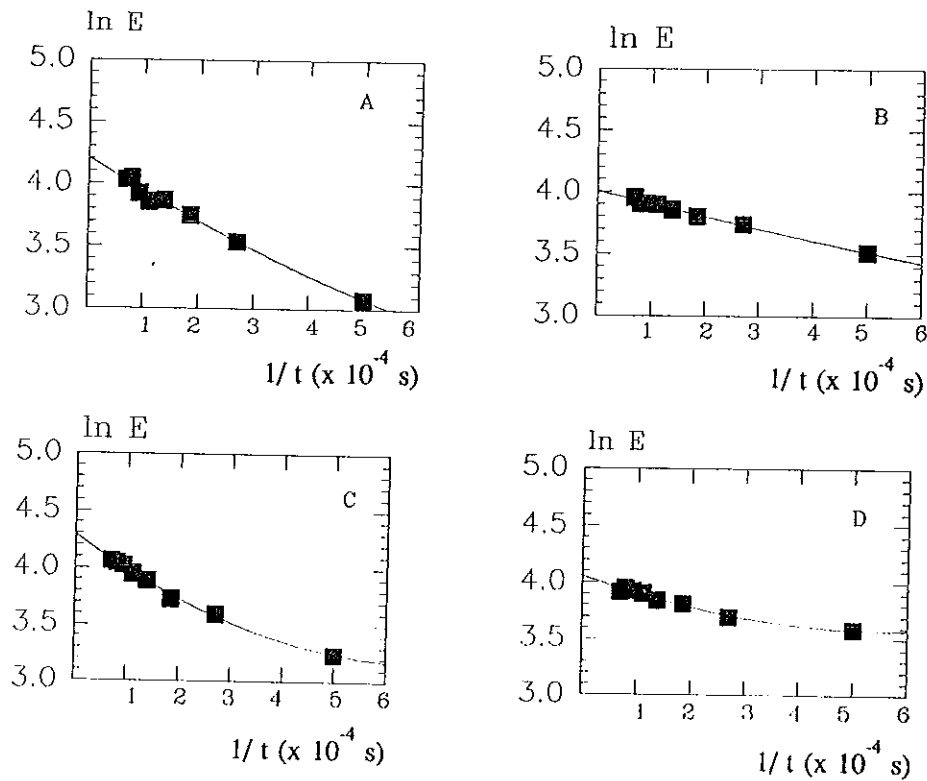
จากข้อมูลในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 ปริมาณความชื้นของขึ้นมะม่วงในการทดลองผลของค่าเรโนลด์

ชุดการทดลอง		$N_{Re} = 0$				
ซ้ำ	1	2				
เวลา (นาที)	M_t	$M_0 - M_t$	$\ln (M_0 - M_t)$	M_t (%)	$M_0 - M_t$	$\ln (M_0 - M_t)$
0	90.15	0.00		88.76	0.00	
30	68.40	21.75	3.08	55.13	33.63	3.52
60	55.71	34.44	3.54	46.57	42.19	3.74
90	47.65	42.50	3.75	43.87	44.89	3.80
120	42.32	47.83	3.87	41.49	47.27	3.86
150	42.76	47.39	3.86	39.44	49.32	3.90
180	39.52	50.63	3.93	39.15	49.61	3.90
210	32.82	57.33	4.05	39.11	49.65	3.91
240	33.78	56.37	4.03	36.57	52.19	3.96
ชุดการทดลอง		$N_{Re} = 200$				
0	91.38	0.00		89.36	0.00	
30	65.81	25.57	3.24	53.14	35.22	3.59
60	54.88	36.50	3.60	49.01	40.35	3.70
90	49.68	41.70	3.73	44.05	45.31	3.81
120	42.23	49.15	3.90	42.61	46.75	3.85
150	39.43	51.95	3.95	39.60	49.76	3.91
180	35.33	56.05	4.03	38.73	50.63	3.93
210	34.14	57.24	4.05	37.57	51.79	3.95
240	32.97	58.41	4.07	39.11	50.25	3.92

หมายเหตุ : M_0 , M_t คือปริมาณความชื้นที่สภาวะเริ่มต้น และเวลาใด ๆ (ร้อยละ)

จากข้อมูลได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(M_0 - M_t)$ กับ $1/t$ ดังรูปที่ ข.1



รูป ข.1 กราฟหาความขึ้นที่สภาวะสมดุลจากการเชื่อมมะม่วงที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์เป็น 0 (A : ซ้ำ 1, B : ซ้ำ 2) และ 200 (C : ซ้ำ 1, D : ซ้ำ 2)

นำจุดตัดบนแกน y ไปหาค่าความขึ้นที่สภาวะสมดุล (M_∞) จากสมการ

$$\ln(M_0 - M_\infty) = \text{จุดตัดบนแกน } y \quad (\text{ข8.3})$$

จากการคำนวณได้ปริมาณความขึ้นที่สภาวะสมดุลดังตารางที่ ข.2

ตาราง ข.2 ผลการคำนวณปริมาณความขึ้นที่สภาวะสมดุลจากสมการที่ (ข8.3)

N_{Re}	ซ้ำ	จุดตัดบนแกน y	ความขึ้นสมดุล (ร้อยละ)
0	1	4.20	23.46
	2	4.02	33.34
200	1	4.26	20.92
	2	4.05	31.96

2. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln E$ กับเวลา (t)

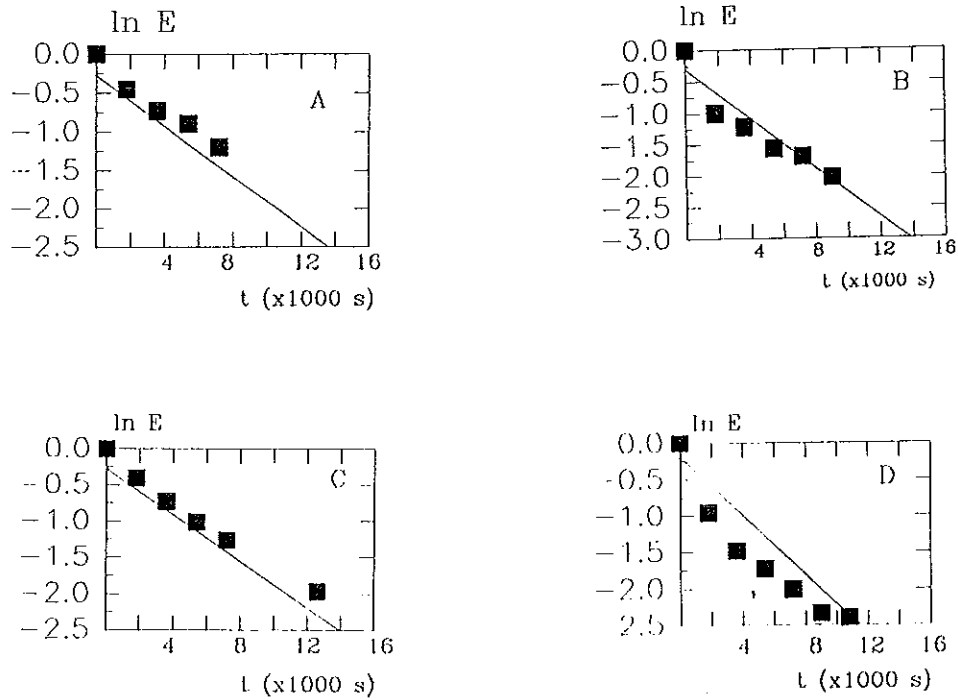
จากการข้อมูลการสุ่มตัวอย่างหาปริมาณความชื้นทุก 30 นาที และปริมาณความชื้นที่คำนวณได้ตามตารางที่ ข.2 สามารถคำนวณหาค่า E และ $\ln E$ ดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ผลการคำนวณค่า E และ $\ln E$ ในการทดลองผลของค่าเรโนลด์

ชุดการทดลอง		$N_{Re} = 0$				
ซ้ำ	1	2				
เวลา (นาที)	M_t	E	$\ln E$	M_t	E	$\ln E$
0	90.15	1.00	0.00	88.76	1.00	0.00
30	68.40	0.67	-0.40	55.13	0.38	-0.96
60	55.71	0.48	-0.73	46.57	0.23	-1.48
90	47.65	0.36	-1.01	43.87	0.18	-1.73
120	42.32	0.28	-1.26	41.49	0.13	-2.01
150	42.76	0.29	-1.24	39.44	0.10	-2.33
180	39.52	0.24	-1.42	39.15	0.09	-2.40
210	32.82	0.14	-1.97	39.11	0.09	-2.40
240	33.78	0.16	-1.86	36.57	0.04	-3.12

ชุดการทดลอง		$N_{Re} = 200$				
เวลา (นาที)	M_t	E	$\ln E$	M_t	E	$\ln E$
0	91.38	1.00	0.00	89.36	1.00	0.00
30	65.81	0.64	-0.45	53.14	0.37	-1.00
60	54.88	0.48	-0.73	49.01	0.30	-1.21
90	49.68	0.41	-0.90	44.05	0.21	-1.56
120	42.23	0.30	-1.20	42.61	0.19	-1.68
150	39.43	0.26	-1.34	39.60	0.13	-2.02
180	35.33	0.21	-1.59	38.73	0.12	-2.14
210	34.14	0.19	-1.67	37.57	0.10	-2.32
240	32.97	0.17	-1.77	39.11	0.13	-2.08

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln E$ ที่คำนวณได้จากตารางที่ ข.3 กับเวลา ดังรูปที่ ข.2



รูป ข.2 กราฟหาความลาดชันจากการเซ่อิมมะม่วงที่มีค่าเรโนลด์นัมเบอร์เป็น 0 (A : ซ้ำ 1, B : ซ้ำ 2) และ 200 (C : ซ้ำ 1, D : ซ้ำ 2)

จากกราฟรูปที่ ข.2 คำนวณหาค่าความลาดชัน (slope) ได้ดังตารางที่ ข.4

ตาราง ข.4 ผลการคำนวณความลาดชันในการทดลองผลของค่าเรโนลด์

N_{Re}	ซ้ำ	slope
0	1	-1.60×10^{-4}
	2	-2.03×10^{-4}
200	1	-1.60×10^{-4}
	2	-1.98×10^{-4}

ข.8.2 หาค่าแฟกเตอร์รูปทรง (v)

สำหรับขึ้นมะม่วงรูปทรงวงรีหาแฟกเตอร์รูปทรงจากสมการที่ (22)

$$v = 1 + \frac{1}{A'^2} + \frac{1}{B'^2} \quad (\text{ข8.4})$$

$$\text{โดย } A'^2 = \frac{b}{a} = \frac{\text{area1}}{\pi a^2} \quad (\text{ข8.5})$$

เมื่อ area1 = พื้นที่หน้าตัดตามขวาง (เมตร²)

a = ครึ่งหนึ่งของความกว้างด้านพื้นที่หน้าตัดตามขวาง
(เมตร) (รูปที่ 12)

b = ครึ่งหนึ่งของความยาวด้านพื้นที่หน้าตัดตามขวาง
(เมตร) (รูปที่ 12)

$$B'^2 = \frac{c}{a} = \frac{\text{area2}}{\pi a^2}$$

เมื่อ area 2 = ปริมาตรของของแข็ง (ลูกบาศก์เมตร)

c = ครึ่งหนึ่งของความยาวด้านพื้นที่หน้าตัดตามยาว
(เมตร) (รูปที่ 12)

ในการคำนวณหาแฟกเตอร์รูปทรงเฉลี่ย โดยนำขึ้นมะม่วงที่สุ่มในแต่ละเวลาตัดตามขวางและวาดพื้นที่หน้าตัดตามขวางบนกระดาษกราฟ หาค่า a โดยวัดพื้นที่หน้าตัดโดยเครื่องวัดพื้นที่ (Planimeter) และค่า b จากการวัดความยาวของพื้นที่หน้าตัดตามขวาง ส่วนค่า c ได้จากการคำนวณสมการ (ข8.4) โดยปริมาตรของมะม่วงหาได้ตามวิธีการในข้อ ๗.4

ข.8.3 หาค่าดริฟ (α)

ดริฟ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำเชื่อมต่อปริมาตรของสารละลายในขึ้นมะม่วง ในการคำนวณเนื่องจากค่าดริฟในแต่ละช่วงไม่คงที่ จึงหาค่าดริฟเฉลี่ยจากสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสมดุล

ตัวอย่างในการคำนวณ

สภาวะเริ่มต้น

$$\text{น้ำหนักเนื้อมะม่วง} = 700 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักน้ำเชื่อม} = 2,100 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{องค์ประกอบเฉื่อย} &= \text{เฟสของแข็ง} - \text{น้ำ} - \text{ตัวละลาย} = 1 - 0.91 - 0.056 \\ &= 0.034 \end{aligned}$$

$$\text{สัดส่วนตัวละลายในชั้นมะม่วง} = 0.056 \text{ (5.6\% ปริกซ์)}$$

$$\text{สัดส่วนตัวละลายในน้ำเชื่อม} = 0.712 \text{ (71.2\% ปริกซ์)}$$

$$\text{สัดส่วนความชื้นของมะม่วง} = 0.9138$$

$$\text{ความหนาแน่นของมะม่วง} = 1.0460 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{น้ำหนักสารละลายน้ำตาลทั้งหมดในชั้นมะม่วง}$$

$$= 700 \times [0.9138 + (0.0561 \times 0.99)]$$

$$= 678.47 \text{ กรัม}$$

ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่ 71.2° ปริกซ์ คำนวณโดยเปิดจากตารางความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (Meade and Chen, 1977)

$$= \frac{14107 - 13462}{10} \times 12 + 13462$$

$$= 1.354 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\therefore \text{ค่าดัชนี} = \frac{\left(\frac{2100}{1354}\right)}{\left(\frac{678.47}{1046}\right)} = 2.39$$

สภาวะสุดท้าย

$$\text{น้ำหนักเนื้อมะม่วง} = 305 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักน้ำเชื่อม} = 2,361 \text{ กรัม}$$

$$\text{สัดส่วนตัวละลายในชั้นมะม่วง} = 0.5447 \text{ (54.47\% ปริกซ์)}$$

$$\text{สัดส่วนตัวละลายในน้ำเชื่อม} = 0.616 \text{ (61.60\% ปริกซ์)}$$

$$\text{สัดส่วนความชื้นของมะม่วง} = 0.3297$$

$$\text{ความหนาแน่นของมะม่วง} = 1.2728 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

น้ำหนักสารละลายน้ำตาลทั้งหมดในชั้นมะม่วง

$$= 305 \times [0.3297 + (0.5447 \times 0.99)]$$

$$= 265.03 \text{ กรัม}$$

ความหนาแน่นของน้ำเชื่อมที่ 61.6°บrix คำนวณโดยเปิดจากตารางความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (Meade and Chen, 1977)

$$= \frac{1.346 - 1.285}{10} \times 1.6 + 1.2854$$

$$= 1.286 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\therefore \text{ค่าดัชนี} = \frac{\left(\frac{2361}{1264}\right)}{\left(\frac{265.03}{12728}\right)} = 8.76$$

$$\text{ดังนั้นค่าดัชนีเฉลี่ย} = (2.39 + 8.76) / 2 = 5.58$$

ข.8.4 หาค่าเซอร์วูด (Sh)

จากสภาวะ $Bi > 1$ และ $\alpha > 0.3$ สามารถหาค่าเซอร์วูดได้จากสมการที่ (17)

$$Sh = 2 \times g \left(u - \frac{v}{\alpha} + \frac{w}{\alpha^2} \right)$$

$$\text{โดย } u = 2.460 + 0.3770\eta; \eta = v - 1, \quad w = 0.0270 + 0.3531\eta$$

$$v = 0.4015 + 0.248\eta$$

$$g = 1$$

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนค่าในสมการที่ (ข8.1) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล และกรด สามารถหาได้เช่นเดียวกันกับน้ำ แตกต่างเฉพาะการหา slope โดยพลอตกราฟระหว่างความเข้มข้นในชั้นมะม่วงที่เวลาต่าง ๆ ($\ln(X_t - X_0)$) กับเวลา สำหรับการหา slope ของน้ำตาล ส่วนกรดใช้ปริมาณกรดในชั้นมะม่วงที่เวลาต่าง ๆ ($\ln(X_0 - X_t)$) กับเวลา ส่วนพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าเหมือนกัน

ภาคผนวก ค. การหาผลผลิตมะม่วงแช่อิ่มแบบชำและแบบพัฒนา

ตาราง ค การเปรียบเทียบปริมาณการสูญเสียในการผลิตมะม่วงแช่อิ่มแห้งแบบพัฒนาและแบบชำ

Material in	Weight (Kg)	Operation	Weight (Kg)	Material out
มะม่วงสด	100.00	ปอกเปลือก	76.64	มะม่วงปอกเปลือก
			23.36	เปลือก (สูญเสีย)
มะม่วงปอกเปลือก	76.64	เอาเมล็ดออก	47.01	เนื้อมะม่วง
			29.63	เมล็ด (สูญเสีย)
เนื้อมะม่วง	47.01	แช่ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{CaCl}_2$	47.95	เนื้อมะม่วงแช่สารละลาย
			0.94	สารละลาย + น้ำ (เพิ่มขึ้น)
เนื้อมะม่วงแช่สารละลาย	47.95	แช่ NaCl	45.50	เนื้อมะม่วงแช่เกลือ
			2.45	น้ำ (สูญเสีย)
เนื้อมะม่วงแช่เกลือ	45.50	ลวก	46.25	มะม่วงลวกน้ำร้อน
			0.75	น้ำ (เพิ่ม)
มะม่วงลวกน้ำร้อน	46.25	แช่อิ่มแบบชำ	38.41	มะม่วงแช่อิ่ม
			7.84	น้ำ (สูญเสีย)
		แช่อิ่มแบบพัฒนา	35.26	มะม่วงแช่อิ่ม
			10.99	น้ำ (สูญเสีย)
มะม่วงแช่อิ่มแบบชำ	38.41	ลวกน้ำร้อน	37.23	มะม่วงแช่อิ่มลวกน้ำร้อน
			1.18	น้ำ (สูญเสีย)
มะม่วงแช่อิ่มแบบพัฒนา	35.26	ลวกน้ำร้อน	33.81	มะม่วงแช่อิ่มลวกน้ำร้อน
			1.45	น้ำ (สูญเสีย)
มะม่วงแช่อิ่มลวกน้ำร้อนแบบชำ	37.23	อบแห้ง	34.96	มะม่วงแช่อิ่มแบบชำอบแห้ง
			2.27	น้ำ (สูญเสีย)
มะม่วงแช่อิ่มลวกน้ำร้อนแบบพัฒนา	33.81	อบแห้ง	32.58	มะม่วงแช่อิ่มแบบพัฒนาอบแห้ง
			1.23	น้ำ (สูญเสีย)

ภาคผนวก ง. ข้อมูลเบื้องต้น และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณระหว่างการ
แช่ส้ม

ตาราง ง.1 ข้อมูลและพารามิเตอร์สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ น้ำตาล
และกรด

ปัจจัย	ชุดการทดลอง	ซ้ำ	C' ($^{\circ}\text{Brix}$)	slope ($\times 10^{-4}$)	α	ν	a ($\times 10^{-4}$ m)	Sh		
1. ค่าเรโนลด์	$N_{Re} = 0$	1	70	-1.6	5.07	1.13	25	4.840		
		2	70	-2.03	5.18	1.22	25	4.840		
	$N_{Re} = 200$	1	70	-1.63	5.58	1.11	25	4.850		
		2	70	-1.98	5.88	1.53	35	4.860		
	2. การปั่นน้ำเชื่อม	ครั้งละ 10' บริกซ์	1	30	-1.97	3.35	1.72	37	4.758	
				40	-2.27	3.54	1.58	33	4.770	
50				-1.39	3.67	1.53	31	4.778		
60				-1.82	3.74	1.50	25	4.782		
70				-1.82	3.76	1.43	21	4.783		
2			30	-2.27	3.30	1.65	35	4.754		
			40	-2.27	3.39	1.60	31	4.761		
			50	-2.12	3.39	1.45	24	4.761		
			60	-3.03	3.29	1.33	19	4.754		
			70	-1.52	3.42	1.32	17	4.763		
ครั้งละ 20' บริกซ์		1	30	-2.12	3.38	1.72	34	4.760		
			50	-1.97	3.58	1.61	31	4.773		
			70	-2.12	3.74	1.54	24	4.782		
			2	30	-2.12	3.33	1.52	35	4.756	
				50	-3.18	3.36	1.65	31	4.758	
		70		-2.58	3.48	1.59	27	4.766		
		ไม่ปั่น	1	70	-1.97	5.73	1.54	27	4.856	
			2	70	-1.67	5.37	1.48	27	4.847	
		3. อุณหภูมิ	50 $^{\circ}\text{ซ}$	1	30	-3.00	4.46	1.58	36	4.816
					50	-3.90	6.07	1.37	24	4.763
70	-2.10				7.49	1.27	18	4.890		
2	30			-3.10	3.84	1.47	37	4.788		
	50			-4.10	5.58	1.47	28	4.853		
	70			-2.30	7.54	1.32	17	4.891		
60 $^{\circ}\text{ซ}$	1		30	-3.30	4.50	1.42	28	4.818		
			50	-4.10	6.75	1.29	17	4.878		
			70	-3.00	9.05	1.17	11	4.909		
	2		30	-3.70	3.92	1.40	29	4.792		
			50	-5.00	6.04	1.24	17	4.864		
			70	-2.25	8.17	1.23	14	4.899		

ตาราง ง.1 (ต่อ)

ปัจจัย	จุดการทดลอง	ซ้ำ	C (° Brix)	slope ($\times 10^{-4}$)	α	V	a ($\times 10^{-4}$ m)	Sh		
70°ซ		1	30	-3.20	4.27	1.37	25	4.808		
			50	-3.50	6.42	1.28	18	4.872		
			70	-2.40	8.62	1.18	12	4.904		
		2	30	-3.10	5.10	1.35	26	4.839		
			50	-3.00	8.41	1.28	17	4.902		
			70	-3.00	11.95	1.17	11	4.931		
		4. ขนาดจีนมะม่วง	หั่น 4 ชิ้น/ผล	1	30	-3.25	4.33	1.62	42	4.784
					50	-3.00	4.63	1.58	38	4.732
					70	-2.75	5.42	1.47	32	4.848
2	30			-3.25	4.01	1.49	39	4.797		
	50			-2.50	5.51	1.33	33	4.851		
	70			-3.25	6.03	1.30	30	4.863		
หั่น 6 ชิ้น/ผล	1			30	-3.5	4.63	1.58	39	4.796	
				50	-2.75	5.01	1.44	34	4.736	
				70	-2.10	5.75	1.49	32	4.857	
	2			30	-4.00	3.34	1.51	38	4.799	
				50	-3.00	5.45	1.33	34	4.837	
				70	-2.50	5.79	1.31	31	4.857	
5. การเปรียบเทียบ	แช่อบแบบซ้ำ			1	30	1.06	3.16	1.43	43	4.744
					40	-1.00	3.16	1.40	42	4.744
					50	-1.06	3.00	1.33	36	4.731
					60	-1.06	2.97	1.33	30	4.720
					70	-0.88	2.95	1.30	30	4.726
				2	30	-0.88	3.07	1.40	42	4.737
		40	-1.00		2.80	1.39	38	4.713		
		50	-0.94		3.02	1.34	37	4.733		
		60	-1.31		3.05	1.31	29	4.735		
		70	-0.75		3.08	1.28	28	4.737		
		แช่อบแบบหั่นผล	1	30	-3.50	4.63	1.58	39	4.796	
				50	-2.75	5.01	1.44	34	4.736	
				70	-2.10	5.75	1.49	32	4.857	
				2	30	-4.00	3.34	1.51	38	4.799
			2	50	-3.00	5.45	1.33	34	4.837	
				70	-2.50	5.79	1.31	31	4.857	

หมายเหตุ : C* ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวภัทราพร ยุทธาชีวิต

วัน เดือน ปีเกิด 28 พฤศจิกายน 2510

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
(ชีววิทยา)

2532