กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก

Mechanism of Chemical and Physical Changes of Osmotic Dehydrated Pineapple

จิราภรณ์ สอดจิตร์

Chiraporn Sodchit

TX558.F4 I764 2536 ฉ.2
032750
7 ก.ค. 2538
#34239

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Food Technology

Prince of Songkla University

2536

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก

ผู้เขียน นางสาวจิราภรณ์ สอดจิตร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณดร)

.....กรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณดร)

.....กรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)

.....กรรมการ
(อาจารย์สุรสิทธิ์ ประสารปราน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....

(ดร. ไพรัตน์ สงวนไทร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก

ผู้เขียน นางสาวจิราภรณ์ สอดจิตร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร

ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วการกวนน้ำเชื่อม อุณหภูมิ ความเข้มข้นน้ำเชื่อม ขนาดและรูปร่างของสับปะรด พบว่าการกวนน้ำเชื่อมที่ความเร็วใบพัด 0 ถึง 250 รอบต่อนาที (ค่าเรนโนลนัมเบอร์ 0-175) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนการกวนน้ำเชื่อมที่ความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที (ค่าเรนโนลนัมเบอร์ 209) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงสุดเนื่องจากมีการฉีกขาดของชิ้นสับปะรด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลและการสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรดสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำสั้นลง เมื่ออุณหภูมิในการออสโมซิสสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงมีข้อจำกัดทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการวัดแรงเฉือนของชิ้นสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 60 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสนิ่มและสูญเสียกลิ่นรสไปจากธรรมชาติ

ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อกลไกการเปลี่ยนแปลง พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 40 ถึง 60 องศาบริกซ์ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 70 องศาบริกซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลลดลงอย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลและการสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อม ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่สูงขึ้นมีผลให้เวลาล่าช้า

เนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำลดลง แต่ไม่มีผลต่อเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาล เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก ที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่างกันมาศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า สับปะรดที่ออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง ได้คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงสุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)

ขนาดและรูปร่างของสับปะรดมีผลต่อกลไกการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดต่ำกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น และยังให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นสับปะรดสูงกว่าด้วย

การอบแห้งสับปะรดหลังออสโมซิสโดยใช้ลมร้อน 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง พบว่าไม่มีระยะการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งมีความสัมพันธ์กับความชื้นในลักษณะเชิงเส้น โดยที่อัตราการอบแห้งลดลงเมื่อความชื้นลดลง การศึกษาซอร์ฟชั่นไอโซเทอมที่อุณหภูมิ 30 °ซ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้ง พบว่าผลิตภัณฑ์สุดท้ายควรมีค่าความชื้นร้อยละ 15 (วอเตอร์แอคติวิตี=0.60) คุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้งด้วยวิธีออสโมติก ได้รับคะแนนการยอมรับด้าน สีเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวมสูงกว่าผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

Thesis title Mechanism of Chemical and Physical Changes of Osmotic Dehydrated Pineapple

Author Miss Chiraporn Sodchit

Major program Food Technology

Academic year 1992

Abstract

Factors affecting the mechanisms of physical and chemical changes in the osmotic dehydration of pineapple containing serverity of agitation, temperature, concentration of sucrose, size and shape of pineapple were studied. It was found that agitation at the speed of 0 to 250 rpm (Reynolds number of 0-175) did not significantly affect the sugar diffusivity. However, at the agitation speed of 300 rpm (N_{Re}=209), the sugar diffusivity was sharply increased due to the damage of pineapple's surface. Higher osmotic temperature was associated with higher sugar and water diffusivities. Thus the sugar and water transfer rates were accordingly increased. On the otherhand, time delayed due to plasmolysis corresponding to sugar and water transfer were shorten as temperature increased. However, use of high osmotic temperature had some limitation. It was indicated by shear force test that the product subjected to osmosis at temperature of 60 °C for 5 h. had a soft texture and significantly lost their natural odor and flavor.

The effect of sucrose concentration on the mechanism of changes was investigated. It was evident that, at the sucrose concentration range of 40-60 °Brix, change in sugar diffusivity was not detected. However, at sucrose concentration of 70 °Brix, a clearly reduced diffusivity of sugar was observed. As the sucrose concentration was increased, the rates of solid gain and water loss were accordingly increased. Whereas the sucrose concentration did not affect the time delayed due to plasmolysis of sugar, it showed a profound effect of the time delayed due to plasmolysis of water. The result of organoleptic test showed that product acceptibility did not significantly change through out the experiment using the sucrose concentration range of 60 to 70 °Brix for 5-7 h. of osmotic dehydration.

After osmotic dehydration, the water was further removed in a hot air dryer (65 °C) for 9 h. The period of constant drying rate was not observed. Drying rate is linearly related to the moisture content. As the moisture content was reduced the drying rate was according decreased. The study of sorption isotherm at 30 °C indicated that the final product should have moisture content of 15% (a_w = 0.60). The sensory acceptability of osmotic dehydrated pineapple was significantly superior than those of similar product commercially available in Hatyai market.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัตน์ โสภโณดร ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณอาจารย์สุรสิทธิ์ ประสารปราน กรรมการผู้แทนภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาคริต ทองอุไร กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องในภาควิชาฯ ที่สละกำลังกายและให้กำลังใจตลอดมา รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามที่ให้ความช่วยเหลือ

จิราภรณ์ สอดจิตร์

สารบาญ

	หน้า
ตัวย่อและสัญลักษณ์	ช
รายการตาราง	ฎ
รายการรูป	ฒ
บทนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด	4
กระบวนการออสโมซิส	7
การใช้โมเดลสำหรับการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก	10
ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่	13
ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิส	15
ปัญหาคุณภาพทางเคมีและกายภาพของผลไม้แห้งด้วยวิธีออสโมติก	29
วัตถุประสงค์	35
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	46
บทสรุป	99
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	107
ภาคผนวก ข แบบทดสอบชิม	113
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออสโมซิสและการอบแห้ง	114

สารบาญ (ต่อ)

		หน้า
ภาคผนวก ง	การคำนวณพื้นที่ผิวของสับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และรูปร่างเป็นแว่น	123
ภาคผนวก จ	วิธีการวัดและการคำนวณความหวานของผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้ง	124
ภาคผนวก ฉ	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำ	126

ตัวย่อและสัญลักษณ์

A_1	พื้นที่ผิวของสับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
A_2	พื้นที่ผิวของสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น
a_1	ครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นสับปะรด
a_2	ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นสับปะรด
B_1	พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับสมการการทำนายวอเตอร์แอคติวิตี
B_2	พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับสมการการทำนายวอเตอร์แอคติวิตี
BS_o	ความหวานเริ่มต้นของน้ำเชื่อม
C	ความเข้มข้นของสารละลายหรือของน้ำในชิ้นผลไม้
C_o	ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม
C_∞	สัดส่วนของน้ำที่สภาวะสมดุล
C_{ws}	สัดส่วนของน้ำในสารละลายน้ำตาลที่เวลาเริ่มต้น
D	สัมประสิทธิ์การแพร่
D_1	เส้นผ่าศูนย์กลางของใบมีด
D_s	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล
D_w	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ
d	ค่าเฉลี่ยของของแข็งที่ละลายได้
E_s	การแพร่ของน้ำตาล
E_w	การแพร่ของน้ำ
F_1	ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นแผ่นราบ
F_2	ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก
I_1	สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อย (inert composition) ภายในชิ้นสับปะรดเริ่มต้น
I_2	สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยที่ออกไปจากชิ้นสับปะรด
I_3	สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยที่เข้าไปในชิ้นสับปะรด

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

I_4	สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยภายในชิ้นสับปะรดหลังออสโมซิส
J	lag factor
L	ครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นผลไม้
M_1	สัดส่วนของความชื้นของสับปะรดเริ่มต้น
M_2	สัดส่วนของความชื้นของสับปะรดที่สูญเสีย
M_3	สัดส่วนของความชื้นที่ออสโมซิสเข้าไปในชิ้นสับปะรด
M_4	สัดส่วนของความชื้นสุดท้ายของชิ้นสับปะรด
M_o	ความชื้นของชิ้นผลไม้ที่เวลาเริ่มต้น
M_t	ความชื้นของชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ
M_e	ความชื้นของผลไม้ที่เวลาสมดุล
N	จำนวนรอบของใบพัดในการกวน
N_{Re}	เรนโนลนัมเบอร์
P_i	น้ำหนักของชิ้นสับปะรดก่อนอบแห้ง
P_o	น้ำหนักของชิ้นสับปะรดหลังอบแห้ง
q_n	รากของสมการ : $\tan q_n = -\alpha q_n$
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
R_D	อัตราส่วนน้ำหนักเริ่มต้นของสารละลายน้ำตาลต่อน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นผลไม้
S	ความลาดชัน
S_1	สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดเริ่มต้นไม่คิดองค์ประกอบเฉื่อย
S_2	สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดที่สูญเสีย
S_3	สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดที่เพิ่มขึ้น
S_4	สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดหลังออสโมซิส
S_t	ความเร็วใบพัดในการกวน

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

SG	ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)
SG_t	น้ำหนักของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ
SG_∞	น้ำหนักของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชิ้นผลไม้ที่จุดสมดุล
T	อุณหภูมิ
t	เวลา
t_c	เวลาวิกฤต
t_p	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส
V	ปริมาตรส่วนโมลของน้ำ
V_1	ปริมาตรของสับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
V_2	ปริมาตรของสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น
V_A	ปริมาตรต่อโมลของตัวทำละลาย
W	น้ำหนักของน้ำในชิ้นสับปะรด
W_∞	น้ำหนักของน้ำในชิ้นสับปะรดที่จุดสมดุล
W_1	น้ำหนักของชิ้นผลไม้ที่เวลาเริ่มต้น
W_2	น้ำหนักของชิ้นสับปะรดที่สูญเสีย
W_3	น้ำหนักของชิ้นสับปะรดที่เพิ่มขึ้น
W_4	น้ำหนักของชิ้นสับปะรดหลังออสโมซิส
W_f	น้ำหนักของชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ
W_s	น้ำหนักของสารละลายน้ำตาลที่เวลาเริ่มต้น
WF_∞	สัดส่วนของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นผลไม้ที่จุดสมดุล
WL	ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากชิ้นสับปะรด (ร้อยละ)
WL_t	น้ำหนักของน้ำที่สูญเสียจากชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ
WL_∞	น้ำหนักของน้ำที่สูญเสียจากชิ้นผลไม้ที่เวลาจุดสมดุล

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

x	สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดที่เวลาใด ๆ
x_o	สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดที่เวลาเริ่มต้น
x_e	สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดที่เวลาจุดสมดุล
x_L	ระยะทางจากจุดกึ่งกลางถึงขอบนอกของชิ้นผลไม้
XS_i	สัดส่วนของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดก่อนอบแห้ง
XS_o	สัดส่วนของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดหลังอบแห้ง
Y	น้ำหนักของของแข็งที่ละลายได้ในชิ้นสับปะรด
Y_∞	น้ำหนักของของแข็งที่ละลายได้ในชิ้นสับปะรดที่จุดสมดุล
Z	น้ำหนักขององค์ประกอบเฉื่อย
δ	แรงดูด
α	อัตราส่วนของของสารละลายน้ำตาลต่อชิ้นผลไม้
γ_1	ค่าแฟคเตอร์ในการคำนวณหา t_p สำหรับของแข็งที่มีรูปร่างเป็นแผ่นราบ
γ_2	ค่าแฟคเตอร์ในการคำนวณหา t_p สำหรับของแข็งที่มีรูปร่างทรงกระบอก
ρ	ความหนาแน่นของสารละลาย
μ	ความหนืดของสารละลาย

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดของไทยในช่วงเดือนมกราคม ถึงสิงหาคม 2534	5
2	องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวีย	5
3	ประเภทและปริมาณคาร์โบไฮเดรทในสับปะรด	6
4	ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และการสูญเสียวิตามินซี ที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อมซูโครส 50 60 และ 70 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 4:1 ทำการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 28 °ซ	31
5	ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและเรนโนลนัมเบอร์ในการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ เวลา 160 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	47
6	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	51
7	ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	53
8	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการออสโมซิสต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดที่ทำการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	56

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
9	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการออสโมซิสต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	60
10	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมและเวลาในการออสโมซิสต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลของสับปะรดที่ทำการออสโมซิส โดยใช้อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	71
11	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมและระยะเวลาในการออสโมซิสต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำการออสโมซิส โดยใช้อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	76
12	คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิส โดยใช้ความเข้มข้นน้ำเชื่อมและเวลาในการออสโมซิสที่แตกต่างกัน	80
13	ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำในกระบวนการออสโมซิส	82
14	ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำในกระบวนการออสโมซิส	86
15	คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก จากการทดลองและสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่	95
16	องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดสด ผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลองและสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่	96

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค1	ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าเรนโนลนัมเบอร์ที่คำนวณได้	114
ฉ1	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 และความหนืดของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	126
ฉ2	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	126

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1	การถ่ายเทมวลสารระหว่างภายในเซลล์ และสสารภายนอก	8
2	โมเดลการออสโมซิส	8
3	ผลของเวลาต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยไม่มีการกวน ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส 50 และ 70 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 40 °ซ	14
4	ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยไม่มีการกวนที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °ซ	14
5	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติก โดยไม่มีการกวน เมื่อใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีความเข้มข้น 50 60 และ 70 องศาบริกซ์	16
6	ผลของการกวนต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลที่ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมซูโครสที่อุณหภูมิ 21 °ซ, เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนผลไม้ต่อน้ำเชื่อม 1:4	20
7	ผลการหมุนเวียนน้ำเชื่อมโดยการปั๊ม ต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลที่ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมอินเวอร์ต ที่ความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ อุณหภูมิ 49 °ซ อัตราส่วนผลไม้ต่อน้ำเชื่อม 1:4	21
8	ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการออสโมซิสชิ้นแอปเปิ้ลด้วยวิธีออสโมติกในน้ำเชื่อมซูโครสและน้ำเชื่อมอินเวอร์ต (ก) และน้ำตาลเม็ด (ข)	23
9	ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำ (▲) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (△) ของสับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกในสารละลายน้ำตาลซูโครส 70 องศาบริกซ์ จุดที่ลูกศรชี้คือจุดสมดุลของการแพร่	25

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
10	การสูญเสียน้ำ (O) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (Δ) ของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก โดยใช้น้ำเชื่อมซูโครสเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	25
11	ผลของความเข้มข้นของน้ำตาลต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก	27
12	การสูญเสียน้ำ (O) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (▲) ของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติกที่อุณหภูมิ 20 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	27
13	การสูญเสียน้ำ (WL) การสูญเสียน้ำหนัก (WR) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (SG) ของแอปเปิ้ลที่มีรูปร่างแตกต่างกัน	30
14	ถังออสโมซิส	37
15	การเตรียมวัตถุดิบก่อนการออสโมซิส	40
16	ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ เวลา 160 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	47
17	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	51
18	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	53

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
19	ผลของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	57
20	ผลของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดจากการทดลอง (○) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2525) (□)	58
21	ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	61
22	ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดจากการทดลอง (○) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)	62
23	ผลของอุณหภูมิต่อ tp ของน้ำตาล (ก) และ tp ของน้ำ (ข) ในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	64
24	ผลของระยะเวลาในการออสโมซิสสับปะรดต่อแรงเฉือนสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °ซ	62
25	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรด ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	69
26	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิสจากการทดลอง (○) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)	70

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
27	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	73
28	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส จากการทดลอง (○) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)	74
29	ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อ tp ของน้ำตาล (ก) และ tp ของน้ำ (ข) ในสับปะรดที่มีการออสโมซิส ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	77
30	ผลของรูปร่างต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	84
31	ผลของรูปร่างต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1	85
32	ซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรดอบแห้งด้วยวิธีออสโมติกจากการทดลอง ที่อุณหภูมิ 30 °ซ ←-----→ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Wolf และคณะ (1973) ที่อุณหภูมิ 25 °ซ (——·——) และ 45 °ซ ←– –→	88
33	ผลของเวลาในการอบแห้งต่อความชื้นของสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิส เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	90
34	ผลของเวลาในการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งของสับปะรดที่ผ่านการ ออสโมซิส เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	91
35	ผลของความชื้นในชิ้นสับปะรดต่ออัตราการทำแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิในการ อบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง	93

บทนำ

สับปะรด (Ananas comosus (L.) Merr.) เป็นพืชเมืองร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นที่นิยมของผู้บริโภคชนิดหนึ่ง นอกจากใช้บริโภคสดแล้วยังสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอย่างอื่นได้เช่น สับปะรดกระป๋อง น้ำสับปะรด สับปะรดแช่เยือกแข็ง ไวน์สับปะรด แยมสับปะรด และสับปะรดอบแห้ง เป็นต้น

การอบแห้งเป็นกรรมวิธีการแปรรูปผลไม้วิธีหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งปัจจุบันผลไม้อบแห้งกลายเป็นสินค้าส่งออกของประเทศไทยที่มีลู่ทางในการขยายการผลิตและการตลาดสูงมาก เนื่องจากมีวัตถุดิบในประเทศมาก และขณะเดียวกันความต้องการของตลาดทั้งภายในและต่างประเทศก็มีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการผลิตผลไม้อบแห้งของประเทศไทยในปัจจุบันยังประสบปัญหาด้านการตลาดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผู้บริโภคภายในประเทศส่วนมากนิยมบริโภคผลไม้สด ฉะนั้นตลาดผลไม้อบแห้งในประเทศค่อนข้างมีจำกัดอยู่เฉพาะในกลุ่มลูกค้าวัยเด็กและวัยรุ่นเป็นส่วนมาก ตลาดหลักของอุตสาหกรรมประเภทนี้จึงอยู่ในต่างประเทศ ที่สำคัญคือ สหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ เยอรมัน อังกฤษ ญี่ปุ่น สิงคโปร์ ฝรั่งเศส และ เนเธอร์แลนด์ ประเทศคู่แข่งที่สำคัญในภูมิภาคเอเชียสำหรับผลไม้อบแห้งประเภท มะละกอ กล้วย และสับปะรด ได้แก่ไต้หวัน ส่วนผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งคู่แข่งที่สำคัญได้แก่ ฟิลิปปินส์ (ธนาคารกสิกรไทย, 2531; ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด, 2534) นอกจากปัญหาทางการตลาดยังมีปัญหาที่สำคัญคือ ปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปการผลิตผลไม้อบแห้งแบบดั้งเดิมใช้ความร้อนสูงและเวลานานเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสีย สี กลิ่นรสไปจากธรรมชาติ และเนื้อสัมผัสนิ่ม ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพ จึงได้มีการพัฒนานำเอาเทคนิคการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก (osmotic dehydration) มาใช้โดยมีผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับและยังคงคุณค่าทางอาหารใกล้เคียงกับผลไม้สด (Smogyi and Luh, 1975)

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก เป็นการดึงน้ำออกจากผลไม้ โดยการแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกสูง (hypertonic solution) และวอเตอร์แอคติวิตี

(a_w : Water activity) ต่ำ น้ำจากชิ้นผลไม้จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นเนื้อเยื่อบาง ที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้ (semi-permeable membrane) ออกสู่สารละลายภายนอก ทำให้ปริมาณน้ำในชิ้นผลไม้ลดลงและปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก ยังช่วยรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากวิธีการนี้ไม่ใช้อุณหภูมิสูงจึงเกิดการสูญเสีย สี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัส เนื่องจากความร้อนน้อยมาก สีของผลิตภัณฑ์จึงสดเหมือนธรรมชาติ

สับปะรดอบแห้งของประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในการส่งออกโดยในปี 2533 ไทยส่งออกสับปะรดอบแห้งปริมาณ 2 ตัน มูลค่า 0.09 ล้านบาท และในปี 2534 ไทยส่งออกสับปะรดอบแห้ง ปริมาณ 3 ตัน มูลค่า 0.44 ล้านบาท (สนอง ปาสลุง, 2535) แต่ยังมีปัญหาหลายประการที่ควรได้รับการแก้ไข เพื่อสนับสนุนการส่งออกให้ขยายตัวเพิ่มขึ้น เช่นปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำและต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก คาดว่าสามารถนำมาปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมตามความต้องการของผู้บริโภคและอุตสาหกรรม ลดต้นทุนในการผลิต ประหยัดแรงงานและพลังงาน นอกจากนี้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้ยังสามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการผลิต

การตรวจเอกสาร

สับปะรดมีชื่อทางพฤษศาสตร์ว่า Ananas comosus (L.) Merr. จัดเป็นไม้ผลในวงศ์ Bromeliaceae เป็นพืชเมืองร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นที่นิยมของผู้บริโภคชนิดหนึ่ง สับปะรดมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ ในยุโรปตั้งชื่อว่า "Fruit of King" สับปะรดจัดอยู่ในจำพวกไม้ดิน (terrestrial) ที่ยังคงมีลักษณะบางประการของไม้อากาศ (epiphyte) เอาไว้ คือสามารถเก็บน้ำเอาไว้ตามซอกใบได้เล็กน้อย ทำให้ทนทานต่อช่วงแห้งแล้งได้ดี สับปะรดที่ทำการปลูกเป็นการค้าทั่วโลกแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กลุ่มไคยีน (cayenne) กลุ่มควีน (queen) กลุ่มสแปนนิส (spainase) และกลุ่มอะบาคาซีส (abacaxis) (จารุพันธ์ ทองแถม, 2526) ส่วนสายพันธุ์สับปะรดที่นิยมปลูกเป็นการค้าในประเทศไทยที่สำคัญมีอยู่ 4 สายพันธุ์ (วิจิตต์ วรรณชิต, 2529) ได้แก่

สายพันธุ์ปัตตาเวีย เป็นสับปะรดที่จัดอยู่ในกลุ่มไคยีน ปลูกกันทั่วทุกภาค มีชื่อเรียกแต่ละแหล่งแตกต่างกัน เช่น สับปะรดศรีราชา สับปะรดตาดำ หรือสับปะรดปราณบุรี เป็นต้น มีน้ำหนักเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัม รูปร่างแตกต่างกันหลายแบบ เช่น คล้ายรูปกรวย รูปทรงกระบอก รูปทรงกลม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วัสดุปลูกและสภาพในการเจริญเติบโตของต้น การใช้ประโยชน์ของผลนิยมบริโภคสด และนำผลมาแปรรูปเป็นสับปะรดกระป๋อง แหล่งปลูกสับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวียเพื่ออุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋องปลูกกันมากในภาคกลาง แหล่งปลูกที่ใหญ่ที่สุดคือ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งผลิตได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของสับปะรดที่ผลิตได้ในประเทศไทย รองลงมาคือจังหวัดเพชรบุรี ภาคตะวันออกปลูกมากที่จังหวัดชลบุรี ระยอง ภาคเหนือปลูกมากที่จังหวัดลำปาง ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ปลูกกันน้อยมาก

สายพันธุ์ภูเก็ต เป็นสับปะรดที่อยู่ในกลุ่มควีน นิยมปลูกกันมากในจังหวัดภาคใต้ โดยเฉพาะจังหวัดภูเก็ตและพังงา ปลูกเพื่อใช้บริโภคสดเท่านั้นไม่มีการนำไปแปรรูปเป็นสับปะรดกระป๋อง ลักษณะของสับปะรดสายพันธุ์ภูเก็ต ใบจะแคบและสั้นกว่าสับปะรดสาย

พันธุ์ปัตตาเวีย ขอบใบทั้ง 2 ข้างมีหนามตลอด ผลมีขนาดเล็ก ตานูน รูปร่างของผลเป็นทรงกระบอก เนื้อผลสีเหลือง แกนผลเล็ก เนื้อกรอบ กลิ่นและรสชาติดี

สายพันธุ์อินทรชิต เป็นสับปะรดที่อยู่ในกลุ่มสแปนนิส ได้รับความนิยมในการปลูกและบริโภคน้อยกว่าสายพันธุ์ปัตตาเวีย และสายพันธุ์ภูเก็ต สับปะรดสายพันธุ์อินทรชิตมีการนำมาปลูกในประเทศไทยนานมาแล้ว จนเรียกกันทั่ว ๆ ไปว่าพันธุ์พื้นเมือง แหล่งปลูกที่สำคัญในปัจจุบันคือ ในท้องที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ลักษณะของสายพันธุ์อินทรชิต ซึ่งมี 2 ชนิดคือ อินทรชิตแดงและอินทรชิตขาว จะมีลำต้นแข็งแรง ใบมีหนามตลอดขอบทั้ง 2 ข้าง ใบที่ก้านผลจะมีสีแดงสำหรับอินทรชิตแดง และสีเหลืองอมเขียวสำหรับอินทรชิตขาว ผลมีขนาดปานกลาง รูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกระบอก เมื่อแก่จัดผลจะมีสีส้มถึงสีเหลืองทอง เนื้อผลมีสีเหลืองเข้มถึงเหลืองทอง เยื่อใยมาก รสหวาน

สายพันธุ์นางแล เป็นสับปะรดที่จัดเป็นสายพันธุ์ย่อยของสับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวีย ทั้งนี้เนื่องจากมีลักษณะ ลำต้น ใบ ดอก และรูปลักษณะทั่วไปคล้ายคลึงสับปะรดกลุ่มไคยีน สับปะรดพันธุ์นี้กล่าวกันว่ามีผู้นำพันธุ์จากศรีลังกามาปลูกไว้ที่ตำบลนางแล อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และขยายพันธุ์เพิ่มเนื้อที่ปลูกออกไปเรื่อย ๆ เนื่องจากมีรสชาติดีเป็นที่นิยมของตลาด

เนื้อที่ในการเพาะปลูกสับปะรดในปี 2534 ทั้งประเทศรวม 0.51 ล้านไร่ ผลผลิต 1.93 ล้านตัน และผลผลิตเฉลี่ย 3.876 กิโลกรัมต่อไร่ ในเดือนมกราคม-สิงหาคม 2534 ไทยส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดทุกชนิดรวม 325,839 ตัน มูลค่า 6,503.85 ล้านบาท ซึ่งรายละเอียดของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีดังแสดงในตารางที่ 1

องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด

องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรดจะแตกต่างไปตามพันธุ์ พื้นที่ที่ใช้ปลูก วิธีปลูก และความอ่อนแก่ของสับปะรดขณะเก็บเกี่ยว องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรดผลสุกรับประทานได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดของไทยในช่วงเดือนมกราคมถึงสิงหาคม 2534

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
สับปะรดกระป๋อง	267,666	4,519.74
น้ำสับปะรด	49,936	1,712.84
สับปะรดกวน	4,659	202.44
สับปะรดแช่แข็ง	3,575	68.44
สับปะรดอบแห้ง	3	0.44

ที่มา : ดัดแปลงจาก สนอง ป่าสลุง (2535)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวีย

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ปริมาณน้ำ	81.2-86.2
ค่าความเป็นกรดในรูปกรดซิตริก	0.60-1.62
ปริมาณน้ำตาล (องศาบริกซ์)	10.8-17.5
เส้นใย	0.30-0.61
เถ้า	0.30-0.42
ไนโตรเจน	0.045-0.115

ที่มา : Dull (1971)

ปริมาณคาร์โบไฮเดรทในผลไม้มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนกิจกรรมของเมตาโบลิซึม เมื่อผลไม้แก่หรือสุกจะมีปริมาณแป้งลดลง เพราะเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล รสหวานของผลไม้เกิดจาก กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ซึ่งจะหวานมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดและปริมาณของน้ำตาลแต่ละชนิด อีกส่วนหนึ่งของคาร์โบไฮเดรทคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารเพคตินที่อยู่ตามผนังเซลล์ ซึ่งร่างกายไม่สามารถย่อยได้จึงไม่มีความสำคัญในแง่ที่ให้คุณค่าทางอาหาร แต่มีประโยชน์ต่อการขับถ่ายและสำคัญต่อลักษณะเนื้อของผลไม้ สำหรับคาร์โบไฮเดรทในสับปะรดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ประเภทและปริมาณคาร์โบไฮเดรทในสับปะรด

ประเภทคาร์โบไฮเดรท	ปริมาณ (ร้อยละ)
กลูโคส	1.0-3.2
ฟรุคโตส	0.6-2.3
ซูโครส	5.9-12.0
แป้ง	<0.002
เซลลูโลส	0.43-0.54
เฮกโซแซน	0.10-0.15
เพนโตแซน	0.33-0.43
เพคติน	0.06-0.16

ที่มา : Dull (1971)

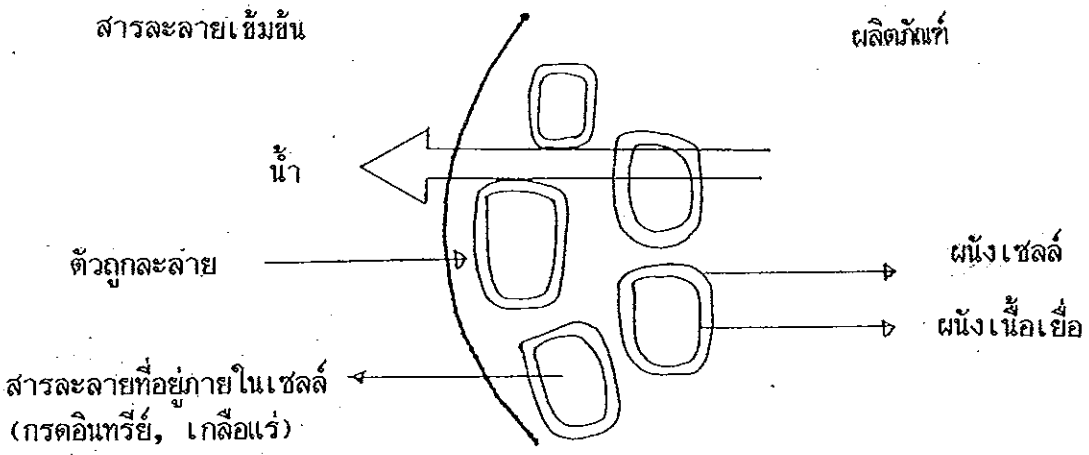
กระบวนการออสโมซิส

การออสโมซิส คือ การแพร่ของน้ำจากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ผ่านเนื้อเยื่อที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้ ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง (Ponting, et al., 1966)

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก หมายถึงการดึงน้ำออกจากชิ้นวัตถุดิบ โดยการแช่วัตถุดิบในสารละลายที่มีแรงดันออสโมติกสูงกว่า และค่าวอเตอร์แอคติวิตีที่ต่ำกว่า ของสารละลายภายนอก ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของวัตถุดิบกับสารละลายภายนอก เกิดเป็นแรงขับที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัตถุดิบ และสารละลายภายนอก น้ำจะซึมผ่านชั้นเนื้อเยื่อบางที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้ และทำให้ปริมาณน้ำในชิ้นวัตถุดิบลดลงและปริมาณของแข็งในชิ้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น (Conway, et al., 1983)

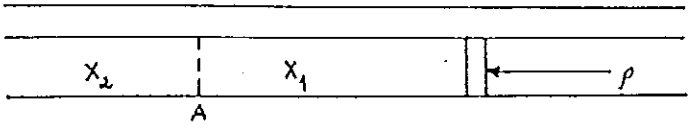
การถ่ายโอนมวลสารในระหว่างกระบวนการออสโมซิส ในระหว่างการทำแห้งผลไม้ด้วยวิธีออสโมติก มีการไหลหรือการเคลื่อนที่ของสสารในลักษณะสวนทางกัน กล่าวคือ เกิดการแพร่ของน้ำและสารบางอย่างซึ่งมีอยู่ภายในเซลล์โดยธรรมชาติ เช่น กรดอินทรีย์ เกลือแร่ เป็นต้น ออกจากเซลล์ผลไม้ ไปยังสารละลายภายนอก และเกิดการแพร่ของน้ำตาลจากสารละลายภายนอกเข้าไปยังเซลล์ผลไม้ (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533) ดังแสดงในรูปที่ 1 ขณะที่ผลไม้แช่อยู่ในน้ำเชื่อม น้ำจะซึมผ่านเนื้อเยื่อที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้เร็วกว่าน้ำตาล ดังนั้นถ้าแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อมเป็นระยะเวลาไม่นาน น้ำจะซึมออกจากเซลล์ผลไม้ได้มากกว่าน้ำตาลซึมเข้าสู่เซลล์ผลไม้ และน้ำตาลที่ซึมเข้าสู่เซลล์ผลไม้จะซึมได้เฉพาะบริเวณรอบชิ้นผลไม้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ มีผลทำให้ปริมาณน้ำในผลไม้ลดลง และปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำตาลซึมเข้าไป (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529; อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533)

Crafis และคณะ (1949) ได้แสดงโมเดลของการออสโมซิสอย่างง่ายไว้ดังแสดงในรูปที่ 2 สมมุติให้ X_1 และ X_2 เป็นสารละลายชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 ตามลำดับ สารละลายทั้ง 2 นี้จะถูกกั้นจากกันด้วยเนื้อเยื่อที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้(A) โมเลกุล



รูปที่ 1 การถ่ายโอนมวลสารระหว่างภายในเซลล์ และสารละลายภายนอก

ที่มา : อ่อนรวี รัตนาพันธุ์ (2533)



รูปที่ 2 โมเดลการออสโมซิส

ที่มา : Crafis และคณะ (1949)

ของน้ำจะเคลื่อนตัวจากบริเวณที่มีความดันสูงไปสู่บริเวณที่มีค่าความดันต่ำกว่า ถ้าให้ P_1 และ P_2 เป็นค่าความดันไอของน้ำ ในสารละลายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อ P_2 มากกว่า P_1 โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวผ่านเนื้อเยื่อที่ยอมให้สารบางอย่างผ่านได้ จากสารละลายที่ 2 ไปยังสารละลายที่ 1

หากต้องการให้เกิดสภาวะสมดุลระหว่างสารละลายทั้งสอง นั่นคือไม่เกิดการถ่ายเทมวลสารจะต้องให้แรงดัน (π) ทางด้านสารละลายที่ 1 ค่าแรงดันดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\pi = \frac{RT}{V} \ln \frac{P_2}{P_1}$$

เมื่อ R = ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant = 82.0 cm^3.atm. K.$mole^{-1}$)

T = ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) (K)

V = ค่าปริมาตร/ส่วนโมลของน้ำ (partial molal volume)(cm^3.$mole^{-1}$)

ค่า π นี้อาจเรียกว่าแรงดูด (suction force) เมื่อค่า π เป็นบวกแสดงว่าต้องใช้แรงดันด้านสารละลายที่ 1 ถ้าค่านี้มีค่าเป็นลบแสดงว่าต้องใช้แรงดันในด้านสารละลายที่ 2

การแพร่ของมวลสารในเนื้อเยื่ออาหาร

การแพร่ คือ การส่งผ่านมวลสารโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบสุ่ม จากส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเข้มข้นสูงไปยังอีกส่วนหนึ่งของระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ ในระหว่างการออสโมซิสจะเกิดการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลายในลักษณะที่สวนทางกัน ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผักและผลไม้ ของแข็งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารที่เป็นรูพรุน (porous) หรือเนื้อเยื่อ (cellular substance) ซึ่งมีก๊าซหรือของเหลวก๊กอยู่ภายใน การแพร่ของก๊าซ ไอน้ำ และของเหลวในของแข็ง ค่อนข้างจะยุ่งยากกว่าการแพร่ในของ

เหลว ทั้งนี้เนื่องจากของแข็งมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่แพร่ออกมาได้ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลในของแข็งจะช้ากว่าในของเหลว (Crank, 1970)

Crank (1970) ได้กล่าวไว้ว่า อัตราการส่งผ่านมวลสารโดยการแพร่ของโมเลกุลในสภาวะที่ไม่คงที่ สามารถทำนายได้โดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของฟิกก์ (Fick's second law) และพบว่าอาหารส่วนใหญ่มีโครงสร้างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริงได้ เนื่องจากการแพร่ของสารถูกละลายเกิดขึ้นมากมายในเนื้อเยื่ออาหาร เพราะฉะนั้นจึงสมมุติให้การส่งผ่านมวลสารเกิดขึ้นในทิศทางเดียวและเรียกสัมประสิทธิ์การแพร่ใหม่ว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ

การใช้โมเดลสำหรับการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก

Conway และคณะ (1983) ได้นำโมเดลทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โมเดลสำหรับการแพร่ในทิศทางเดียวของน้ำจากผลไม้ไปยังน้ำเชื่อม สามารถแสดงในสมการที่ (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_L^2} \qquad (1)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารถูกละลายหรือของน้ำในชิ้นผลไม้

t = เวลา

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffussion coefficient)

x_L = ระยะทางจากจุดกึ่งกลางถึงขอบนอกของชิ้นผลไม้

การคำนวณภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของน้ำในชิ้นผลไม้ที่เวลาเริ่มต้นเป็น C_o สำหรับค่า x อยู่ระหว่าง L ถึง -L (-L< X <L) เมื่อ L = ครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นผลไม้

2. อัตราการซึมออกของน้ำจากผลไม้เท่ากับปริมาณน้ำที่เข้าไปในสารละลายน้ำตาล

พารามิเตอร์ที่จะนำไปฟิต (fit) โมเดลคือ การสูญเสียน้ำจากชิ้นผลไม้ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล Crank (1975) ได้ให้ผลเฉลยของสมการ (1) เป็นไปตามสมการที่ (2)

$$\frac{WL_t}{WL_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha\ (1 + \alpha)}{1 + \alpha + \alpha^2 q_n^2} \exp\left(-\frac{D\, q_n^2 t}{l^2}\right) \qquad (2)$$

เมื่อ WL_t = น้ำหนักของน้ำที่สูญเสียจากชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ

WL_∞ = น้ำหนักของน้ำที่สูญเสียจากชิ้นผลไม้ที่จุดสมดุล

α = อัตราส่วนของปริมาตรของสารละลายน้ำตาลต่อปริมาตรของชิ้นผลไม้

q_n = รากของสมการ : $\tan q_n = -\alpha q_n$ $(q_n > 0)$

ค่าการสูญเสียน้ำ (Water loss : WL) และปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชิ้นผลไม้ (Sugar gain : SG) สามารถคำนวณจากสมการสมดุลมวลสารดังต่อไปนี้

$$\frac{WL_t}{W_1} = \frac{(W_1)(M_o) - (W_1)(M_f)}{W_1} \qquad (3)$$

$$\frac{SG_t}{W_1} = \frac{W_1\ (M_o - 1) - W_t\ (M_f - 1)}{W_1} \qquad (4)$$

เมื่อ SG_t = น้ำหนักของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ

W_i = น้ำหนักของชิ้นผลไม้ที่เวลาเริ่มต้น

W_t = น้ำหนักของชิ้นผลไม้ที่เวลาใด ๆ

M_o = ความชื้นของชิ้นผลไม้ (wet basis) ที่เวลาเริ่มต้น

M_f = ความชื้นของชิ้นผลไม้ (wet basis) ที่เวลาใด ๆ

Lenart และ Fink (1984) ได้ให้วิธีการคำนวณสัดส่วน (fraction) ของการสูญเสียน้ำสูงสุดของชิ้นผลไม้ และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครส ไว้ดังนี้

$$C_\infty = \frac{M_o + (R_D)(C_{ws})}{1 + R_D} \qquad (5)$$

เมื่อ $R_D = W_s/W_i$ = อัตราส่วนน้ำหนักเริ่มต้นของสารละลายน้ำตาลต่อน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นผลไม้

W_s = น้ำหนักของสารละลายน้ำตาลที่เวลาเริ่มต้น

C_{ws} = สัดส่วนของน้ำในสารละลายน้ำตาลที่เวลาเริ่มต้น

C_∞ = สัดส่วนของน้ำที่สภาวะสมดุล

เราสามารถเขียนสมดุลมวลสารของชิ้นผลไม้ที่สภาวะเริ่มต้นและที่สภาวะสมดุลดังนี้

$$\frac{WL_\infty}{W_i} = M_o - (1 - [WF]_\infty) C_\infty \qquad (6)$$

เมื่อ WF_0 = สัดส่วนของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นผลไม้ที่จุดสมดุล

เมื่อนำมาแก้สมการที่ (5) และ (6) ได้ผลดังนี้

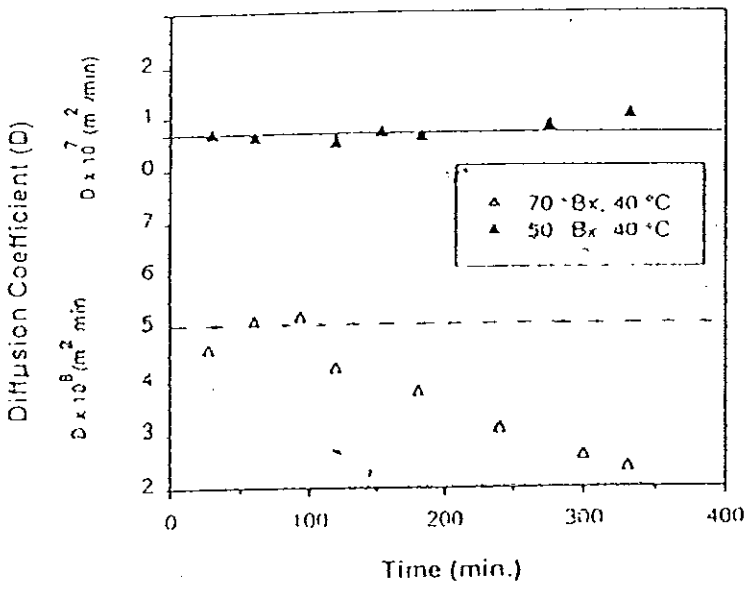
$$\frac{WL_\infty}{W_i} = \frac{R\,(M_o - C_{ws}) + (WF_\infty)\;(M_o + RC_{ws})}{1 + R_D} \qquad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่หาได้โดยวิธีของปาร์ค (Park's method) (Crank, 1975) และกลไกของการทำแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (7) (Lerici, et al., 1985)

ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient; D)

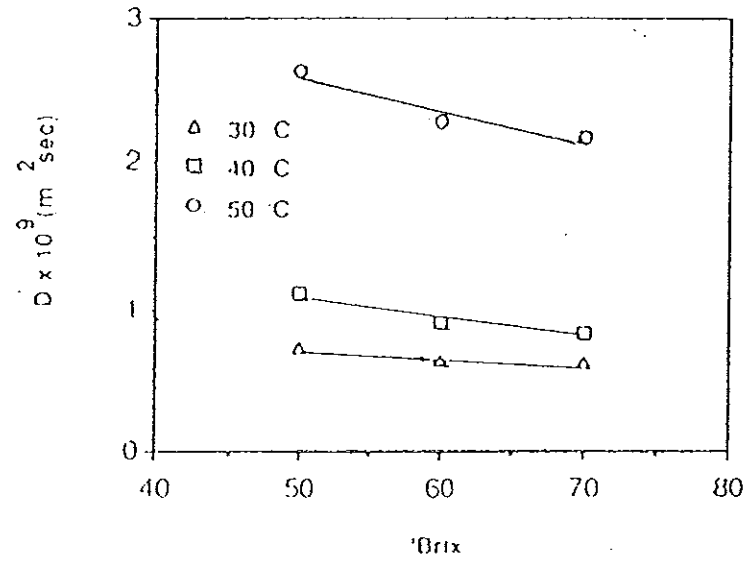
สัมประสิทธิ์การแพร่ เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความสามารถของเนื้อเยื่อหรือตัวกลางที่จะยอมให้ตัวถูกละลาย (solute) ผ่านได้ และเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่ออัตราการแพร่ โมเดลของ Crank ซึ่งมีข้อสมมุติว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารออสโมติก และอุณหภูมิ

Beristain และคณะ (1990) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลา ความเข้มข้นของน้ำตาล และอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ในกระบวนการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติก โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับเวลาเฉพาะที่ความเข้มข้นของน้ำตาล 50 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 40 °ซ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำตาล 70 องศาบริกซ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นสูง (รูปที่ 3) ในสภาวะที่ไม่มีการกวน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาล ทุก ๆ อุณหภูมิของการทดลอง (30 40 และ 50 °ซ) (รูปที่ 4) ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการทดลองที่ไม่มี



รูปที่ 3 ผลของเวลาต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยไม่มีการกวน ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส 50 และ 70 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 40 °ซ

ที่มา : Beristain และคณะ (1990)



รูปที่ 4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลซูโครสต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยไม่มีการกวน ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °ซ

ที่มา : Beristain และคณะ (1990)

การกวนสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการตกตะกอน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (รูปที่ 5)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิส

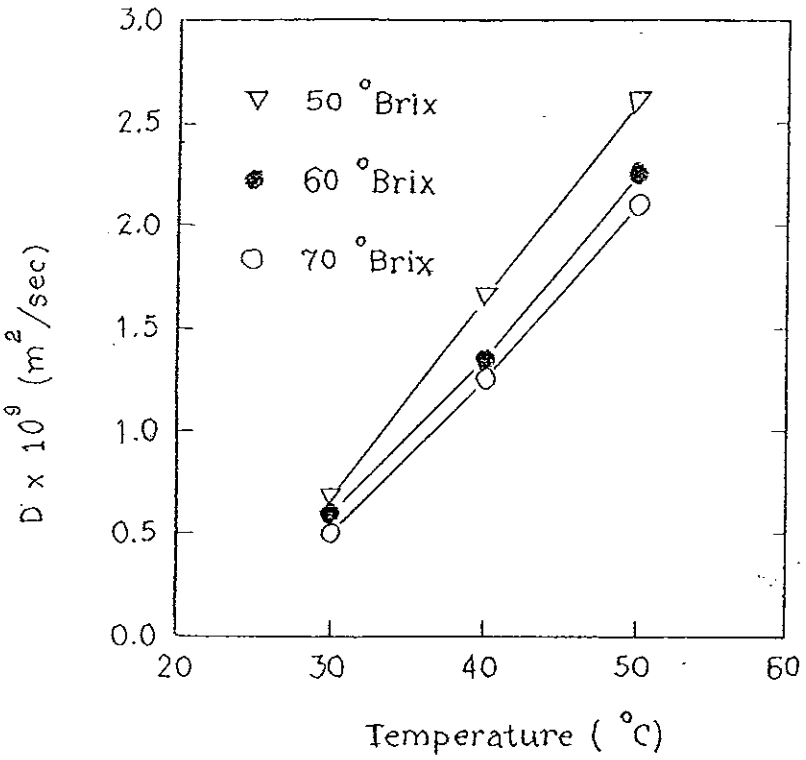
1. ชนิดของสารออสโมติก

สารออสโมติกเป็นตัวทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนออสโมติก (osmotic driving force) ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติ คือมี วอเตอร์แอคติวิตีต่ำ รสชาติดี ให้กลิ่นรสดีต่อผลิตภัณฑ์สุดท้าย และไม่เป็นพิษ (Ponting, et al., 1966; Lerici, et al., 1985) โดยทั่วไปนิยมใช้สารละลายน้ำตาลทรายที่ความเข้มข้น 50-70 องศาบริกซ์ เป็นสารออสโมติก นอกจากนี้ยังมีการใช้ น้ำตาลเม็ด น้ำเชื่อมข้าวโพด น้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีน้ำตาลฟรุคโตสสูง (HFCS) กลูโคส ฟรุคโตส และน้ำเชื่อมในทางการค้า การใช้สารออสโมติกแต่ละชนิดมีผลต่อกระบวนการออสโมซิสที่แตกต่างกัน โดยพบว่าการใช้น้ำตาลเม็ดจะให้อัตราการออสโมซิสเร็วในช่วงแรก และใช้เวลาน้อยในการทำให้ผลไม้แห้ง แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีปัญหาเกี่ยวกับเม็ดของน้ำตาลที่เหลือหลังจากการออสโมซิส และลักษณะเม็ดของน้ำตาลอาจมีผลทำให้ผลไม้ช้ำด้วย (Ponting, et al., 1966)

Pinnavaia และคณะ (1983) และ Bolin และคณะ (1983) ได้ทดลองทำแห้งแอปเปิ้ลด้วยวิธีออสโมติกกับน้ำตาลซูโครสและน้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีน้ำตาลฟรุคโตสสูง พบว่าน้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีน้ำตาลฟรุคโตสสูง มีอัตราการแพร่สูงกว่าน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้เป็นเพราะว่าน้ำเชื่อมข้าวโพดที่มีน้ำตาลฟรุคโตสสูง มีน้ำตาลฟรุคโตสซึ่งมีโมเลกุลเล็กกว่าน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก

Adambounou และคณะ (1983) พบว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์ เป็นสารออสโมติกให้ผลดีกับผัก แต่การนำมาใช้กับผลไม้มีข้อจำกัดในเรื่องความเค็ม

Lerici และคณะ (1985) ได้ทดลองใช้สารออสโมติกชนิดต่าง ๆ คือ กลูโคส (51 องศาบริกซ์) ซูโครส (59 องศาบริกซ์) ฟรุคโตส (60 องศาบริกซ์) กลูโคสร่วมกับฟรุคโตส (1:0.8, 65 องศาบริกซ์) น้ำเชื่อมทางการค้าที่ผลิตจากแป้งข้าวโพด 2 ชนิด



รูปที่ 5 ผลขององุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ในการทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติก โดยไม่มีการกวน เมื่อใช้สารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีความเข้มข้น 50 60 และ 70 องศาบริกซ์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Beristain และคณะ (1990)

คือ ไซรัฟเอฟ (ประกอบด้วย กลูโคสร้อยละ 52 ฟรุคโตสร้อยละ 42 มอลโตสร้อยละ 3 และพอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 3 รวมเป็นความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์) และไซรัฟจี (ประกอบด้วย กลูโคสร้อยละ 35 มอลโตสร้อยละ 45 และพอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 20 รวมเป็นความเข้มข้น 68 องศาบริกซ์) กับแอปเปิ้ลโดยใช้เวลาแช่ในสารละลายออสโมติกนาน 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ไซรัฟเอฟ ให้ผลการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในตัวอย่างแอปเปิ้ลมากที่สุด รองลงมาคือ กลูโคสร่วมกับฟรุคโตส (1:0.8) ทั้งนี้เพราะไซรัฟเอฟมีส่วนประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมากกว่าไซรัฟจี จึงทำให้การซึมผ่านของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่า และไซรัฟจีมีพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งเป็นน้ำตาลหลายชั้นมีโมเลกุลใหญ่การซึมเข้าสู่เซลล์จึงช้ากว่า ส่วนการใช้กลูโคสร่วมกับฟรุคโตสให้ผลการสูญเสียน้ำ และการเพิ่มของของแข็งในตัวอย่างแอปเปิ้ลรองลงมา เนื่องจากสารละลายนี้มีความเข้มข้น 66 องศาบริกซ์ ซึ่งน้อยกว่าไซรัฟเอฟ (ความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์) ทำให้การซึมของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ได้ช้ากว่า

Heng และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาผลของสารละลายน้ำตาล 2 ชนิดคือ สารละลายซูโครสและสารละลายกลูโคสไซรัฟ ความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ กับมะละกอที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดหนา 1.5 ซม. กว้าง 1.5 ซม. และยาว 1.5 ซม. ที่อุณหภูมิ 60 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำที่ลดลงของมะละกอที่แช่ในสารละลายกลูโคสไซรัฟมีค่าสูงกว่าในสารละลายซูโครสเล็กน้อย แต่ปริมาณน้ำตาล ที่เพิ่มขึ้นมีค่าต่ำกว่ามาก เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสไซรัฟประกอบด้วยกลูโคสร้อยละ 2 มอลโตสร้อยละ 7 มอลโตไตรโอสร้อยละ 12 และแซคคาไรด์ร้อยละ 79 ดังนั้นสารละลายกลูโคสไซรัฟซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดดังกล่าวมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าซึ่งทำให้ยากต่อการแพร่เข้าสู่เนื้อผลไม้

กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) ได้ทำการศึกษาผลของสารละลายน้ำตาล 3 ชนิด คือสารละลายกลูโคสเหลว (ซึ่งประกอบด้วย กลูโคสร้อยละ 45 ฟรุคโตสร้อยละ 40 และน้ำตาลอื่น ๆ ร้อยละ 15) สารละลายซูโครส และสารละลายกลูโคสไซรัฟ (Dextrose Equivalent 40) (ซึ่งประกอบด้วย กลูโคส มอลโตส และน้ำตาลอื่น ๆ ที่มีขนาด

โมเลกุลใหญ่) ต่อการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้ความเข้มข้นน้ำตาลแต่ละชนิดอยู่ในช่วง 50 ถึง 70 องศาบริกซ์ อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 70 °ซ สับปะรดมีรูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. เป็นเวลา 4 ถึง 8 ชั่วโมง พบว่าสารละลายน้ำตาลซูโครส 65 องศาบริกซ์ ออสโมซิสที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สารละลายกลูโคสไซรัฟ 61 องศาบริกซ์ ออสโมซิสที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสารละลายกลูโคสเหลว 61 องศาบริกซ์ ออสโมซิสที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ให้ค่าอัตราการสูญเสียน้ำสูงสุดที่ 42 44 และ 44 กรัมของน้ำต่อ 100 กรัมของสับปะรดสด ตามลำดับ และให้ค่าอัตราการเพิ่มของน้ำตาลต่ำสุดที่ 21 10 และ 26 กรัมของของแข็งต่อ 100 กรัมของสับปะรดสด ตามลำดับ เมื่อนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 °ซ แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส พบว่าสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสได้รับการยอมรับมากที่สุด

2. การกวน (Agitation) และการหมุนเวียนของน้ำเชื่อม (Circulation)

การกวน หมายถึงการทำให้ชิ้นผลไม้เกิดการเคลื่อนไหวในน้ำเชื่อม โดยใช้ใบพัดหมุนในน้ำเชื่อม ส่วนการหมุนเวียนของน้ำเชื่อม หมายถึงการทำให้น้ำเชื่อมเกิดการไหลเวียนโดยอาศัยการปั๊ม การกวนจะทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายได้ดีหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัด สภาวะการกวน (ตำแหน่งของใบพัด ความเร็วในการกวน) ค่าแรลโนลนัมเบอร์ (Reynole number; N_{Re}) และตัวแปรทางกายภาพอื่น ๆ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้วัดความแรงของการกวนคือ เรนโนลนัมเบอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย มีความสัมพันธ์กับความหนืด ความหนาแน่น ความเร็วในการกวน และเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (Dickey and Fenic, 1976) ดังสมการที่ (8)

$$N_{Re} = D_i^2 N \rho / \mu \qquad (8)$$

เมื่อ D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

N = จำนวนรอบของใบพัดในการกวน (รอบ/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย (กิโลกรัม/เมตร^3)

μ = ความหนืดของสารละลาย (กิโลกรัม/เมตร, นาที^{2})

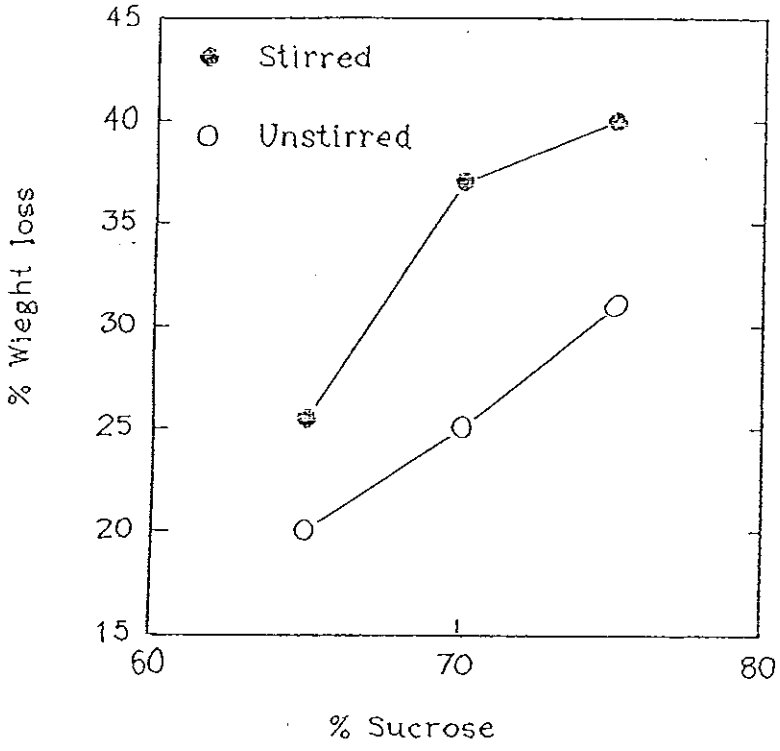
จากการทดลองของ Ponting และคณะ (1966) พบว่าการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกจะเร็วขึ้นเมื่อมีการกวนน้ำเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าในน้ำเชื่อมที่มีการกวน มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าที่ไม่มีการกวน ทั้งนี้เนื่องจากในการแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อม น้ำที่ถูกกำจัดออกมาจากเซลล์ผลไม้จะออกมาสะสมอยู่รอบผิวผลไม้ ทำให้บริเวณรอบผิวผลไม้มีความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเจือจางลง ถ้ามีการกวนอย่างเพียงพอ น้ำเชื่อมไม่ว่าอยู่ใกล้ผิวผลไม้หรือห่างไกลออกไปจะมีความเข้มข้นเท่ากัน โดยที่กระแสน้ำเชื่อมจะชะล้างน้ำบริเวณผิวผลไม้ให้เข้าไปละลายรวมกับน้ำเชื่อม

การหมุนเวียนของน้ำเชื่อมก็เช่นเดียวกันกับการกวน ถ้ามีการหมุนเวียนน้ำเชื่อมมีผลทำให้อัตราการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเร็วขึ้น ด้วยเหตุผลทำนองเดียวกันกับการกวนดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่าเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำเชื่อมการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นผลไม้สูงกว่าที่ไม่มีการหมุนเวียนของน้ำเชื่อม ในทางปฏิบัติการทำการกวนเป็นการปฏิบัติที่ทำได้ยุ่งยากมากกว่าและจะต้องทำอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเสียหายของชิ้นผลไม้ แต่การหมุนเวียนน้ำเชื่อมโดยใช้วิธีการปั๊มทำได้ง่ายกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่า (Ponting, et al., 1966)

3. การเตรียมชิ้นผลไม้ก่อนการออสโมซิส

การใช้อุณหภูมิสูงในการนึ่ง หรือลวก จะทำให้เนื้อเยื่อของผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากธรรมชาติ ทำให้เนื้อเยื่อยอมให้มีการซึมผ่านได้มากขึ้น การแพร่ของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์ผลไม้ และการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์ผลไม้จะถึงจุดสมดุลได้เร็วขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529; อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533) นอกจากการใช้อุณหภูมิสูงในการ

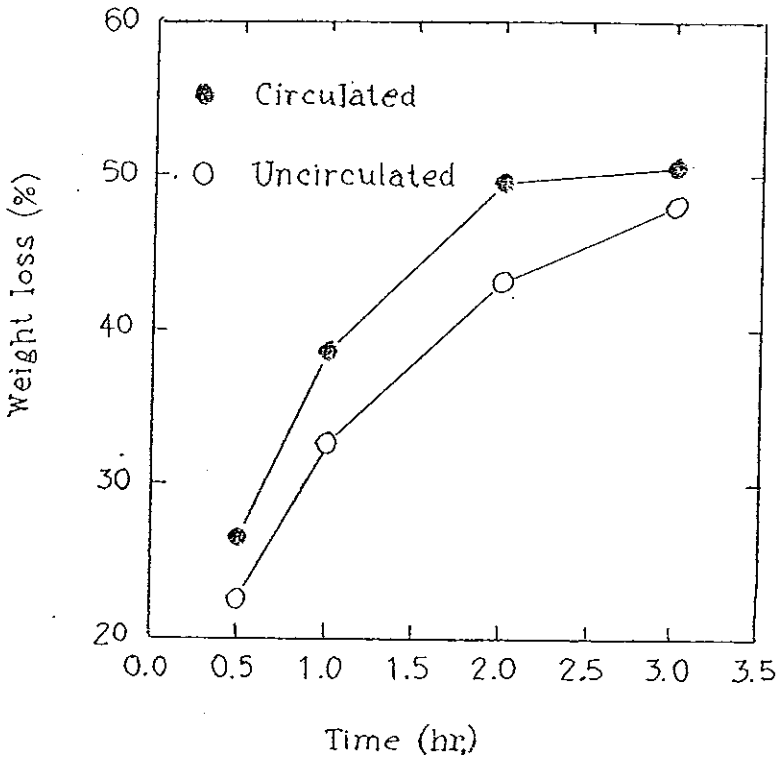
CENTRAL LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY



รูปที่ 6 ผลของการกวนต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลที่ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมซูโครสที่อุณหภูมิ 21 °ซ เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนผลไม้ต่อน้ำเชื่อม 1:4

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ponting และคณะ (1966)

032750



รูปที่ 7 ผลการหมุนเวียนน้ำเชื่อมโดยการปั๊ม ต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลที่ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมอินเวอร์ต ที่ความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ อุณหภูมิ 49 °ซ อัตราส่วนผลไม้ต่อน้ำเชื่อม 1:4

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ponting และคณะ (1966)

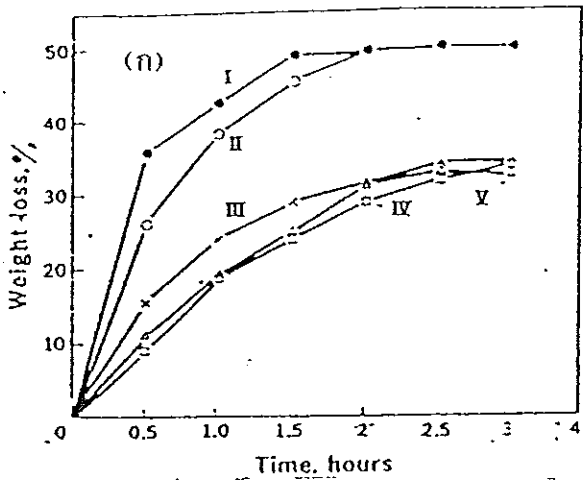
ทำลายของเอนไซม์แล้ว ยังมีการใช้สารเคมีตัวอย่างเช่น ซัลไฟท์ เพื่อช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในการเตรียมผลไม้ก่อนการทำแห้ง เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ และช่วยยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจากเอนไซม์ (Enzymatic browning reaction) และที่ไม่เกิดจากเอนไซม์ (Nonenzymatic browning reaction) (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527; ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529; Ponting, et al., 1973) การใช้แคลเซียมคลอไรด์กับผลไม้ก่อนการแช่อิ่มและการทำแห้งเป็นการปรับปรุงคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส ช่วยทำให้เนื้อเยื่อของผลไม้แน่นแข็งและสามารถรักษารูปทรงไว้ได้แม้ผ่านขั้นตอนของการแปรรูป (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527; La Belle, 1971)

4. อุณหภูมิ

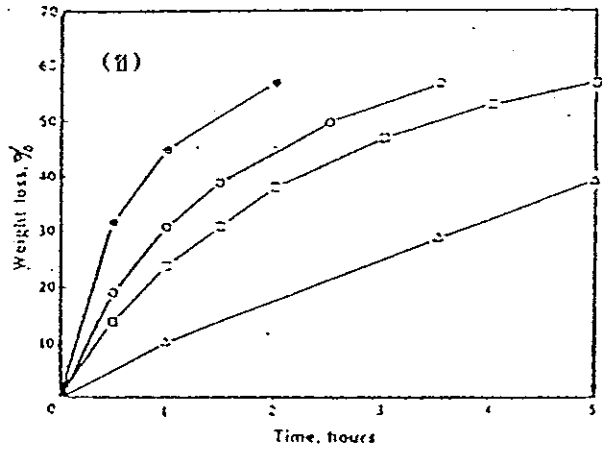
อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการออสโมซิสอย่างเห็นได้ชัด Camiran และคณะ (1968) ได้กล่าวไว้ว่า น้ำตาลซูโครสจะมีความสามารถในการละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นแรงดันออสโมซิสที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Ponting และคณะ (1966) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการออสโมซิสของชิ้นแอปเปิ้ลพบว่า อัตราการออสโมซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (รูปที่ 8) แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงกว่า 49 °ซ จะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์และผลไม้เกิดการสูญเสียกลิ่นรส

จากรูปที่ 8 (ก) พบว่าน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลลดลงร้อยละ 50 เมื่อใช้เวลาในการทำแห้ง 2.5-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 49 °ซ โดยใช้น้ำเชื่อมซูโครสและน้ำเชื่อมอินเวอร์ต แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 49 °ซ การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลจะลดลง ส่วนผลจากรูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้น้ำตาลทรายเม็ดที่อุณหภูมิ 77 °ซ ในเวลา 1 ชั่วโมง การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นแอปเปิ้ลสูงกว่าที่อุณหภูมิ 49 40 และ 22 °ซ ตามลำดับ และพบว่าอัตราการออสโมซิสของน้ำตาลทรายเม็ด ในช่วงแรกเร็วกว่าน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลอินเวอร์ต

Bongirwa และ Sreeniyanan (1977) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการออสโมซิสกล้วย โดยทำการออสโมซิสกล้วยในสารละลายซูโครส 70 องศาบริกซ์ เป็น



● น้ำตาลซูโครสที่ 49°ซ.
○ น้ำตาลอินเวอร์ตที่ 49°ซ.
× น้ำตาลอินเวอร์ตที่ 38°ซ.
□ น้ำตาลซูโครสที่ 38°ซ.
Δ น้ำตาลอินเวอร์ตที่ 21°ซ.



น้ำตาลเม็ด
● อุณหภูมิ 77°ซ.
○ อุณหภูมิ 49°ซ.
□ อุณหภูมิ 40°ซ.
Δ อุณหภูมิ 22°ซ.

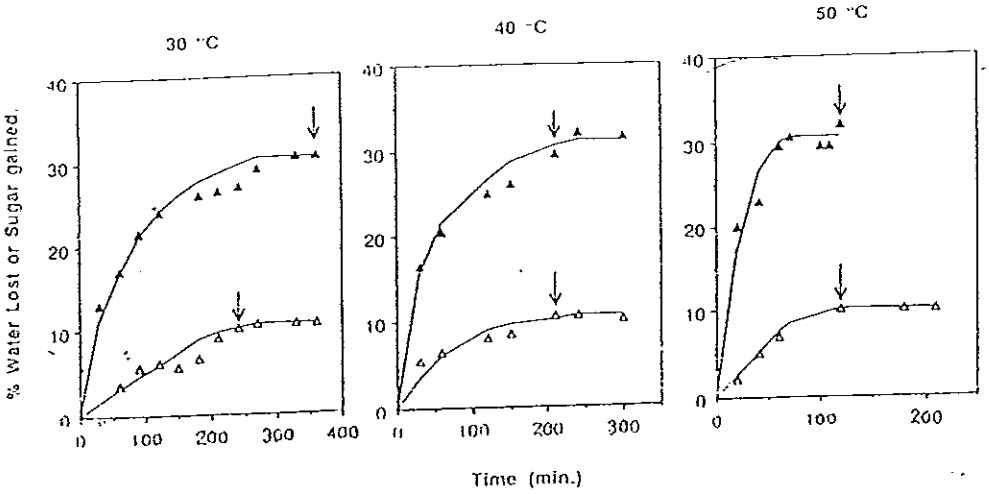
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการออสโมซิสชั้นแอปเปิ้ลด้วยวิธีออสโมติกในน้ำเชื่อมซูโครส และน้ำเชื่อมอินเวอร์ต (ก) และน้ำตาลเม็ด (ข)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ponting และคณะ (1966)

เวลา 3.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 27 40 50 และ 60 °ซ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนืดของสารละลายน้ำตาลลดลงเป็นผลให้เกิดการออสโมซิสได้ดีกว่า แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 °ซ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะมีผลกระทบต่อรสชาติและเนื้อสัมผัสของผลไม้ จากการศึกษาของ Contreras และ Smyrl (1981) พบว่าการออสโมซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 45 °ซ ควรมีการเติมกรดแอสคอร์บิกลงในสารละลายน้ำตาลเพื่อรักษาสีธรรมชาติของผลไม้เอาไว้ เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกจะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ได้ (Frank, 1983) แต่อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Lenart และ Lewicki (1988) พบว่าแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้เกิดการออสโมซิสได้ดีกว่า โดยปริมาณน้ำที่ลดลงมีค่าสูง ในขณะเดียวกันก็มีผลให้ปริมาณการซึมเข้าของน้ำตาลมีค่าสูงด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการใช้อุณหภูมิสูงเกินไป (70-90 °ซ) ยังเป็นการลวกผลไม้พร้อม ๆ กันด้วย จึงมีผลให้น้ำตาลซึมเข้าในเนื้อผลไม้ในปริมาณสูงมาก

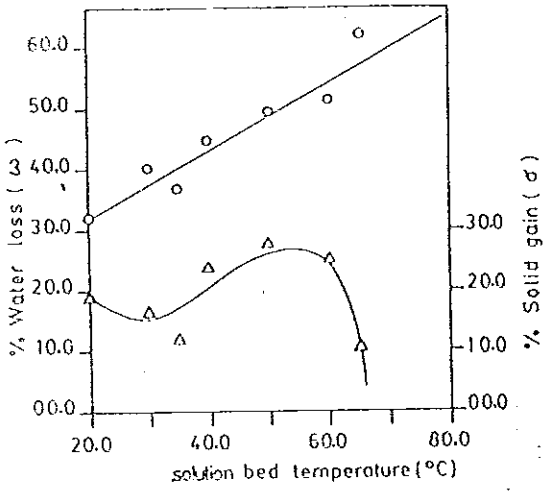
Beristain และคณะ (1990) ได้ทำการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการออสโมซิสสับปะรด โดยทำการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °ซ ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นการส่งเสริมให้มีการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากผลไม้เร็วขึ้น เป็นผลให้อัตราการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของของแข็งมีลักษณะเอ็กโปเนนเชียล (exponential) กับเวลา

Rahman และ Lamb (1990) ได้ทำการทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติก โดยใช้สับปะรดแว่น (หนา 6.5 มม.) ในน้ำเชื่อมซูโครสเข้มข้น 30 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 65 °ซ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าการสูญเสียน้ำของสับปะรดเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 °ซ หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สารเพคตินซึ่งพบตามผนังเซลล์ของสับปะรดเกิดการละลายมีผลทำให้การแพร่ของน้ำตาลช้าลงจากการทดลองยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °ซ อัตราการแพร่ของน้ำตาลซูโครสเกือบจะคงที่



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำ (▲) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (△) ของสับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกในสารละลายน้ำตาลซูโครส 70 องศาบริกซ์ จุดที่ลูกศรชี้คือจุดสมดุลของการแพร่

ที่มา : Beristain และคณะ (1990)



รูปที่ 10 การสูญเสียน้ำ (O) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (Δ) ของสับปะรดแห้ง ด้วยวิธีออสโมติก โดยใช้น้ำเชื่อมซูโครสเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ที่มา : Rahman และ Lamb (1990)

5. เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (plasmolysis)

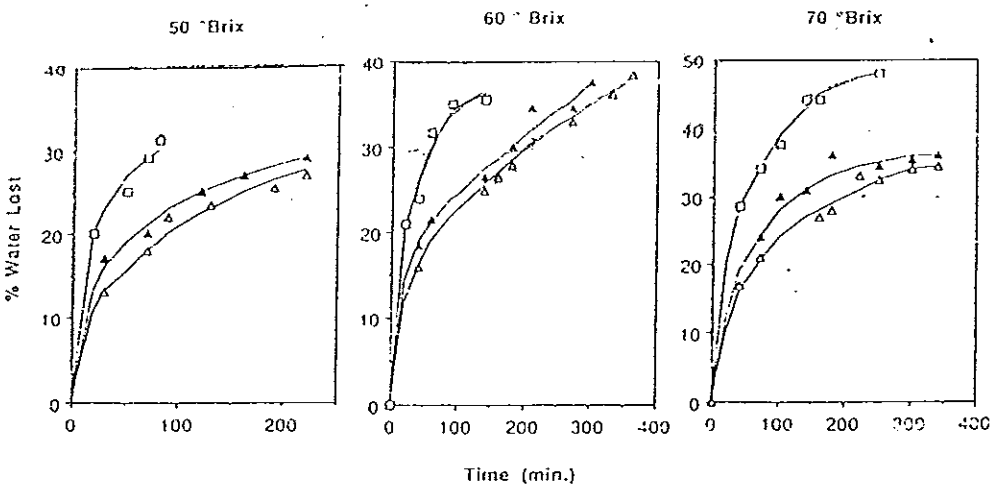
เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการสกัด Siripatana (1985) ได้กล่าวว่าทฤษฎีการแพร่โดยตั้งข้อสมมุติฐานว่าการแพร่จะเกิดขึ้นทันที เมื่อเริ่มใส่ชิ้นเนื้อเยื่อของพืชไปในสารละลาย ไม่เป็นจริงเพราะการแพร่จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเซลล์สูญเสียสภาพธรรมชาติ ดังนั้นทฤษฎีการแพร่จะสามารถคำนวณเวลาในการแพร่เร็วกว่าความเป็นจริง การสกัดสารถูกละลาย เช่น การสกัดน้ำตาลจากอาหาร ต้องใช้ความร้อน หรือพลังงานกลเพื่อทำให้ผนังเซลล์แตก สารถูกละลายที่อยู่ภายในเซลล์จะไหลมาสู่ช่องว่างระหว่างเซลล์และแพร่ไปยังผิวของชิ้นเนื้อเยื่อ เวลาล่าช้าส่วนนี้เรียกว่า เวลาของพลาสมอลิซิสหรือเวลาที่ต้องใช้ในการทำให้เซลล์แตกก่อนที่การแพร่จะเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่

6. ความเข้มข้นของสารออสโมติก

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารออสโมติกจะทำให้น้ำสามารถซึมออกจากชิ้นผลไม้ได้เร็วขึ้น แต่ขณะเดียวกันน้ำตาลสามารถซึมเข้าไปในผลไม้ได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเป็นข้อดีที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่หวานจนเกินไป (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533)

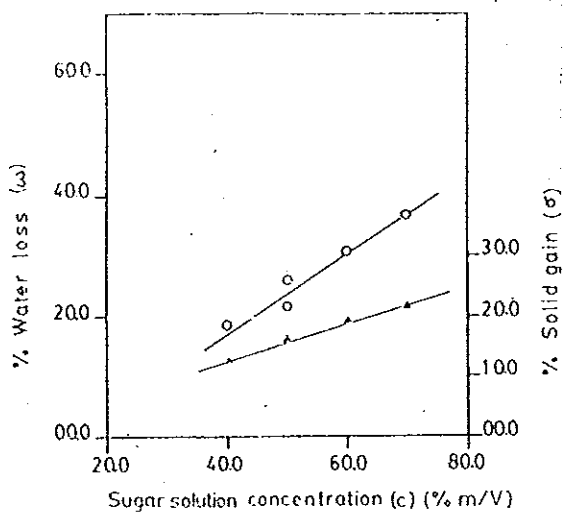
Beristain และคณะ (1990) ได้ทำการทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกที่ความเข้มข้นของน้ำตาลต่าง ๆ คือ 50 60 และ 70 องศาบริกซ์ และที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 °ซ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11 และพบว่าการสูญเสียน้ำของชิ้นผลไม้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล

Rahman และ Lamb (1990) ได้ทำการทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยทำการออสโมซิสสับปะรดแว่น (หนา 6.5 มม.) ในน้ำเชื่อมซูโครสเข้มข้น 40-70 องศาบริกซ์ อัตราส่วนสับปะรดต่อน้ำเชื่อม 1:10 ที่อุณหภูมิ 19-20 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อความเข้มข้นของน้ำเชื่อมสูงขึ้น



รูปที่ 11 ผลของความเข้มข้นของน้ำตาลต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก

ที่มา : Beristain และคณะ (1990)



รูปที่ 12 การสูญเสียน้ำ (o) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (▲) ของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติกที่อุณหภูมิ 20 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ที่มา : Rahman และ Lamb (1990)

7. อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อชิ้นผลไม้

ในกรณีที่น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นมาก เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำเชื่อมต่อชิ้นผลไม้ จะทำให้การซึมออกของน้ำเร็วขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณน้ำที่ซึมออกจากชิ้นผลไม้ มีผลทำให้น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นแรงขับ อันได้แก่ความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำภายในและภายนอกเซลล์มีค่าสูงอยู่ตลอดเวลา (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533; Ponting, et al., 1966; Lerici, et al., 1985)

Conway และคณะ (1983) ได้ทำการทดลองทำแห้งแอปเปิ้ลด้วยวิธีออสโมติก โดยเลือกใช้อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อผลไม้ 4:1 และเสนอแนะว่า การเลือกใช้อัตราส่วนของน้ำเชื่อมต่อผลไม้ควรเลือกตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเชื่อม จากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าถ้าอัตราส่วนนี้มากเกินไปจะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเชื่อมได้ยาก ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยเกินไป กระบวนการทำแห้งจะเกิดขึ้นช้า

อัตราส่วนของน้ำเชื่อมต่อผลไม้ที่นิยมใช้กันคือ อัตราส่วน 4:1 (Moy, et al., 1978; Bolin, et al., 1983; Conway, et al., 1983; Beristain, et al., 1990)

8. ขนาดและรูปร่างของผลไม้

ขนาดและรูปร่างของผลไม้มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้สูง น้ำจะสามารถซึมออกได้เร็ว ถ้าผลไม้ชิ้นใหญ่น้ำจะซึมออกได้น้อย หรือถ้ารูปร่างกลมน้ำจะซึมออกได้น้อยเช่นกัน เนื่องจากทั้ง 2 กรณีนี้ พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าน้อย (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533; Lerici, et al., 1985)

Ponting และคณะ (1973) ได้รายงานว่ารูปร่างของชิ้นผลไม้มีผลต่อการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกเพียงเล็กน้อย แต่ในทางตรงข้าม Lerici และคณะ (1985) ได้ทำการทดลองทำแห้งแอปเปิ้ลด้วยวิธีออสโมติกโดยเตรียมแอปเปิ้ลให้มีรูปร่าง 4 ลักษณะด้วยกันคือรูปร่างเป็นแท่ง (stick) ขนาด หนา 1 ซม. กว้าง 1 ซม. และยาว 6 ซม. รูปร่างเป็นชิ้นบาง (slice) ใน 1 วงของแอปเปิ้ล แบ่งออกเป็น 14 ส่วน รูปร่างเป็น

สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) ขนาด หนา 0.6 ซม. กว้าง 1 ซม. และ ยาว 1 ซม. และรูปร่างเป็นแว่น (ring) ขนาดรัศมี 2.25 ซม. หนา 0.6 ซม. ทำการออสโมซิสในไซรัฟเอฟ (ประกอบด้วย กลูโคสร้อยละ 52 ฟรุตโตสร้อยละ 42 มอลโตสร้อยละ 3 และพอลิแซ็กคาไรด์ร้อยละ 3 รวมเป็นความเข้มข้น 70 องศาบริกซ์) อัตราส่วนไซรัฟเอฟต่อแอปเปิ้ล 5:1 ที่อุณหภูมิห้อง (20 °ซ) พบว่ารูปร่างของแอปเปิ้ลมีผลต่อการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกดังแสดงในรูปที่ 13 แอปเปิ้ลที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นแอปเปิ้ลมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก การสูญเสียน้ำของชิ้นแอปเปิ้ลมีค่ามากที่สุดเมื่อมีรูปร่างเป็นแว่นและมีค่าลดลงเมื่อมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

Ravindran (1989) ได้ทำการทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยเตรียมสับปะรดให้มีรูปร่าง 2 ลักษณะคือ รูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. (เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 3 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 8 ซม.) และรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด หนา 1.2 ซม. กว้าง 1.2 และ ยาว 1.2 ซม. ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมซูโครสที่ความเข้มข้น 50 60 และ 70 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 4:1 ที่อุณหภูมิห้อง (28 °ซ) พบว่ารูปร่างของสับปะรดมีผลต่อการสูญเสียน้ำและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 4 ยกเว้นการสูญเสียวิตามินซี สับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์จะสูญเสียวิตามินซีมากกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น

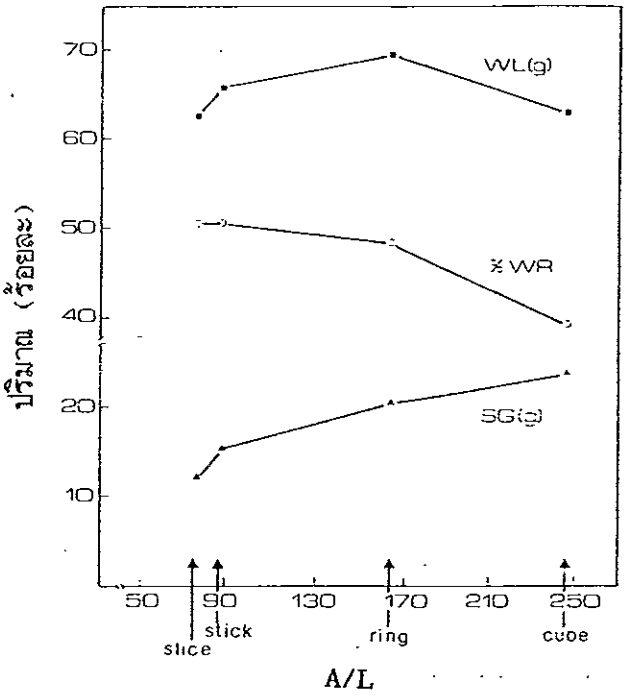
ปัญหาคุณภาพทางเคมีและกายภาพของผลไม้แห้งด้วยวิธีออสโมติก

1. ปัญหาการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์

การเกิดสีน้ำตาลของผลไม้อบแห้งเนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล ทั้งที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ มีผลทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรส อาจเกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ เนื้อสัมผัสแข็ง สูญเสียโปรตีน การเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์อาจเกิดในขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. การเกิดสีน้ำตาลในขั้นตอนการเตรียมผลไม้ก่อนกระบวนการออสโมซิส

เมื่อผลไม้ถูกปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้น และสัมผัสกับอากาศ จะเกิดสีน้ำตาลเนื่อง



WL = ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (กรัม/100 กรัม) A = พื้นที่ผิวทั้งหมด

WR = การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) L = ครึ่งหนึ่งของความหนา

SG = ปริมาณของน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (กรัม/100 กรัม)

รูปที่ 13 การสูญเสียน้ำ (WL) การสูญเสียน้ำหนัก (WR) และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (SG) ของแอปเปิ้ลที่มีรูปร่างแตกต่างกัน

ที่มา : Lerici และคณะ (1985)

ตารางที่ 4 ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อการสูญเสียน้ำหนัก ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น และการสูญเสียวิตามินซี ที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อมซูโครส 50 60 และ 70 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 4:1 ทำการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 28 °ซ

ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)		ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)		การสูญเสียวิตามินซี (ร้อยละ)	
	แว่น	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์	แว่น	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์	แว่น	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์
50	19.7	21.0	18.1	16.3	29.1	20.8
60	27.3	27.9	21.2	20.3	37.3	18.6
70	32.8	31.3	26.9	22.1	38.4	20.2

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ravindran (1989)

จากปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่มีอยู่ในผลไม้ตามธรรมชาติ กลุ่มของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลเรียกชื่อรวมกันว่า ฟีนอเลส (phenolase) ซึ่งจะรวมเอนไซม์ต่อไปนี้คือ ฟีนอลออกซิเดส (phenol oxidase) ครีโซเลส (cresolase) โดปา ออกซิเดส (dopa oxidase) คาเทโคเลส (catecholase) ไทโรซิเนส (tyrosinase) โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) ฟีนอเลส คอมเพล็ก (phenolase complex) เป็นต้น (ศิวาพร ศิวเวชช, 2529; รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2533)

ข. การเกิดสีน้ำตาลในระหว่างการออสโมซิส

ในระหว่างการออสโมซิสการเกิดสีน้ำตาลอาจเกิดจากเอนไซม์ และไม่ได้เกิด

จากเอนไซม์ การเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ เกิดจากเอนไซม์ฟีนอเลส ถึงแม้ว่าการแช่ชิ้นผลไม้ในน้ำเชื่อม สามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้แต่น้ำเชื่อมต้องมีความเข้มข้นสูง 50 ถึง 70 องศาบริกซ์ จึงจะป้องกันได้ (Contreras and Smyrl, 1981) การเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ เกิดจากการใช้อุณหภูมิสูงในการแช่ผลไม้ในน้ำเชื่อม ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 49 °ซ เป็นเวลานานจะทำให้เกิดสีน้ำตาลได้ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529)

ค. การเกิดสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้ง

ปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้ง เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ แต่เกิดจากความร้อน การเสียหายเนื่องจากความร้อนจะมีมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงและเวลานาน และการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้จะเห็นได้ชัดถ้าหากว่าใช้เวลา 8-10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 49 °ซ และอัตราการเกิดสีน้ำตาลยังขึ้นอยู่กับความชื้น ผลไม้อบแห้งที่มีความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 2-15 ทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็จะเกิดรวดเร็วขึ้น (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529)

ง. การเกิดสีน้ำตาลในระหว่างการเก็บรักษา

ในระหว่างการเก็บรักษาอาหารที่มีความชื้นต่ำ การเกิดสีน้ำตาลจะเกิดจากปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของกรดอะมิโน กับน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีหมู่คาร์บอนิลอิสระ (Maillard reaction) (รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2533) นอกจากนี้ การสลายตัวของกรดแอสคอร์บิก (ภายใต้สภาวะที่มีอากาศ หรือไม่มีอากาศ) ก็จะทำให้เกิดสีน้ำตาลได้เช่นกัน การยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของผลไม้แห้งด้วยวิธีออสโมติกสามารทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การลวกหรือการนึ่ง เป็นการใช้ความร้อนทำลายเอนไซม์ รัชนี ตัณฑะพานิชกุล (2533) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °ซ ในช่วงระยะเวลาสั้นจะทำให้เอนไซม์ฟีนอเลสสูญเสียกิจกรรมได้ แต่การลวกจะชะล้างเอาสารที่ให้กลิ่นรสออกไปทำให้กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์เจือจางลง และนอกจากนี้การลวกยังทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้นิ่มลง ในผลไม้แห้งและผลไม้แช่แข็งจึงไม่นิยมการลวก แต่จะใช้สารเคมี

เพื่อยับยั้งเอนไซม์แทน (ประสิทธิ์ อติวีระกุล, 2527)

2. การใช้กรดแอสคอร์บิก กรดแอสคอร์บิกสามารถรีดิวส์ ออร์โธ-ควิโนน (o-quinones) ที่เกิดจากปฏิกิริยาของฟีนอเลส ให้กลับไปเป็นออร์โธ-ไดไฮดรอกซีฟีนอล (o-dihydroxyphenol) ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ แต่การควบคุมปฏิกิริยาสีน้ำตาลด้วยวิธีนี้จะต้องทำควบคู่กับวิธีอื่นคือ การกำจัดออกซิเจนโดยการแช่ในน้ำเชื่อม (ศิวาพร ศิวเวชช, 2529; รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2533)

3. การแช่ในน้ำเชื่อม เป็นการช่วยป้องกันไม่ให้ชิ้นผลไม้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และน้ำเชื่อมเข้มข้นยังช่วยยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ฟีนอเลสได้ โดยการกำจัดน้ำออกจากชิ้นผลไม้ทำให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตีลดลงอยู่ในช่วงที่เอนไซม์ทำงานได้ไม่ดี การกำจัดน้ำออกจากชิ้นผลไม้สามารถทำได้ โดยนำผลไม้ไปแช่ในน้ำเชื่อมเข้มข้น น้ำจะถูกกำจัดออกจากชิ้นผลไม้โดยวิธีออสโมซิสจนน้ำหนักลดลงร้อยละ 50 เทน้ำเชื่อมออก แล้วนำผลไม้ไปแช่แข็งหรือทำแห้งในตู้อบแบบใช้ลมร้อน หรือสุญญากาศ นอกจากน้ำเชื่อมจะช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลโดยการกำจัดน้ำออกแล้วยังช่วยป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสของผลไม้ด้วย (รัชนี ตัณฑะพานิชกุล, 2533)

4. การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารเคมีที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ฟีนอเลสได้สูง แต่ควรระวังในเรื่องปริมาณการใช้ เพราะซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถรวมตัวกับสารประกอบบางชนิด เช่น สารประกอบคาร์บอนิล ทำให้คุณสมบัติในการทำลายจุลินทรีย์และยับยั้งเอนไซม์ลดลง

Mehta และคณะ (1982) ได้ทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยใช้วิธีการลวกชิ้นสับปะรดในน้ำเชื่อม 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 3 นาที ก่อนที่จะทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการออสโมซิสชิ้นสับปะรดในน้ำเชื่อมที่เติมกรดซิตริกร้อยละ 0.35 ร่วมกับโปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟตร้อยละ 0.1 เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำการอบแห้งและทดสอบการยอมรับ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีทั้ง สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และรสชาติ

Ravindran (1989) ได้ทดลองทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมติกโดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร้อยละ 0.25 เติมลงไปในน้ำเชื่อมที่ใช้เป็นสารออสโมติก เพื่อป้องกัน

การเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์

อ่อนรวี รัตนาพันธุ์ (2533) กล่าวถึงหลักการทำแห้งผลไม้ด้วยวิธีออสโมติกว่า ควรแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.7 ร่วมกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (NaS_2O_3) ร้อยละ 0.2 ก่อนทำการออสโมซิสชิ้นผลไม้ เพื่อทำให้ผลไม้มีความกรอบ ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ และป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์

การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 84 ปี พ.ศ. 2527 อนุญาตให้ใช้ในผลไม้และผักแห้งในปริมาณสูงสุดไม่เกิน 2,500 ส่วนในล้านส่วน โดยคิดคำนวณในรูปซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ศิวาพร ศิวเวชช, 2529)

2. ปัญหาลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

ปัญหาลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งคือ เนื้อสัมผัสนิ่ม และเนื้อไม่กรอบแน่น ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิดเช่น ชนิดของผลไม้ การปฏิบัติในระหว่างการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา และการขนส่ง การปฏิบัติในระหว่างการแปรรูปและความสุกของผลไม้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาสารแคลเซียมคลอไรด์มาใช้เพื่อรักษาคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลไม้ De Man (1976) ได้กล่าวไว้ว่าแคลเซียมคลอไรด์ มีคุณสมบัติในการช่วยทำให้เนื้อเยื่อของผลไม้มีความแน่นแข็งขึ้น และช่วยทำให้โครงสร้างเซลล์คงรูปอยู่ได้โดยทำให้สารเพคติน สามารถเชื่อมเซลล์ต่าง ๆ ของผลไม้เข้าด้วยกัน

สารเพคติน เป็นสารที่อยู่ภายในเซลล์และระหว่างเซลล์ของผลไม้ ทำหน้าที่ยึดผนังเซลล์และเซลล์ทั้งหลายเข้าด้วยกัน ในผลไม้ดิบจะมีความแข็งแรงเพราะเพคตินอยู่ในรูปที่ซับซ้อน และไม่ละลายน้ำเรียกว่าโปรโตเพคติน เมื่อผลไม้เริ่มสุกเนื้อจะนิ่มลงเพราะโปรโตเพคตินถูกย่อยสลายเป็นเพคตินที่ละลายน้ำได้และกรดเพคติกตามลำดับ โดยการกระทำของเอนไซม์เมทธิลเอสเทอร์เรส (methyl esterase) ที่สามารถแยกกลุ่มเมทธิลออกจากโมเลกุลของเพคติน ถ้านำผลไม้มาแช่ในสารละลายที่มีแคลเซียมอิออนอยู่ด้วย แคลเซียมอิออนจะไปจับกับโมเลกุลของเพคตินที่ถูกดึงกลุ่มเมทธิลออก เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมเพคเตท ซึ่งไม่ละลายน้ำ และทำให้เนื้อผลไม้มีความแข็งกรอบ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก
3. เพื่อปรับปรุงคุณภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติกเชิงอุตสาหกรรมให้เหมาะสม

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ

1. ผลสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย จากตลาดในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา มีความสุกปานกลางคือมีผิวสีเหลือง 1 ใน 5 ถึง 3 ใน 5 ของผล มีน้ำหนัก 2.5-3.0 กิโลกรัมต่อผล

2. สารเคมี

กรดซิตริก ระดับคุณภาพ BP (British Phamacopoeia)

โปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟต ระดับคุณภาพ AG (Analytical Grade)

น้ำตาลทรายขาว

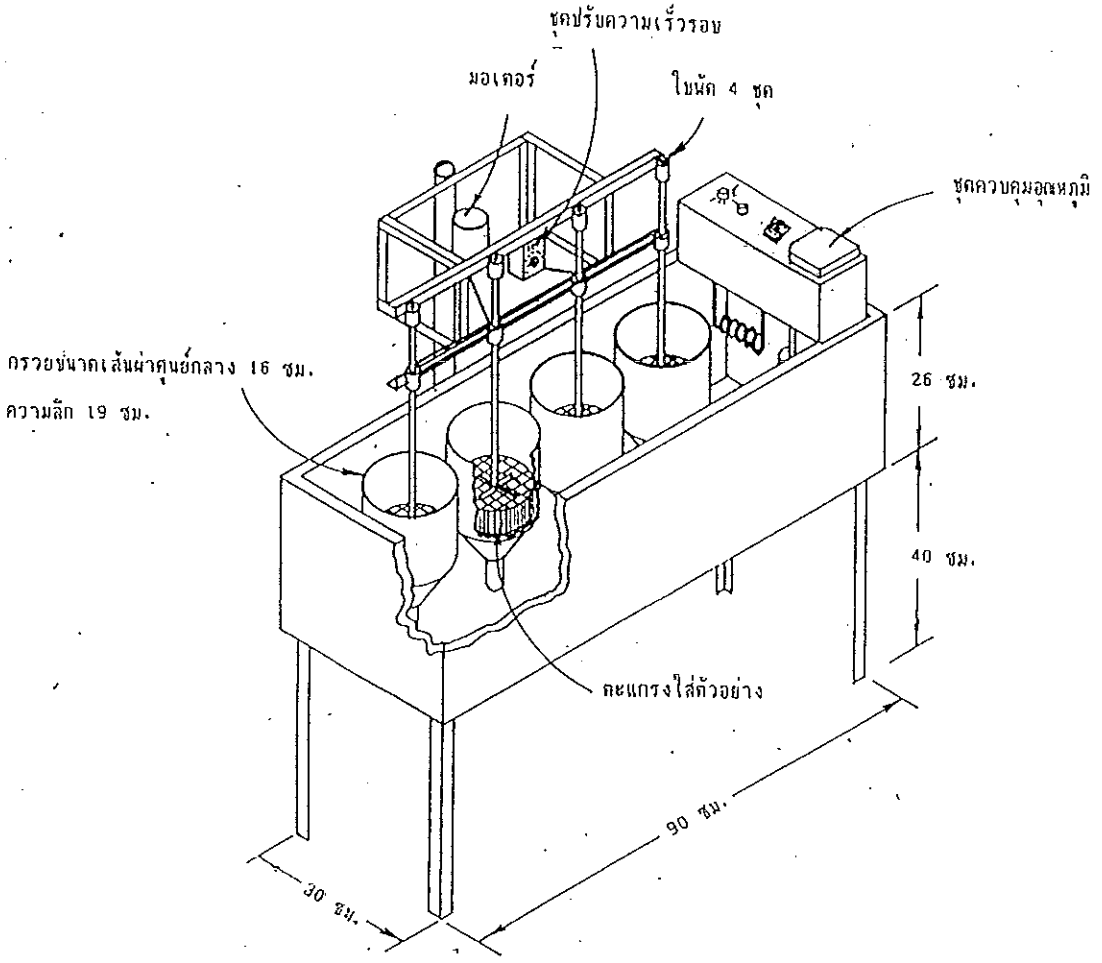
อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมวัตถุดิบ

- เครื่องมือตัดสับปะรดเป็นแว่น (slicer) รุ่น G.F.40 บริษัท Berkel & Parnall Ltd., ประเทศอังกฤษ
- อุปกรณ์ปอกเปลือกสับปะรด (plunger)
- เหล็กกลวงสำหรับเจาะแกนสับปะรด
- มีดตัดแต่งแว่นสับปะรด
- ถาดอลูมิเนียมสำหรับวางชิ้นสับปะรด

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการออสโมซิส

- ถังออสโมซิส (รูปที่ 14) ประกอบด้วยถังไม้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 30 ซม. ยาว 90 ซม. ชั้นในของถังหุ้มด้วยสแตนเลส เพื่อใช้ใส่น้ำที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถัง ภายในถังมีท่อสำหรับปล่อยน้ำที่ใช้แล้วทิ้ง และมีถังรูปทรงกลม 4 ใบ แต่ละใบมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 ซม. ความลึก 19 ซม. ก้นถังรูปทรงกลมมีลักษณะเป็นกรวยมีก๊อกปิด-เปิดได้ สำหรับปล่อยน้ำเชื่อมออก ส่วนด้านบนของ



รูปที่ 14 ถังออสโมซีส

ออกแบบโดย : ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ และ ครูพรชัย ศรีไพบูลย์

ถังไม้มีแกนเหล็กสำหรับใช้ติดตั้งมอเตอร์ เพื่อใช้สำหรับหมุนใบพัดทั้ง 4 โดยที่ใบพัดทั้ง 4 จุ่มอยู่ในถังทรงกลม

- ตะแกรงสำหรับบรรจุชิ้นสับปะรด ตะแกรงมีฝาปิดทำด้วยเหล็กชุปโครเมียม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 ซม.

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วใบพัด : เครื่องวัดความเร็ว (Digital Tachometer) Lutron DT-2233

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างในระหว่างออสโมซิส

- กล่องพลาสติกมีฝาปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ซม.สำหรับเก็บสับปะรด

- ขวดแก้วมีฝาปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม.สำหรับเก็บน้ำเชื่อม

4. อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพของสับปะรด

- เครื่องชั่ง (ความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง)

- เครื่องวัดของแข็งที่ละลายได้ (Abbe Refractometer) รุ่น 3L บริษัท Bausch & Lomb ประเทศสหรัฐอเมริกา

- เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Meat Shear) รุ่น 2000 บริษัท G-R Electric Mfg Co. ประเทศสหรัฐอเมริกา

- แผ่นเทียบสี Munsell Colour Chart

- ตู้อบสุญญากาศ (DUO Vac oven) บริษัท Lab-line Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

- เครื่องวัดความหนืด (Haake Vicosimeter) รุ่น CV20 ประเทศเยอรมัน

- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) รุ่น PHM 61a บริษัท Radiometer A/L Copenhagen ประเทศเดนมาร์ก

- เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (RH-meter) Rustrak Range ประเทศเดนมาร์ก

- อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก

5. อุปกรณ์และเครื่องมือในการอบแห้ง

- เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน (Air dryer)

วิธีการ

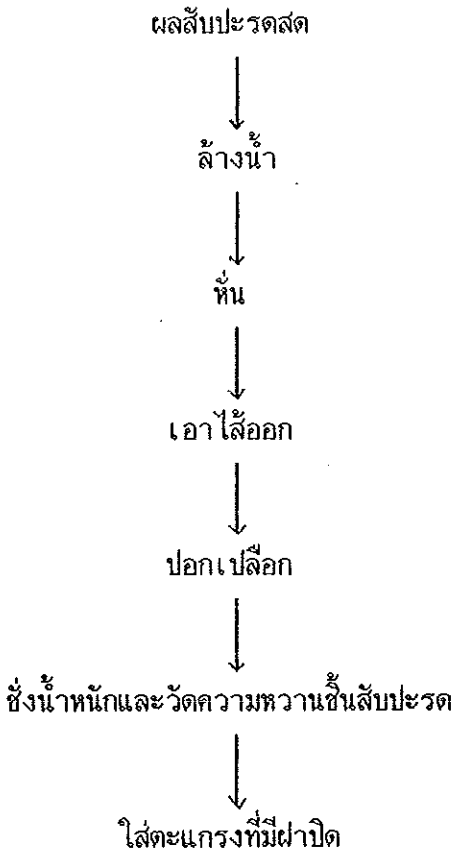
ตอนที่ 1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิส

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1 การกวน

การเตรียมวัตถุดิบ ทำการเตรียมวัตถุดิบโดยนำสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียมาล้างน้ำ หั่นเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. เอาไส้ออก ปอกเปลือก ตรวจคุณภาพของสับปะรดอันประกอบด้วย การชั่งน้ำหนัก และการวัดความหวาน ในรูปของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ซึ่งในการวัดความหวานของชิ้นสับปะรดเริ่มต้นนั้นไม่สามารถวัดจากชิ้นสับปะรดที่จะนำไปทำการออสโมซิสได้โดยตรงแต่จะวัดความหวานของชิ้นข้างเคียง แล้วนำไปเขียนกราฟเพื่อหาความหวานของชิ้นที่ต้องการ และแต่ละชิ้นของสับปะรดที่ใช้ในการออสโมซิสจะทำเครื่องหมายโดยให้หมายเลขกำกับไว้ เพื่อจะได้ทราบความหวานและน้ำหนักที่แน่นอนของแต่ละชิ้น ในการออสโมซิสแต่ละชุดการทดลองใช้สับปะรดจำนวน 5 ชิ้น วางเรียงกันโดยมีชอดลวดที่ใช้เป็นหมายเลขกำกับป้องกันการซ้อนทับกันของสับปะรด ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบดังแสดงในรูปที่ 15

การศึกษาผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อกระบวนการออสโมซิส โดยนำสับปะรดรูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. รัศมีวงใน 0.95 ซม. และรัศมีวงนอก 4 ซม. ไปทำการออสโมซิสในถังออสโมซิสภายใต้สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำ



รูปที่ 15 การเตรียมวัตถุดิบก่อนการออสโมซิส

เชื่อมต่อสับปะรด 8:1 (โดยน้ำหนัก) ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 70 องศาบริกซ์ ก่อนทำการออสโมซิสตรวจคุณภาพน้ำเชื่อมโดย หาความหนาแน่นและความหนืด กำหนดความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อมขณะที่ทำการทดลอง 7 ระดับคือ 0, 25, 50, 100, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที ทำการออสโมซิสเป็นเวลา 160 นาที ตรวจคุณภาพชิ้นสับปะรดโดยวัดความหวานและชั่งน้ำหนักทุก ๆ 20 นาที นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ความแปรปรวน และการถดถอย (Johnson, 1984) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล และค่าเรนโนลนัมเบอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกวนในกระบวนการออสโมซิส ทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมจำนวนชุดการทดลอง = 2x7 = 14 ชุดการทดลอง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดและคำนวณคือ

1.1.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.1.2 เรนโนลนัมเบอร์ (N_{Re}) (Dickey and Fenic, 1976)

1.2 อุณหภูมิ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการออสโมซิส ทำการทดลองโดยเตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกับข้อ 1.1 แล้วนำสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. รัศมีวงใน 0.95 ซม. และรัศมีวงนอก 4 ซม. ไปออสโมซิสในถังออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ที่แบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกคือ น้ำเชื่อมที่เติมกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.35 เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ ร่วมกับโปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟต ร้อยละ 0.1 เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ และช่วยยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลทั้งที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ (Mehta, et al., 1982) และชุดที่สองคือน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี (ชุดควบคุม) สภาวะของการออสโมซิสประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 (โดยน้ำหนัก) ความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อม 150-200 รอบต่อนาที (ความเร็วที่เลือกได้จากข้อ 1.1) และใช้อุณหภูมิในการทดลอง 4 ระดับคือ 30, 40, 50 และ 60 °ซ ทำการออสโมซิสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตรวจคุณภาพชิ้นสับปะรดโดยการวัดความหวาน และชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.1 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการออสโมซิส และคำนวณหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 °ซ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด = 2x2x4 = 16 ชุดการทดลอง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดและคำนวณคือ

1.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Beristain, et al., 1990)

1.2.3 อัตราการแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.2.4 อัตราการแพร่ของน้ำ (Beristain, et al., 1990)

1.2.5 เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (Siripatana, 1986)

1.2.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส (โดยวัดค่าแรงเฉือน)

1.3 ความเข้มข้นน้ำเชื่อม

1.3.1 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อกระบวนการออสโมซิส

การศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อกระบวนการออสโมซิส ทำการเตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกับข้อ 1.1 แล้วนำสับปะรดรูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. รัศมีวงใน 0.95 ซม. และรัศมีวงนอก 4 ซม. ไปออสโมซิสในถังออสโมซิสภายใต้สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °ซ (อุณหภูมิที่เลือกได้จากข้อ 1.2) อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 (โดยน้ำหนัก) ความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อม 150-200 รอบต่อนาทีและใช้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 40, 50, 60 และ 70 องศาบริกซ์ ซึ่งน้ำเชื่อมแต่ละระดับแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกคือน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีเช่นเดียวกับข้อ 1.2 และชุดที่สองคือน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี ทำการออสโมซิสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตรวจคุณภาพชิ้นสับปะรดเช่นเดียวกับข้อ 1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.1 เพื่อหาความเข้มข้นน้ำเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการออสโมซิส และคำนวณหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 40, 50, 60 และ 70 องศาบริกซ์ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด = 2x2x4 = 16 ชุดการทดลอง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดและคำนวณ คือ

1.3.1.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.3.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Beristain, et al., 1990)

1.3.1.3 อัตราการแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.3.1.4 อัตราการแพร่ของน้ำ (Beristain, et al., 1990)

1.3.1.5 เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (Siripatana, 1986)

1.3.2 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ทำการทดลองโดยเตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกับข้อ 1.1 แล้วนำไปออสโมซิสที่ความเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ภายใต้สภาวะการทดลองอันประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด ขนาดและรูปร่างของสับปะรด และความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อมเช่นเดียวกับข้อ 1.3.1 ทำการออสโมซิสเป็นเวลา 3, 5, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง แล้วนำมาอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Air drying) ที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เก็บรักษาในกล่องพลาสติก ปิดฝาสนิทเป็นเวลา 1 วัน ที่อุณหภูมิ 4 °ซ ทำการทดลอง 1 ซ้ำ รวมจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด = 2x5 = 10 ชุดการทดลอง ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้าน สี ความหวาน ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวมของผลิตภัณฑ์สับปะรดแห้ง โดยการให้คะแนนแบบ hedonic scale ประกอบด้วย 9 ระดับคะแนนเมื่อระดับคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และระดับคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด (Larmond, 1977) ใช้ผู้ทดสอบชิม 30 คน นำคะแนนที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองโดยใช้ DMRT (Duncan's Multiple Rang Test) (Johnson, 1984) เพื่อหาความเข้มข้นน้ำเชื่อมที่เหมาะสมต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

1.4 ขนาดและรูปร่างของสับปะรด

การศึกษาผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อกระบวนการออสโมซิส ทำการเตรียมวัตถุดิบโดยนำผลสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียมาล้างน้ำ แล้วหั่นให้มีขนาดและรูปร่าง 2 ลักษณะคือ รูปร่างเป็นแว่นหนา 1.2 ซม. รัศมีวงใน 0.95 ซม. รัศมีวงนอก 4 ซม. และรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์หนา 1.5 ซม. นำสับปะรดทั้ง 2 ลักษณะไปตรวจคุณภาพเช่นเดียวกับการเตรียมวัตถุดิบในข้อ 1.1 แล้วทำการออสโมซิสในถังออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ (ความเข้มข้นน้ำเชื่อมที่เลือกได้จากข้อ 1.3) ที่มีการเติมสารเคมี (เช่นเดียวกับข้อ 1.2) และไม่เติมสารเคมี ภายใต้สภาวะการทดลองอันประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด และความเร็วใบพัดในการกวน

น้ำเชื่อม เช่นเดียวกับข้อ 1.3.1 ทำการออสโมซิส 5 ชั่วโมง ตรวจคุณภาพเช่นเดียวกับข้อ 1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.1 เพื่อศึกษาผลของขนาดและรูปร่างต่อกระบวนการออสโมซิสและคำนวณหาเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด = 2x2x2 = 8 ชุดการทดลอง พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดและคำนวณ คือ

1.4.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (Beristain, et al., 1990)

1.4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Beristain, et al., 1990)

1.4.3 การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลของชิ้นสับปะรด (Beristain, et al., 1990)

1.4.4 การสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรด (Beristain, et al., 1990)

1.4.5 เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (Siripatana, 1986)

ตอนที่ 2 การอบแห้ง

วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการอบแห้งสับปะรดแว่นที่ผ่านการออสโมซิสในสภาวะที่คัดเลือกจากข้อ 1.1 ถึง 1.3 โดยใช้ลมร้อน ที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เพื่อทำการศึกษา

2.1 ซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรด (Henderson, 1952)

2.2 อัตราการอบแห้งของสับปะรด (Singh and Heldman, 1984)

2.3 การยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Larmond, 1977)

สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส ทำการทดลองโดยนำสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสและอบแห้งแล้วเก็บรักษาในกล่องพลาสติกปิดฝาสนิทเป็นเวลา 1 วัน ที่อุณหภูมิ 4 °ซ ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายในตลาดหาดใหญ่ โดยใช้ผู้ทดสอบชิม 10 คน เพื่อประเมินการยอมรับและวิเคราะห์ผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.3.2

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดสดและผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้ง

3.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Abbe Refractometer)

3.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Lane and Eyon method; A.O.A.C. 1990)

3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Lane and Eyon method; A.O.A.C. 1990)

3.4 ปริมาณความชื้น (A.O.A.C. 1990)

3.5 ปริมาณกรดทั้งหมด (ในรูปกรดซิตริก) (A.O.A.C. 1990)

3.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter)

3.7 วอเตอร์แอคติวิตี (RH-meter)

3.8 ค่าสี (Munsell Colour Chart)

3.9 ความหนาแน่น (โดยการคำนวณ)

ผลและวิจารณ์

ตอนที่ 1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิส ได้แก่ การกวน อุณหภูมิ ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ขนาดและรูปร่างของสับปะรด

1.1 การกวน

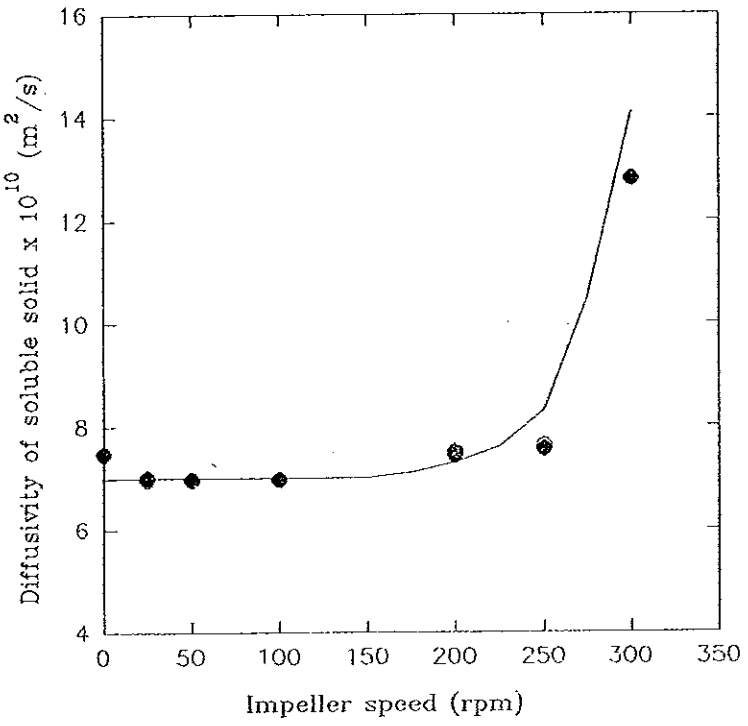
อัตราการซึมเข้าของน้ำตาลและการซึมออกของน้ำจากชิ้นสับปะรดขึ้นอยู่กับความต้านทานการแพร่ภายในชิ้นสับปะรด และความต้านทานการส่งผ่านมวลสารที่ผิวของชิ้นสับปะรด สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานภายในโดยตรง ในทางทฤษฎีการกวนจะทำให้ความต้านทานภายนอกลดลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ทำให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวลสารระหว่างผิว (interface mass transfer coefficient) เพิ่มขึ้น (Singh and Heldman, 1984) เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ถูกต้อง จำเป็นต้องลดความต้านทานภายนอกลงโดยการกวน ดังนั้นในการศึกษาผลของการกวนนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาความเร็วในการกวนต่ำสุดที่ทำให้ความต้านทานภายนอกมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความต้านทานภายในและความเร็วในการกวนสูงสุดที่ไม่ทำให้ชิ้นสับปะรดฉีกขาด

จากการทดลองใช้ความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อม 7 ระดับคือ 0, 25, 50, 100, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที ซึ่งเทียบเท่ากับค่าเรนโนลนัมเบอร์ (N_{Re}) 0, 17, 57, 70, 137, 175 และ 209 ตามลำดับ (ตารางที่ 5 และภาคผนวก ค) นำค่าความหวานของน้ำเชื่อมที่เวลาในการออสโมซิสแตกต่างกัน มาหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่ความเร็วใบพัด 0 ถึง 250 รอบต่อนาที (N_{Re} 0-175) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนที่ความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที (N_{Re} 209) มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ในทางทฤษฎีการกวนทำให้น้ำเชื่อมไหลเวียนได้ดีและมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่มีการกวนควรมีค่าสูงกว่าที่ไม่มีการกวน (Ponting, et al., 1966) แต่จาก

ตารางที่ 5 ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและเรนโนลนัมเบอร์ในการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ เวลา 160 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

ความเร็วใบพัดในการกวน (รอบ/นาที)	เรนโนลนัมเบอร์	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล x 10^{10} (เมตร^2/วินาที)
0	0	7.235^{b*}
25	17	6.985^{b}
50	34	6.675^{b}
100	68	6.750^{b}
200	137	7.470^{b}
250	175	7.585^{b}
300	209	14.100^{a}

* ค่าในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)



รูปที่ 16 ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 70 องศาบริกซ์ เวลา 160 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความเร็วในการกวนจาก 0 ถึง 250 รอบต่อนาที ไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองนี้สับปะรดทับซ้อนกันน้อยมาก และอุณหภูมิที่ใช้ในการออสโมซิสคือ 50 °ซ ซึ่งทำให้เกิดกระแสการพาตามธรรมชาติอย่างเพียงพอ มีผลให้น้ำที่เคลื่อนที่ออกมาจากเซลล์สับปะรดเข้าไปละลายรวมกับน้ำเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกที่กีดขวางการแพร่ภายนอกชิ้นสับปะรด เช่น แผ่นฟิล์มของน้ำเชื่อมที่บริเวณรอบ ๆ ชิ้นสับปะรด มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานภายในชิ้นสับปะรด เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่คำนวณได้จึงใกล้เคียงกัน ส่วนการกวนที่ความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่คำนวณได้สูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วระดับนี้กระแสน้ำเชื่อมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ทำให้ชิ้นสับปะรดเริ่มฉีกขาด มีพื้นที่ในการแพร่เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่ได้จากการคำนวณจึงมีค่าสูงขึ้น ทั้ง ๆ ที่ตามทฤษฎีแล้วสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในชิ้นสับปะรด ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของสารละลายภายนอกชิ้นสับปะรด การที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงนั้นอาจเนื่องจากพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรที่ใช้ในการคำนวณคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวที่เกิดจากการฉีกขาดเนื่องจากกระแสน้ำเชื่อมได้ เพราะขาดวิธีการวัดที่เหมาะสม ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เพิ่มขึ้นจึงสะท้อนให้เห็นถึงระดับของการฉีกขาดมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แท้จริง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกับความเร็วใบพัดในการกวนมาวิเคราะห์การถดถอยโดยฟิตเข้ากับสมการในรูปแบบต่างๆ เช่น สมการเชิงเส้น สมการควอแดรติค (quadratic equation) สมการยกกำลัง และสมการอื่นๆ พบว่าสมการที่สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (9) (Spiegel, 1968)

$$D = 6.5/\cos\ (b\ S_1\ \pi/800) \qquad (9)$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (เมตร^2/วินาที)

S_1 = ความเร็วใบพัดในการกวน 0 rpm < S < 300 rpm

b = 0.86 จัดเป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับความเปราะบางของชั้นสับปะรดต่อการกระทบกับกระแสน้ำเชื่อมที่พัดผ่าน ยิ่ง b มีค่าสูงชั้นสับปะรดก็ยิ่งเปราะบางมากขึ้น

ดังนั้นแม้ว่าการกวนน้ำเชื่อมที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่คำนวณได้สูงสุด แต่สังเกตพบการฉีกขาดของชิ้นสับปะรดซึ่งมีผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงเลือกใช้ความเร็วใบพัดในการกวนน้ำเชื่อมช่วง 150-200 รอบต่อนาที (ค่าเรนโนลนัมเบอร์อยู่ในช่วง 100-137) ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า ความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกชิ้นสับปะรดมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ นอกจากนี้การกวนในระดับนี้มีกำลังแรงเพียงพอที่จะช่วยป้องกันไม่ให้ชิ้นสับปะรดทับกัน

1.2 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของน้ำและน้ำตาลมีการเคลื่อนไหวมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ และปฏิกิริยาทางชีวเคมีสูงขึ้น การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาเชิงปริมาณ ถึงผลของอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการแพร่และการออสโมซิส

จากการทดลองที่อุณหภูมิในการออสโมซิส 4 ระดับคือ 30, 40, 50 และ 60 °ซ ในน้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ที่เติมกรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0.35 และโปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 0.1 ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำตาล และของน้ำหนักชิ้นสับปะรด ที่เวลาต่างๆ นำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำ อัตราการแพร่ของน้ำตาลและของน้ำ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำ วัดค่าแรงเฉือน (Shear force) ทุกชั่วโมงจนครบ 5 ชั่วโมง ได้ผลดังต่อไปนี้

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการออสโมซิส สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลมีค่าสูงขึ้น ($P<0.05$) (ตารางที่ 6 และรูปที่ 17) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) โดยสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะเร็วขึ้น ทำให้น้ำแพร่ออกจากชิ้นสับปะรดและน้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นสับปะรดได้เร็วยิ่งขึ้น น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมีและน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 60 °ซ

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลกับอุณหภูมิมาวิเคราะห์การถดถอยโดยฟิตเข้ากับสมการเอมไพริคัลหลายรูปแบบ พบว่าสมการที่สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (10) (Spiegel, 1968)

$$D_s = c + a/cos[(T\ b)\ \pi / 200)] \qquad (10)$$

เมื่อ D_s = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล (เมตร^2/วินาที)

T = อุณหภูมิในการออสโมซิส $30\ ^\circ C < T < 60\ ^\circ C$

a,b,c = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้จากสมการที่ (10) มีค่า 30.72, 1.04, -28.97 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

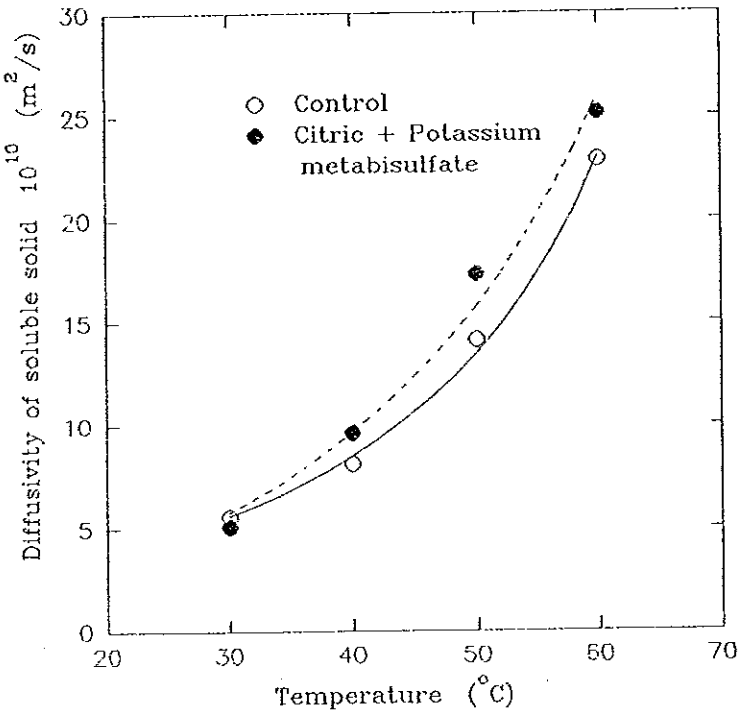
ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 60 °ซ ซึ่งทำให้การออสโมซิสใช้เวลาสั้นลง แต่จากการทดลองของ Ponting และคณะ (1966) พบว่าการใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสสูงกว่า 49 °ซ จะทำให้ผลไม้สูญเสียกลิ่นรส ดังนั้นที่อุณหภูมินี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการออสโมซิส

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น จากผลการทดลองดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 6 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในการออสโมซิสสับปะรด โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

อุณหภูมิ (°ซ)	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล x 10^{10} (เมตร^2/วินาที)	
	น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี
30	5.58^{c*}	5.08^{d}
40	8.12^{c}	9.62^{c}
50	14.15^{b}	17.30^{b}
60	22.85^{a}	25.10^{a}

* ค่าในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)



รูปที่ 17 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

ที่ 7 และรูปที่ 18 และพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 °ซ ในกระบวนการออสโมซิสที่ใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี มีค่า 6.14×10^{-10}, 6.82×10^{-10} และ 10.17×10^{-10} เมตร^2/วินาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำจากการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) ซึ่งมีค่าประมาณ 7×10^{-10}, 11×10^{-10} และ 26×10^{-10} เมตร^2/วินาที ตามลำดับ (รูปที่ 5) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสับปะรดที่ใช้มีความแก่-อ่อน หรือมาจากแหล่งปลูกที่มีสภาวะแวดล้อมต่างกัน ถึงแม้จะใช้สายพันธุ์ปัตตาเวียเช่นเดียวกัน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำกับอุณหภูมิมาวิเคราะห์การถดถอยโดยฟิตเข้ากับสมการเอมไพริคัลหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 18 สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุด ด้วยสมการที่ (11) (Spiegel, 1968)

$$D_w = c + a/\cos [(T\ b)\ \pi /200)] \qquad (11)$$

เมื่อ D_w = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (เมตร^2/วินาที)

T = อุณหภูมิในการออสโมซิส $30\,^{\circ}C < T < 60\,^{\circ}C$

a,b,c = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้จากสมการที่ (11) มีค่า 3.17, 1.04 2.46 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

อัตราการแพร่ของน้ำตาล เพื่อศึกษาอัตราการแพร่ ซึ่งได้ให้นิยามการแพร่ของน้ำตาลไว้ดังนี้

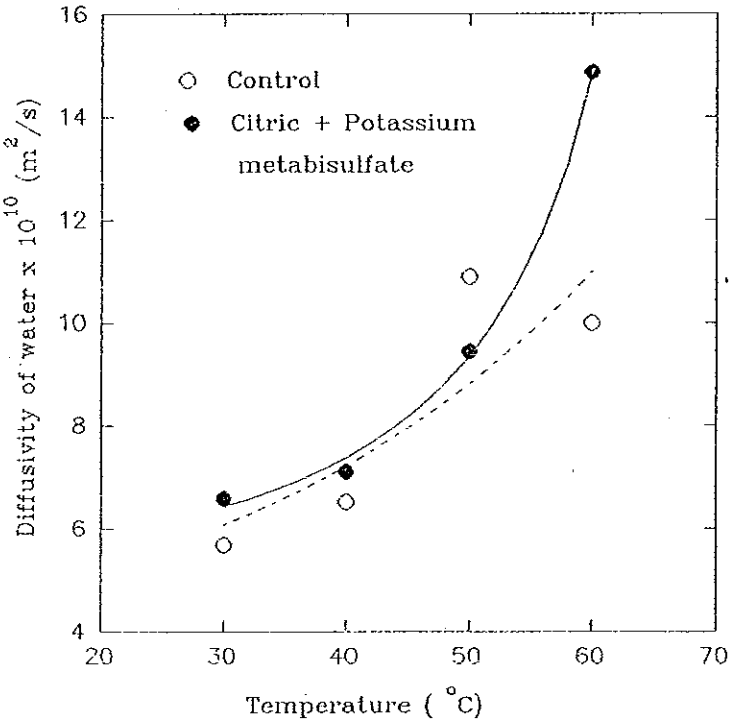
$$E_s = 1 - (SG_t/SG_\infty) = j\ exp\ [-q^2\ (D\ t/l^2)] \qquad (12)$$

ดังนั้น อัตราการแพร่ของน้ำตาล $= (dE_s/dt) = -(q^2\ D\ /\ l^2)\ E$

ตารางที่ 7 ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในการออสโมซิสสับปะรดโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

อุณหภูมิ (°ซ)	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ x 10^{10} (เมตร^2/วินาที)	
	น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี
30	5.68^{d*}	6.59^{c}
40	6.52^{c}	7.11^{c}
50	10.86^{a}	9.45^{b}
60	10.00^{b}	14.86^{a}

* ค่าในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P<0.05)



รูปที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

เมื่อ SG_t = ของแข็งที่เพิ่มขึ้นที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

SG_∞ = ของแข็งที่เพิ่มขึ้นที่จุดสมดุล (ร้อยละ)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (เมตร^2/วินาที)

t = เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)

j = lag factor, เป็นฟังชั่นกับรูปร่างของชิ้นสับปะรด และอุณหภูมิ

q = พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับ Biot number (Bi), Extraction factor (α) และรูปร่างของชิ้นสับปะรด

l = ขนาดของชิ้นสับปะรด (characteristic dimension) (เมตร)

ดังนั้นอัตราการแพร่จึงสัมพันธ์กับเวลา สัมประสิทธิ์การแพร่ lag factor ของแข็งที่เพิ่มขึ้นที่เวลาอนันต์และ q ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และปัจจัยอื่น ๆ ดังที่จะอธิบายต่อไป จากนิยามของอัตราการแพร่ของน้ำตาลจะเห็นว่า ค่า (dE/dt) มีค่าเป็นลบ แสดงว่าอัตราการแพร่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อความเข้มข้นของระบบเข้าใกล้สภาวะสมดุล อัตราการแพร่ก็เข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าอัตราการแพร่แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ และ q^2 และแปรผกผันกับขนาดของชิ้นสับปะรดยกกำลังสอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 มีการกวนอย่างเพียงพอ (Bi--> ∞) และใช้ชิ้นสับปะรดที่มีขนาดและรูปร่างเหมือนกันเกือบทั้งหมด ดังนั้นพารามิเตอร์ q^2 และ l^2 จึงมีค่าคงที่ อัตราการแพร่จึงขึ้นอยู่กับ t, j, SG_∞ และ D ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นสับปะรด และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดและในสารละลายน้ำเชื่อม ในระหว่างการทดลองได้พยายามใช้สับปะรดที่มีความแก่-อ่อนใกล้เคียงกัน เพื่อลดความผันแปรเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของชิ้นสับปะรดให้น้อยที่สุด และศึกษาผลของปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายน้ำเชื่อม

ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น ซึ่งตามสภาวะในการทดลองนี้ ก็คืออัตราการแพร่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั่นเอง เพราะปัจจัยอย่างอื่นมีค่าค่อนข้างคงที่ สับปะรดที่ทำแห้งด้วยวิธีออสโมติกในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมีที่มีความเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 30, 40 50 และ 60 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีการเพิ่มของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดเฉลี่ยร้อยละ 15.23, 19.75, 22.33 และ 24.79 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 19 ทั้งนี้เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และการแช่สับปะรดที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเพียงพอ มีผลทำให้ผนังเซลล์ของสับปะรดยอมให้น้ำตาลแพร่เข้าสู่ชิ้นสับปะรดได้ง่ายขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 20 แต่พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองครั้งนี้มีค่าสูงกว่าทั้ง 2 การทดลองที่กล่าวถึงซึ่งไม่มีการกวนน้ำเชื่อม ถึงแม้จะใช้อุณหภูมิ ความเข้มข้นน้ำเชื่อม และเวลาในการออสโมซิสเท่ากัน จึงทำให้ความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารภายนอกมีมาก เป็นผลให้การแพร่ของน้ำตาลช้าลง การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดจึงมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิและเวลาในการออสโมซิสใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีทำให้การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อใช้น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารเคมีที่ละลายอยู่ในน้ำเชื่อม (โปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟต และกรดซิตริก) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายในชิ้นสับปะรด ส่งผลให้การกีดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำตาลน้อยลง

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอย โดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 19 สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุดด้วยสมการที่ (13) (Spiegel, 1968)

$$SG = (a\ t+e)\ (tanh(T/30-d)+1)+b\ t+c \qquad (13)$$

เมื่อ SG = ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่ม (ร้อยละ)

ตารางที่ 8 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการออสโมซิสต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรด ที่ทำการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

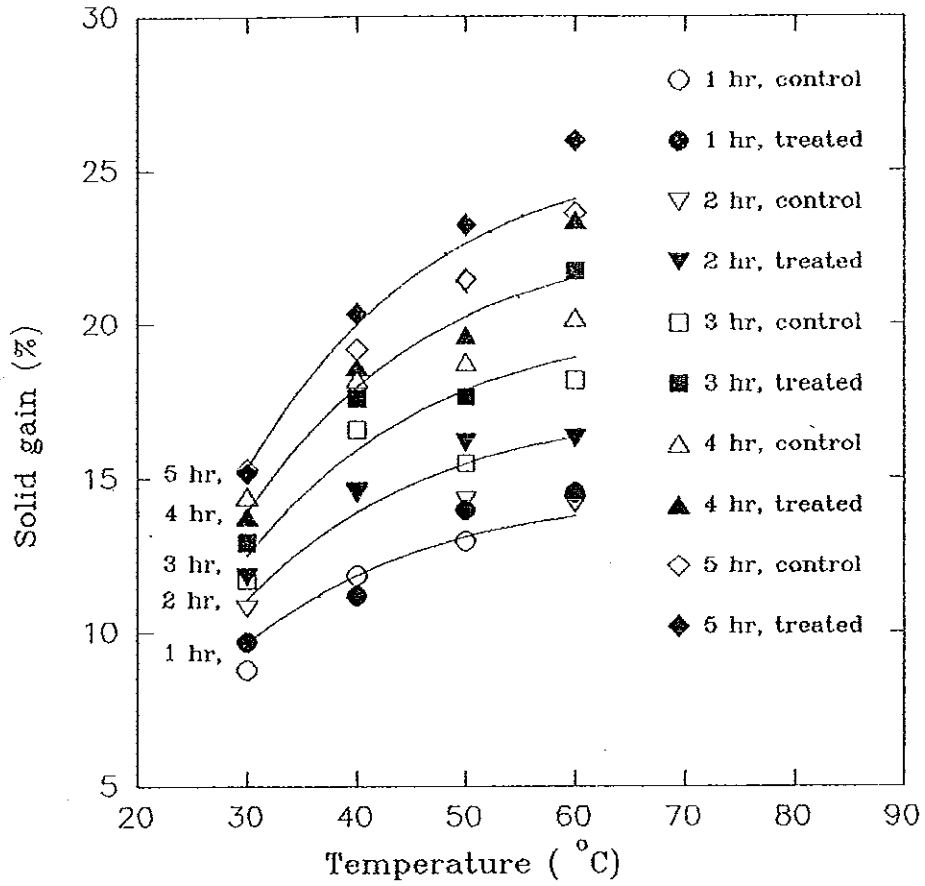
อุณหภูมิ (°ซ)	เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)	การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (ร้อยละ)		DIFF
		น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี	
30	1	8.79^{e1}	9.68^{e}	-0.89*
	2	10.79^{d}	11.83^{d}	-1.06**
	3	11.70^{c}	12.93^{c}	-1.23**
	4	14.41^{b}	13.75^{b}	0.66^{ns}
	5	15.29^{a}	15.17^{a}	0.12^{ns}
40	1	11.85^{e}	11.18^{e}	0.67^{ns}
	2	14.53^{d}	14.61^{d}	-0.08^{ns}
	3	16.53^{c}	17.58^{c}	-1.01**
	4	18.21^{b}	18.61^{b}	-0.40^{ns}
	5	19.17^{a}	20.33^{a}	-1.18**
50	1	12.96^{e}	13.98^{e}	-1.02**
	2	14.27^{d}	16.17^{d}	-1.90**
	3	15.48^{c}	17.64^{c}	-2.16**
	4	18.76^{b}	19.64^{b}	-0.88*
	5	21.44^{a}	23.21^{a}	-1.77**
60	1	10.27^{e}	14.52^{e}	-4.25**
	2	14.16^{d}	16.29^{d}	-2.13**
	3	18.18^{c}	21.72^{c}	-3.58**
	4	20.20^{b}	23.34^{b}	-3.14**
	5	23.61^{a}	25.96^{a}	-2.35**

* มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

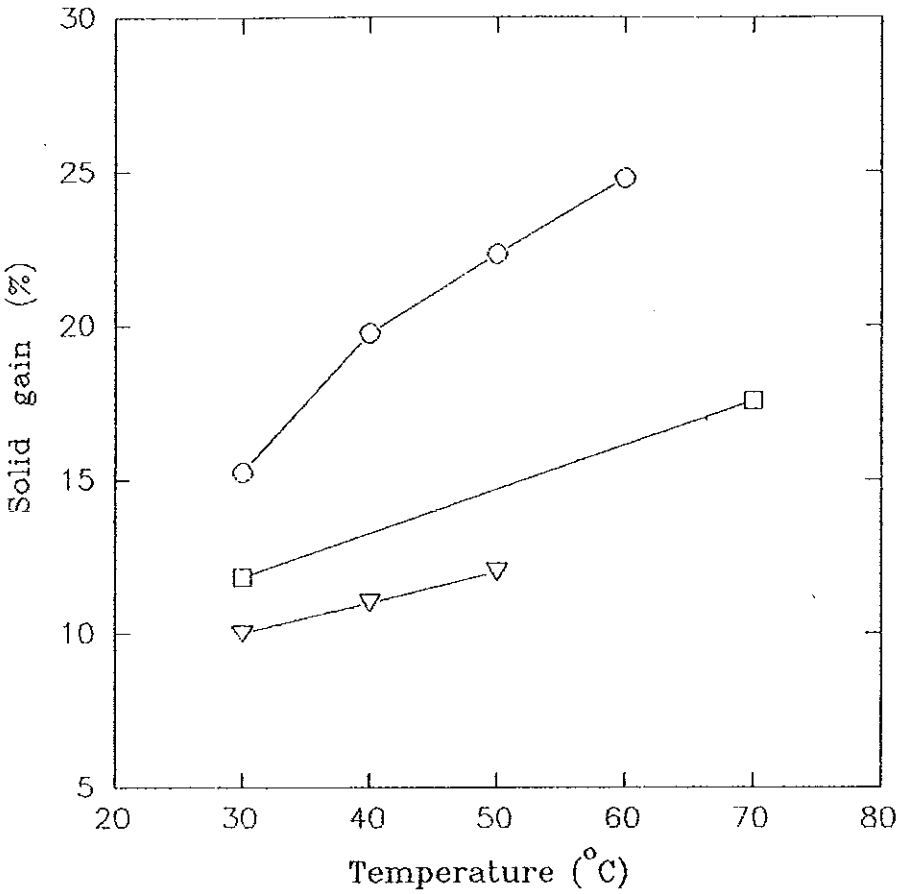
** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

[1] ค่าในสดมภ์เดียวกันของแต่ละอุณหภูมิที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)



รูปที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1



รูปที่ 20 ผลของอุณหภูมิต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดจากการทดลอง (○) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2525) (□)

T = อุณหภูมิในการออสโมซิส $30\,^{\circ}C < T < 60\,^{\circ}C$

t = ระยะเวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)

a,b,c,d,e = พารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตสมการที่ (13) มีค่า 5.29, -7.78, -15.33, 0.04 และ 13.51 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

tanh = hyperbolic tangent function

อัตราการแพร่ของน้ำ เพื่อศึกษาอัตราการแพร่ ซึ่งได้ให้นิยมการแพร่ของน้ำไว้ดังนี้

$$E_w = 1 - (WL_t/WL_\infty) = j \exp [-q^2 (D\,t/\,l^2)] \qquad (14)$$

ดังนั้นอัตราการแพร่ของน้ำ = $(dE_w/dt) = -(q^2\,D\,/\,l^2)\,E$

โดยที่ WL_t = การสูญเสียน้ำที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

WL_∞ = การสูญเสียน้ำที่เวลาอนันต์ (ร้อยละ)

j,q,D,l = มีความหมายเหมือนดังในสมการที่ (12)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ก็เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้นด้วย ดังเหตุผลที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้นในเรื่องอัตราการแพร่ของน้ำตาล อีกทั้งการแพร่ของน้ำและน้ำตาลมีกลไกที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการออสโมซิส น้ำจะแพร่ออกจากชิ้นสับปะรดมากขึ้น (ตารางที่ 9 และรูปที่ 21) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) พบว่าการสูญเสียน้ำของสับปะรดจากการทดลองครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าผลการทดลองของกรุณา วงศ์กระจ่าง (รูปที่ 22) ซึ่งไม่มีการกวนน้ำเชื่อม จึงทำให้การแพร่ของน้ำเกิดชั้นช้า และเป็นเหตุผลเดียวกับการแพร่ของน้ำตาลดังได้อธิบายไว้แล้ว ส่วนผลการทดลองของ Beristain และ คณะ (1990) มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำสูงกว่า โดยเฉพาะ

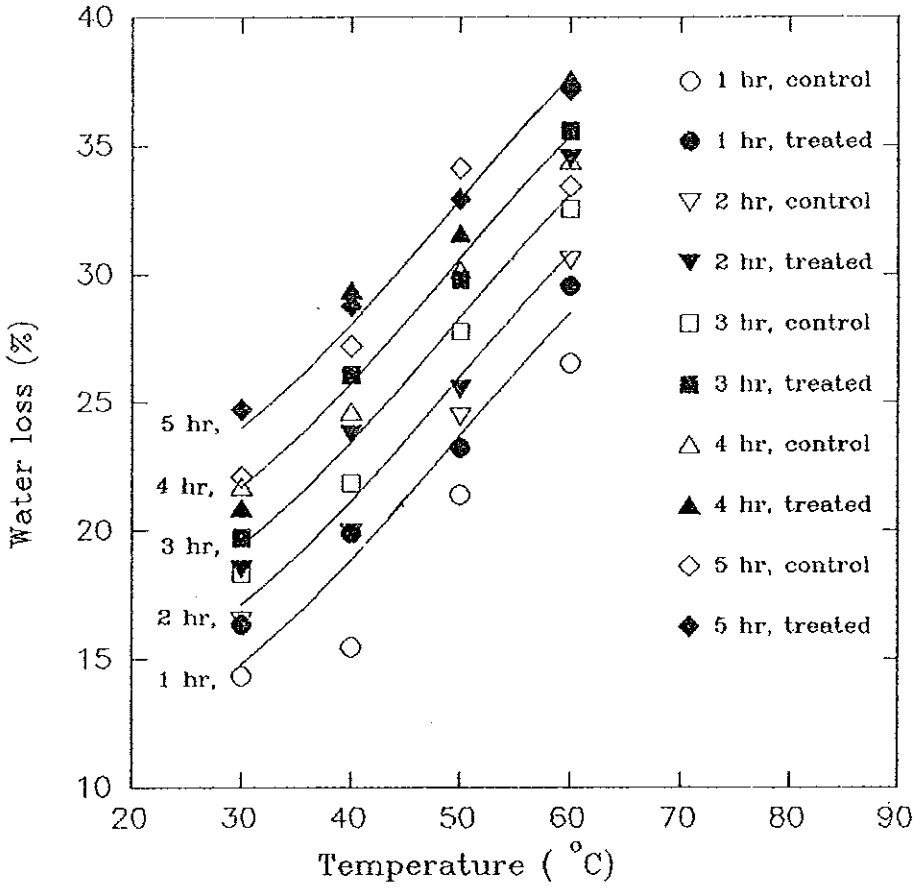
ตารางที่ 9 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการออสโมซิสต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

อุณหภูมิ (°ซ)	เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำ (ร้อยละ)		DIFF
		น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี	
30	1	14.32^{d1}	16.32^{e}	-2.00^{**}
	2	16.51^{c}	18.53^{d}	-2.02^{**}
	3	18.35^{b}	19.72^{c}	-1.37^{**}
	4	21.71^{a}	20.90^{b}	0.81^{*}
	5	22.08^{a}	24.32^{a}	-2.64^{**}
40	1	15.48^{e}	19.88^{d}	-4.90^{**}
	2	19.94^{d}	23.76^{c}	-3.82^{**}
	3	21.84^{c}	26.07^{b}	-4.20^{**}
	4	24.64^{b}	29.35^{a}	-4.71^{**}
	5	27.20^{a}	28.75^{a}	-1.55^{**}
50	1	21.39^{e}	23.23^{e}	-1.84^{**}
	2	24.43^{d}	25.53^{d}	-1.10^{**}
	3	27.75^{c}	29.78^{c}	-2.30^{**}
	4	30.16^{b}	31.56^{b}	-1.40^{**}
	5	34.13^{a}	32.89^{a}	-1.24^{**}
60	1	26.52^{e}	29.53^{e}	-3.01^{**}
	2	30.54^{d}	34.48^{d}	-3.94^{**}
	3	32.51^{c}	35.57^{c}	-3.06^{**}
	4	34.40^{a}	37.60^{a}	-3.20^{**}
	5	33.48^{b}	36.56^{b}	-3.08^{**}

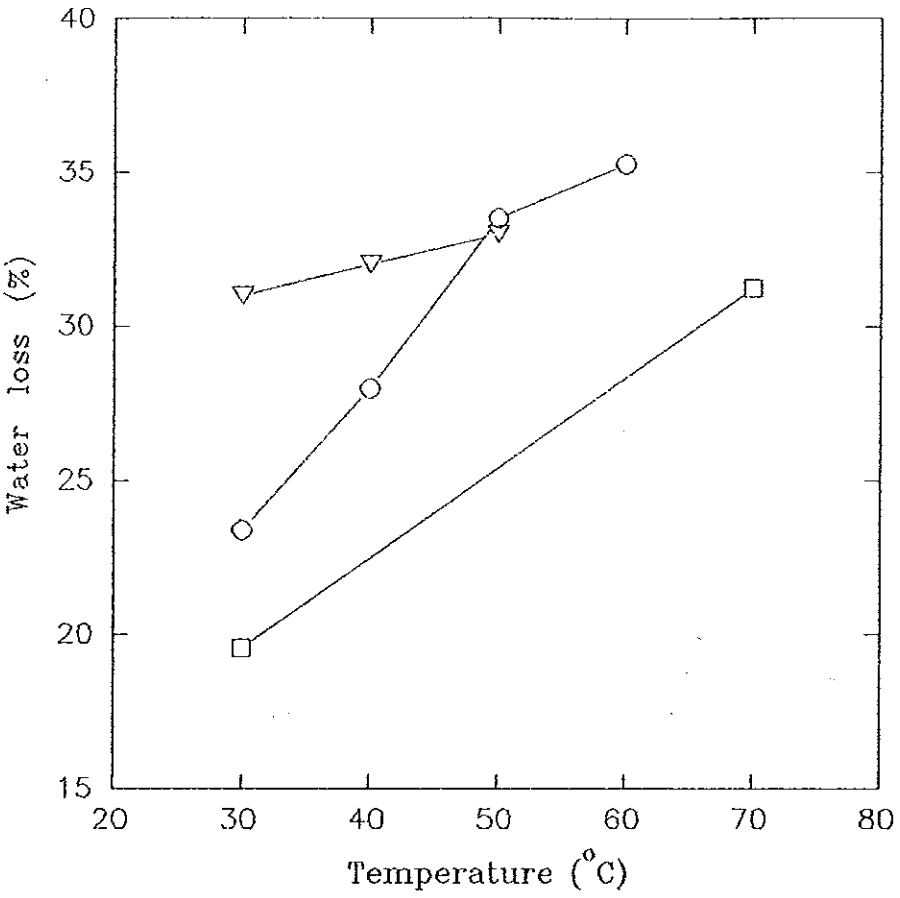
* มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

[1] ค่าในสดมภ์เดียวกันของแต่ละอุณหภูมิที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)



รูปที่ 21 ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1



รูปที่ 22 ผลของอุณหภูมิต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดจากการทดลอง (O) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Beristain และคณะ (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)

ที่อุณหภูมิ 30 และ 40 °ซ ซึ่งขณะนี้ยังไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลเกี่ยวกับความหนาของชิ้นสับปะรดที่คณะผู้วิจัยดังกล่าวใช้ในการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรดที่ออสโมซิสในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมและเติมสารเคมี พบว่าชิ้นสับปะรดที่ออสโมซิสด้วยน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีมีการสูญเสียน้ำมากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับอัตราการแพร่ของน้ำตาล

เมื่อนำการสูญเสียน้ำกับอุณหภูมิในการออสโมซิสมาวิเคราะห์การถดถอย โดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 21 สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุด ด้วยสมการที่ (15) (Spiegel, 1968)

$$WL = a\,(\tanh\,(T/30-d)+1)+b\,t+c \qquad (15)$$

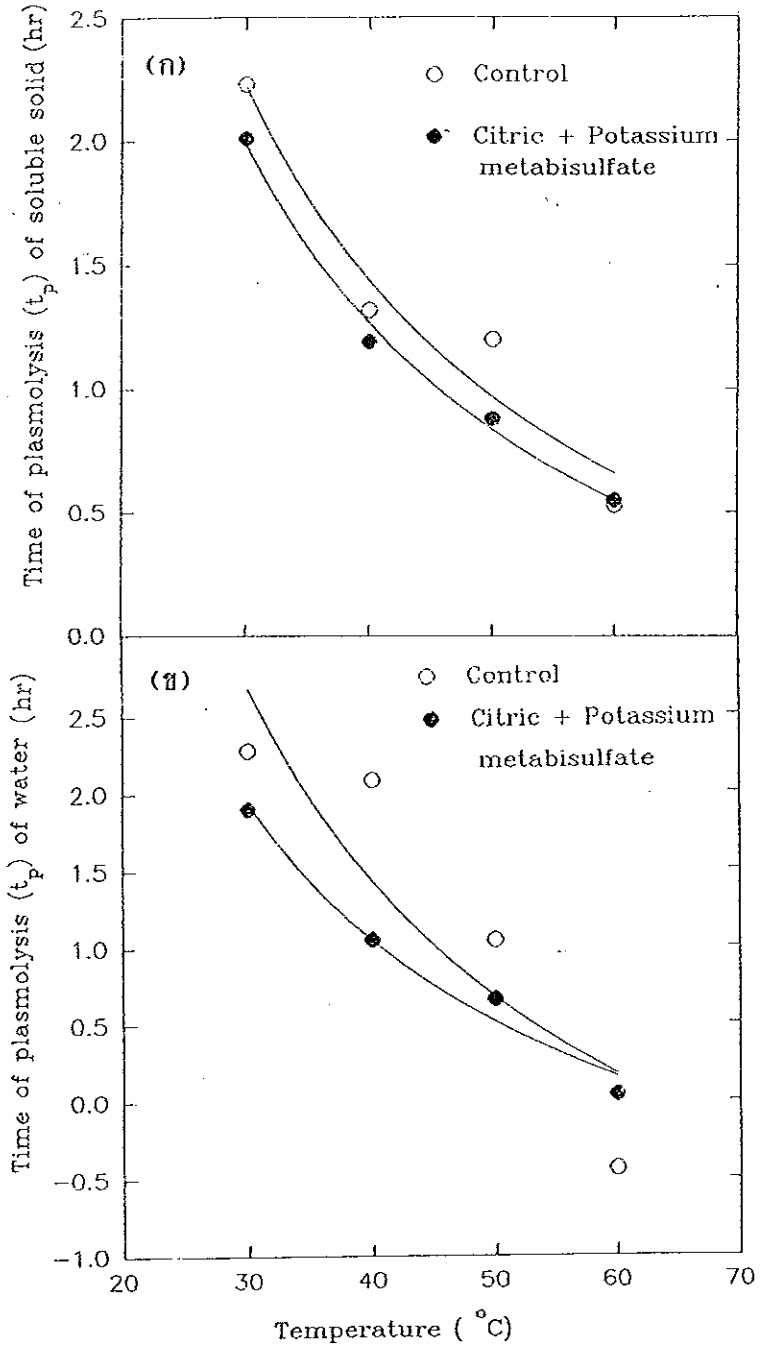
เมื่อ WL = ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากชิ้นสับปะรด (ร้อยละ)

T = อุณหภูมิในการออสโมซิส $30\,^{\circ}C < T < 60\,^{\circ}C$

t = ระยะเวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)

a,b,c,d = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้จากสมการที่ (15) มีค่า 15.03, 2.23, 5.97, 1.64 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (tp) พลาสมอลิซิสคือการแตกออกของผนังเซลล์ เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสเป็นเวลาล่าช้าสมมูลย์ (equivalent delay time) ก่อนที่การแพร่จะเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการออสโมซิสเพิ่มขึ้นเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสทั้งของน้ำตาลและของน้ำมีค่าลดลง (รูปที่ 23(ก) และ 23(ข)) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมีผลให้เซลล์ของสับปะรดแตกเร็วขึ้น ทำให้การแพร่อย่างสมบูรณ์เกิดเร็วขึ้นด้วย อาจเป็นที่สังเกตว่าเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 °ซ มีค่าติดลบเล็กน้อย ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากความผิดพลาดใน



รูปที่ 23 ผลของอุณหภูมิต่อ tp ของน้ำตาล (ก) และ tp ของน้ำ (ข) ในสับปะรดที่มีการออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 50 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

การทดลอง (เป็นเรื่องยากที่จะวัด t_p ให้มีความถูกต้องแม่นยำดีกว่า $\pm$ 20 นาที) หรืออาจจะเนื่องจากเมื่อเริ่มออสโมซิสมีของเหลวหรือน้ำที่อยู่ในชิ้นสับปะรดซึ่งออกมาได้โดยเซลล์ถูกทำให้แตกจากการตัดแต่ง ของเหลวหรือน้ำดังกล่าวได้ถูกชะล้างไปทันทีโดยกระแสของการไหลซึ่งไม่ได้เกิดจากการแพร่ แต่มีอิทธิพลอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมและเติมสารเคมี มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)

เมื่อนำเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำกับอุณหภูมิมาวิเคราะห์การถดถอย โดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 23(ก) และ 23(ข) สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุดด้วยสมการที่ (16) (Spiegel, 1968)

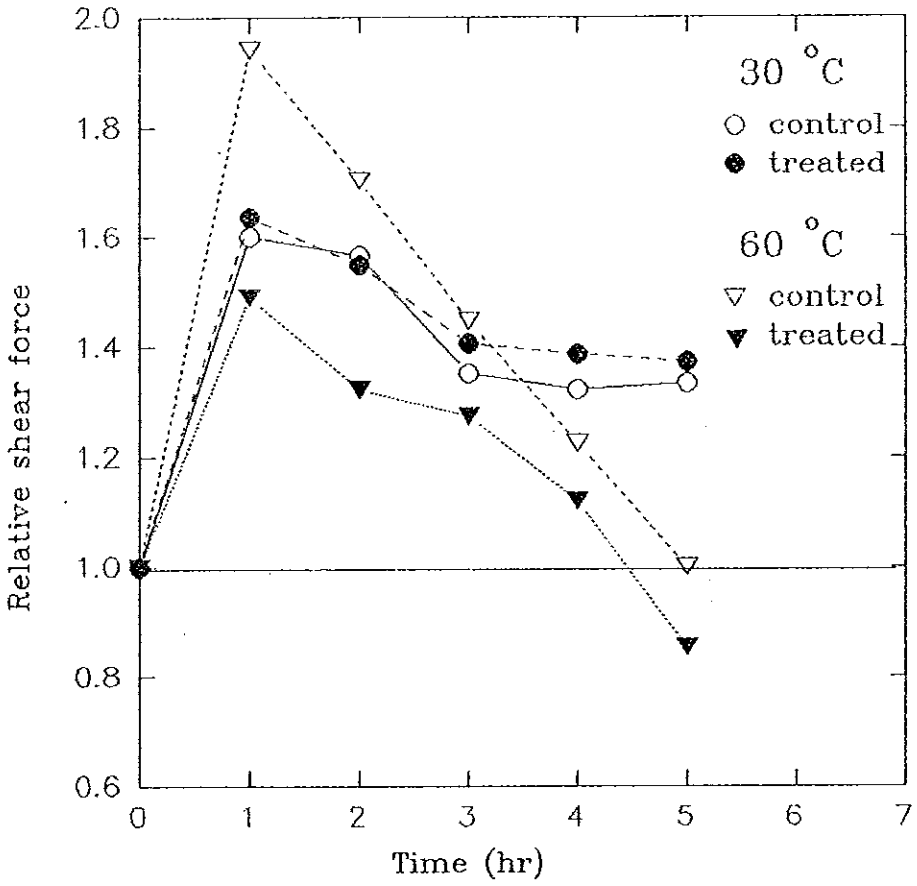
$$t_p = a/T + b \qquad (16)$$

เมื่อ t_p = เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (ชั่วโมง)

T = อุณหภูมิในการออสโมซิส $30\,^{\circ}C < T < 60\,^{\circ}C$

a,b = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้สำหรับ t_p ของน้ำตาลในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมีมีค่า 93.67, -0.91 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีมีค่า 85.98, -0.88 ตามลำดับ และสำหรับ t_p ของน้ำในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมีมีค่า 150.10, -2.33 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี มีค่า 106.30, -1.61 ตามลำดับ

ลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวัดแรงเฉือนของชิ้นสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °ซ เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง เทียบกับแรงเฉือนเริ่มต้นของชิ้นสับปะรดแสดงเป็นค่าแรงเฉือนสัมพัทธ์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 24 พบว่าแรงเฉือนสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 30 °ซ ภายหลังการออสโมซิสเป็นเวลา 1-5 ชั่วโมงมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งหมายถึงค่าแรงเฉือนที่วัดได้หลังการออสโมซิสมีค่าสูงกว่าแรงเฉือนเริ่มต้น



รูปที่ 24 ผลของระยะเวลาในการออสโมซิสสับปะรดต่อแรงเฉือนสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 °ซ

ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างออสโมซิสชิ้นสับปะรดมีการสูญเสียน้ำทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 60 °ซ หลังการออสโมซิสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แรงเฉือนสัมพัทธ์มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่า 1.5 หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งประมาณ 5 ชั่วโมงมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างของสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสมีความแข็งแรงเท่ากับความแข็งแรงเริ่มต้น หลังจากชั่วโมงที่ 5 ของการออสโมซิสความแข็งแรงของชิ้นสับปะรดยังคงมีแนวโน้มลดลงอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไปทำให้โครงสร้างของเซลล์ถูกทำลาย เนื้อสัมผัสจึงนิ่ม ดังนั้นการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 60 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมติก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้าเลือกใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสที่ 60 °ซ มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ ซึ่งทำให้อัตราการแพร่ของน้ำตาลและของน้ำสูงเช่นกัน ส่วนเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำที่อุณหภูมิ 60 °ซ มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิอื่น ๆ มีผลทำให้การแพร่อย่างเต็มที่เกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งทำให้การออสโมซิสใช้เวลาสั้น แต่เมื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการวัดแรงเฉือนพบว่าสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 60 °ซ เวลา 5 ชั่วโมงมีเนื้อสัมผัสนิ่ม และจากการทดลองของ Ponting และ คณะ (1966) พบว่าถ้าใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสสูงกว่า 49 °ซ จะทำให้ผลไม้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสไปจากธรรมชาติ ดังนั้นในการออสโมซิสขั้นตอนต่อไปจึงเลือกใช้อุณหภูมิ 50 °ซ

1.3 ความเข้มข้นน้ำเชื่อม

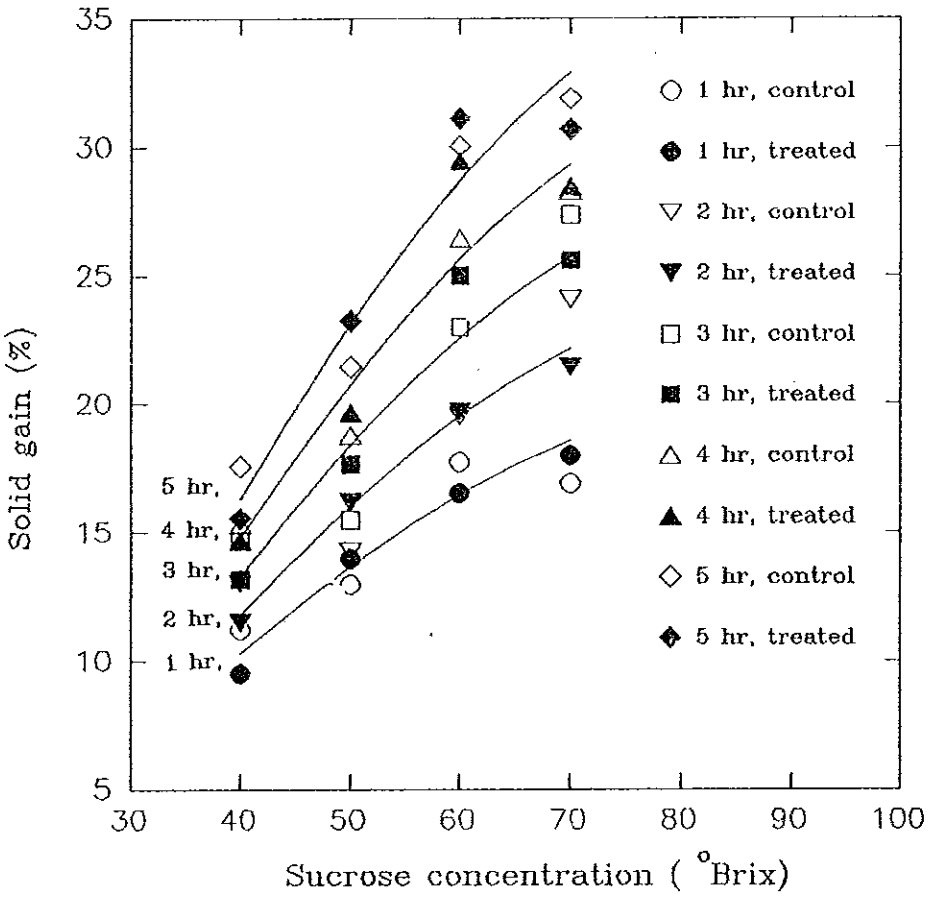
ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อม 4 ระดับ คือ 40, 50, 60 และ 70 องศาบริกซ์ ทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี ที่มีต่อกระบวนการออสโมซิส เป็นผลจากการนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลและน้ำในชิ้นสับปะรด กับเวลาในการออสโมซิสที่ได้จากการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.2 มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ อัตราการแพร่ของน้ำตาล อัตราการแพร่ของน้ำและเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส รวมทั้งทำการประเมินคุณภาพการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสี ความหวาน เนื้อสัมผัส และการยอมรับรวมของผลิตภัณฑ์สับปะรดแห้ง ได้ผลดังนี้คือ

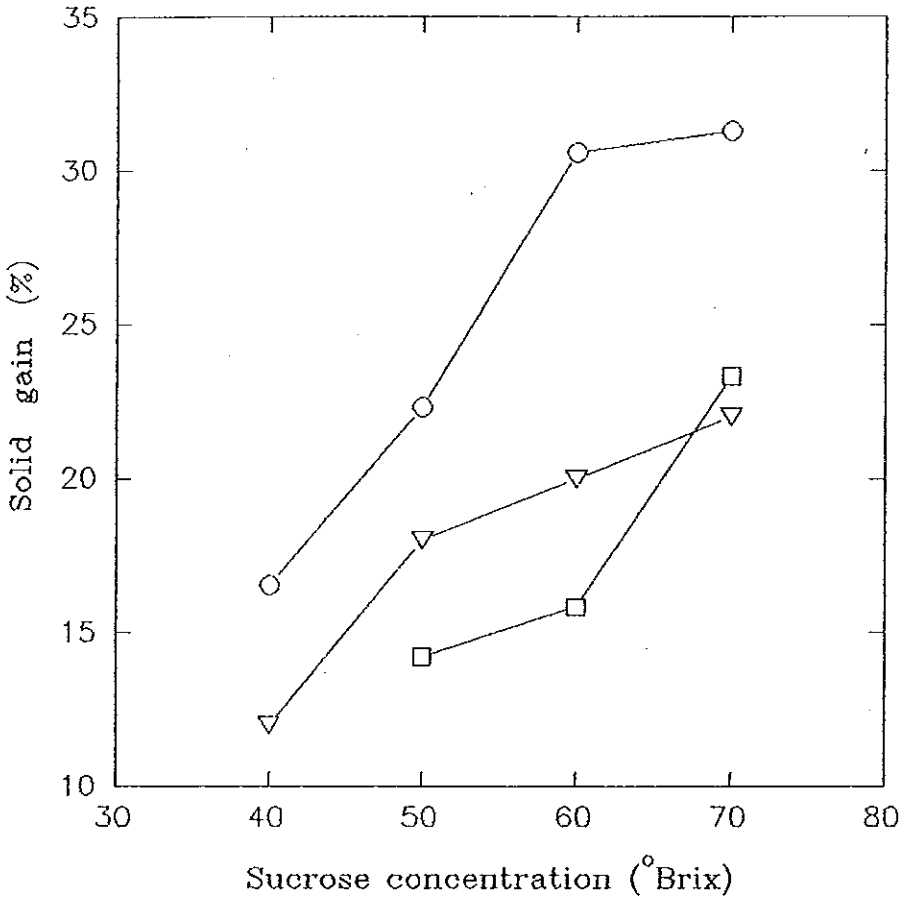
สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำ พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 40, 50 และ 60 องศาบริกซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำมีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันในทางสถิติ($P>0.05$) (ภาคผนวก ฉ)

อัตราการแพร่ของน้ำตาล พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อม น้ำตาลสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นสับปะรดมากขึ้น และเมื่อเพิ่มเวลาในการออสโมซิส น้ำตาลยังสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นสับปะรดได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน (รูปที่ 25) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อม เป็นการเพิ่มความความดันออสโมติก ทำให้แรงขับเคลื่อนมีมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการแพร่เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) และกรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) ดังแสดงในรูปที่ 26 พบว่าผลการทดลองนี้ให้ค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสูงกว่าคณะผู้ศึกษาทดลองทั้งสองที่ทุก ๆ ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมทั้งน้ำเชื่อมที่ไม่เติมและเติมสารเคมี ทั้งนี้อาจเนื่องจาก Rahman และ Lamb (1990) ใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสต่ำกว่า (20 °ซ) และไม่มีการกวน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าของการทดลองนี้ ส่วนการทดลองของ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) ซึ่งใช้อุณหภูมิเท่ากันกับการทดลองนี้ แต่ใช้เวลานานกว่า (8 ชั่วโมง) กลับมีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลต่ำกว่ามาก อาจเป็นเพราะว่าไม่มีการกวนและชิ้นสับปะรดอาจทับกันทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสารภายนอกมีมากซึ่งจะไปกีดขวางการแพร่ทำให้การแพร่ช้าลง

การแพร่ของน้ำตาลในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมและเติมสารเคมี มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 10) เมื่อนำการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลที่เวลาต่างๆกับความเข้มข้นน้ำเชื่อมมาวิเคราะห์การถดถอย โดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้น



รูปที่ 25 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรด ที่มีการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1



รูปที่ 26 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการเพิ่มชิ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส จากการทดลอง (O) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)

ตารางที่ 10 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมและเวลาในการออสโมซิสต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลของสับปะรดที่ทำการออสโมซิสโดยใช้อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)	การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล (ร้อยละ)		DIFF
		น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี	
40	1	11.23^{d1}	9.49^{e}	1.74^{ns}
	2	13.03^{c}	11.05^{d}	1.53^{ns}
	3	14.66^{b}	13.17^{c}	1.49^{ns}
	4	15.28^{b}	14.69^{b}	0.59^{ns}
	5	17.54^{a}	15.54^{a}	2.00^{ns}
50	1	12.96^{e}	13.98^{e}	-1.02^{ns}
	2	14.27^{d}	16.17^{d}	-1.90^{ns}
	3	15.48^{c}	17.64^{c}	-2.16^{ns}
	4	18.76^{b}	19.64^{b}	-0.88^{ns}
	5	21.44^{a}	23.21^{a}	-1.77^{ns}
60	1	17.73^{e}	16.53^{e}	1.20^{ns}
	2	19.52^{d}	19.67^{d}	-0.15^{ns}
	3	22.98^{c}	24.99^{c}	-2.01^{ns}
	4	26.98^{b}	24.99^{b}	-3.01^{ns}
	5	30.05^{a}	31.10^{a}	-1.05^{ns}
70	1	16.89^{e}	17.97^{e}	-1.13^{ns}
	2	24.07^{d}	21.45^{d}	2.62^{ns}
	3	27.35^{c}	25.57^{c}	1.83^{ns}
	4	28.29^{b}	28.45^{b}	-0.16^{ns}
	5	31.89^{a}	30.70^{a}	1.19^{ns}

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

[1] ค่าในสดมภ์เดียวกันของแต่ละอุณหภูมิที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)

กราฟในรูปที่ 25 สามารถแทนผลการทดลองได้ดีที่สุดด้วยสมการที่ (17) (Spiegel, 1968)

$$SG = (a\ t + e)\ (tanh\ (C_o/40 - d) + 1) + b\ t + c \quad (17)$$

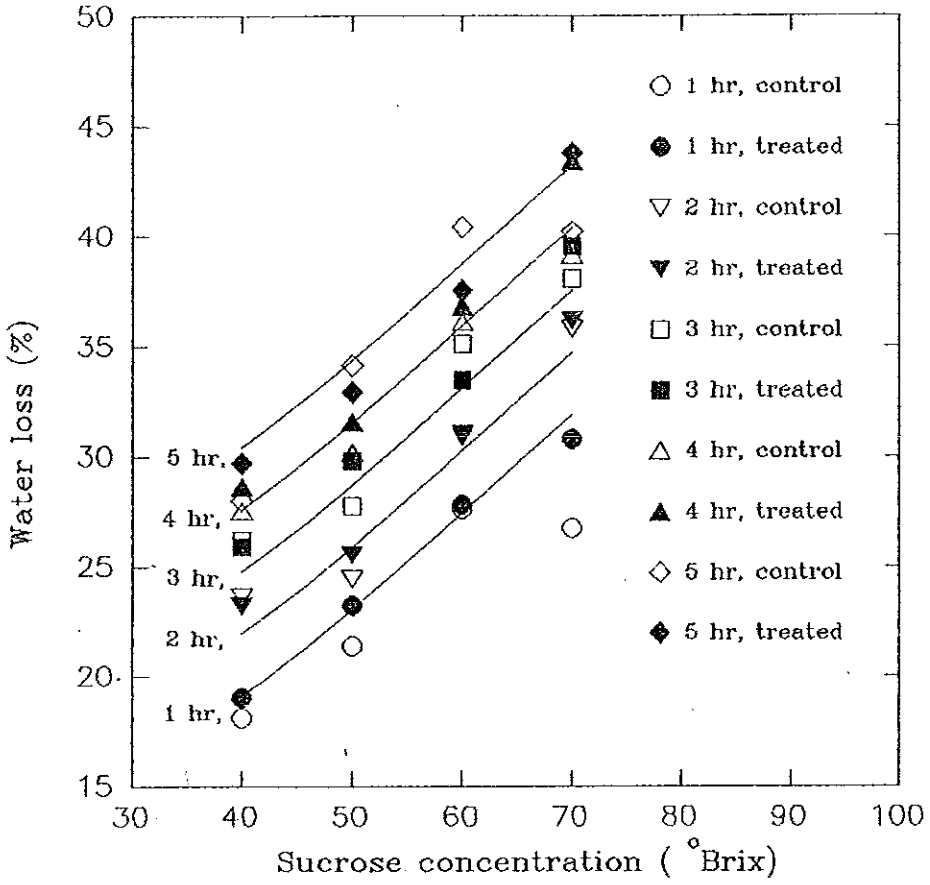
เมื่อ SG = ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)

C_o = ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม 40 °Brix < C_o < 70 °Brix

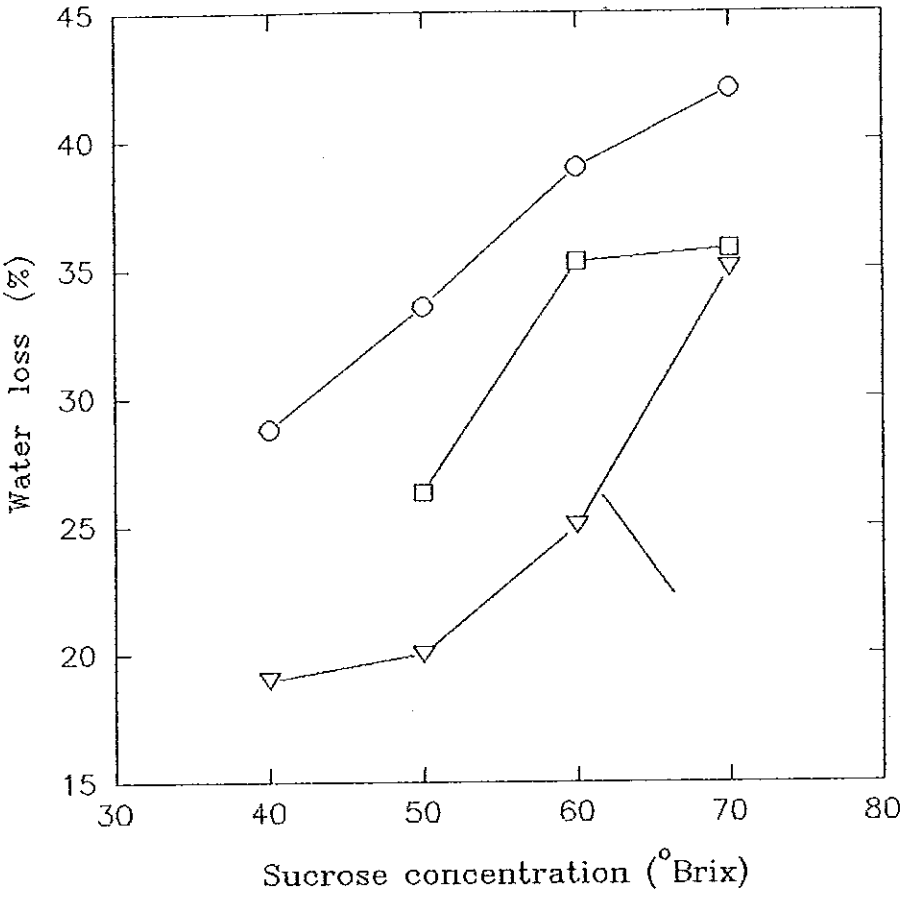
t = ระยะเวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)

a,b,c,d,e = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้ มีค่า 3.6840, -2.7300, -3.8160, 0.8476 และ 10.9400 ตามลำดับ สำหรับน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

อัตราการแพร่ของน้ำ ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรดดังแสดงในรูปที่ 27 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการออสโมซิสโดยการใช้น้ำเชื่อมที่ไม่เติมและเติมสารเคมี พบว่าการแพร่ออกของน้ำจากชิ้นสับปะรดผันแปรโดยตรงกับความเข้มข้นและเวลาในการออสโมซิส ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อม จะทำให้แรงขับเคลื่อนออสโมติกสูงขึ้น การแพร่ของน้ำจึงเกิดได้เร็วขึ้น ดังได้อธิบายไว้แล้วในเรื่องอัตราการแพร่ของน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) ดังแสดงในรูปที่ 28 พบว่าการสูญเสียน้ำในการทดลองนี้มีค่าสูงและเร็วกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าการกวนเพื่อไม่ให้ชิ้นสับปะรดทับกันนั้นมีผลอย่างมากต่ออัตราการแพร่ ไม่ว่าจะเป็นอัตราการแพร่ของน้ำหรือน้ำตาล นอกจากนี้เนื่องจากการทดลองของ Rahman และ Lamb ใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสต่ำ (20 °ซ) จึงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่และอัตราการแพร่ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 °ซ ส่วนการทดลองของ กรุณา วงศ์กระจ่าง ถึงแม้จะใช้เวลาในการออสโมซิสนานกว่า ที่ความเข้มข้นน้ำเชื่อมและอุณหภูมิในการออสโมซิสเท่ากัน แต่มี



รูปที่ 27 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1



รูปที่ 28 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส จากการทดลอง (O) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rahman และ Lamb (1990) (▽) และ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) (□)

การสูญเสียน้ำน้อยกว่า เพราะไม่มีการกวนน้ำเชื่อม ส่วนการเติมสารเคมีในน้ำเชื่อมมีผลต่อการสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรด ดังแสดงในตารางที่ 11 ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองทำให้ไม่เห็นความแตกต่างทางสถิติในบางกรณี แต่ก็เป็นข้อมูลส่วนน้อยเท่านั้น ข้อมูลส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่า การเติมโปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟตและกรดซิตริก ทำให้การสูญเสียน้ำจากชิ้นสับปะรดเกิดมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เมื่อนำการสูญเสียน้ำและความเข้มข้นของน้ำเชื่อมมาวิเคราะห์การถดถอยโดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 27 สามารถแทนข้อมูลได้ดีที่สุด ด้วยสมการที่ (18) (Spiegel, 1968)

$$WL = a\,(\tanh\,(Co/40-d) + 1) + b\,t + c \qquad (18)$$

เมื่อ WL = ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากชิ้นสับปะรด (ร้อยละ)

C_o = ความเข้มข้นน้ำเชื่อม $40\ ^\circ Brix < C_o < 70\ ^\circ Brix$

t = ระยะเวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)

a,b,c,d = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้จากสมการที่ (18) มีค่า 18.07, 2.831, 6.636 และ 1.505 ตามลำดับ สำหรับน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี

เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (t_p) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อม เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลในน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือมีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.2 ชั่วโมง และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) (รูปที่ 29(ก)) ส่วนเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อมจาก 40 เป็น 50, 60 และ 70 องศาบริกซ์ พบว่ามีค่าลดลงสำหรับน้ำเชื่อมทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเคมี คือ มีค่า 1.00, 0.85, 0.39 และ 0.16 ชั่วโมง ตามลำดับ (รูปที่ 29(ข)) ทั้งนี้เนื่องจากเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาส

ตารางที่ 11 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมและเวลาในการออสโมซิสต่อการสูญเสียน้ำของสับปะรดที่ทำการออสโมซิส โดยใช้อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

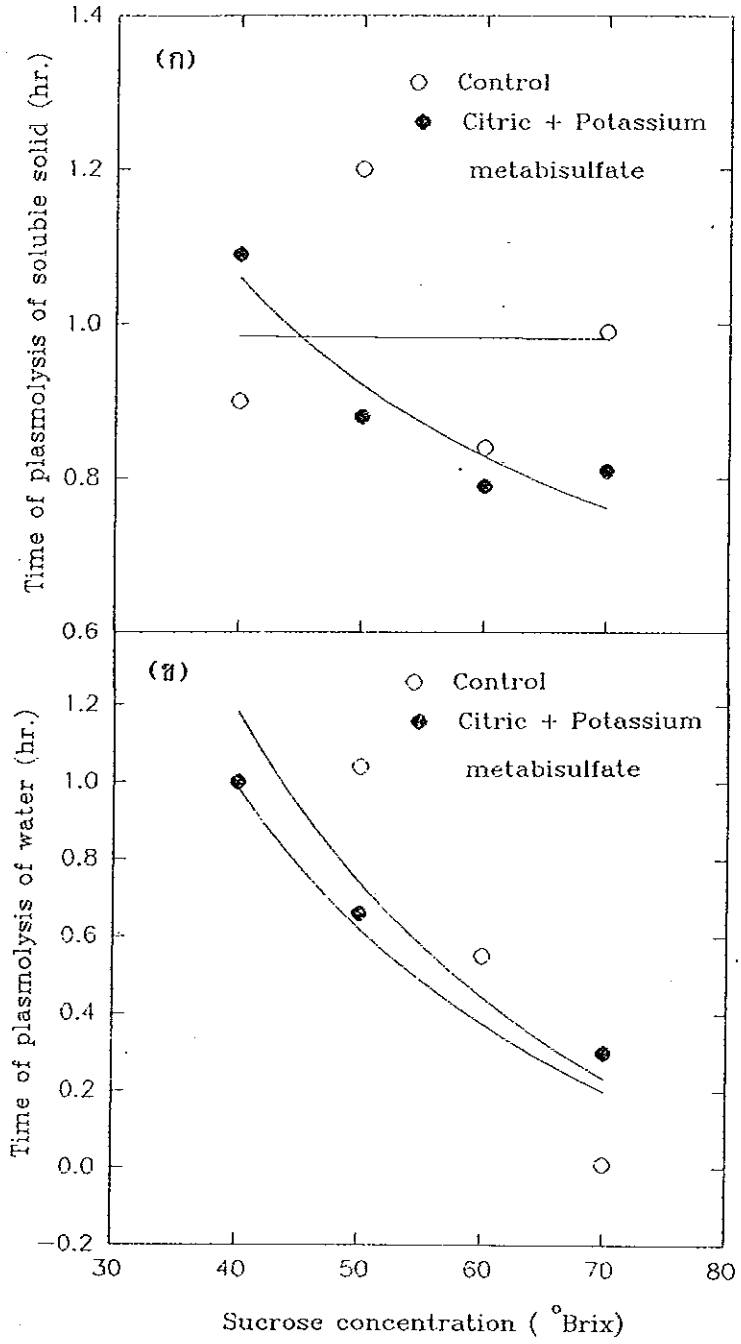
ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)	การสูญเสียน้ำของสับปะรด (ร้อยละ)		DIFF
		น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี	
40	1	18.12^{e1}	19.05^{e}	-0.93*
	2	23.64^{d}	23.21^{d}	0.43^{ns}
	3	26.19^{c}	25.90^{c}	0.29^{ns}
	4	27.53^{b}	28.64^{b}	-1.11**
	5	27.98^{a}	29.69^{a}	-1.58**
50	1	21.39^{e}	23.23^{e}	-1.84**
	2	24.43^{d}	25.53^{d}	-1.10**
	3	27.75^{c}	29.78^{c}	-2.30**
	4	30.16^{b}	31.56^{b}	-1.40**
	5	34.13^{a}	32.89^{a}	1.24**
60	1	27.59^{e}	27.79^{e}	-0.22^{ns}
	2	30.92^{d}	30.99^{d}	-0.07^{ns}
	3	35.11^{c}	33.44^{c}	1.67**
	4	36.10^{b}	36.79^{b}	-0.67**
	5	40.40^{a}	37.52^{a}	2.88**
70	1	26.72^{e}	30.78^{d}	-3.88**
	2	35.77^{d}	36.17^{c}	-0.40^{ns}
	3	38.07^{c}	39.52^{b}	-1.50**
	4	39.14^{b}	43.37^{a}	-4.23**
	5	40.19^{a}	43.78^{a}	-3.50**

* มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

1 ค่าในสดมภ์เดียวกันของแต่ละอุณหภูมิที่มีอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)



รูปที่ 29 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อ tp ของน้ำตาล (ก) และ tp ของน้ำ (ข) ในสับปะรดที่มีการออสโมซิส ที่อุณหภูมิ 50 °ซ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

มอลิซิสของน้ำตาลไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเชื่อม และการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมไม่ได้ทำให้เซลล์ของสับปะรดแตก แต่อาจทำให้เนื้อเยื่อของเซลล์ยอมให้สารต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำ สามารถซึมผ่านได้มากขึ้น ส่วนน้ำตาลเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำ การซึมผ่านของน้ำตาลเข้าสู่เซลล์จึงยากกว่าการซึมผ่านของน้ำออกจากเซลล์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมมีผลทำให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัย สำคัญ ($P>0.05$) การไม่เติมและเติมสารเคมีในน้ำเชื่อมไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$)

เมื่อนำเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาล และของน้ำกับความเข้มข้นน้ำเชื่อมที่ใช้ในการออสโมซิสมาวิเคราะห์การถดถอย โดยฟิตเข้ากับสมการหลายรูปแบบ พบว่าเส้นกราฟในรูปที่ 29(ก) และ 29(ข) สามารถแทนข้อมูลได้ดีที่สุด ด้วยสมการที่ (19) (Spiegel, 1968)

$$t_p = a/C_o + b \qquad (19)$$

เมื่อ t_p = เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส (ชั่วโมง)

C_o = ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม $40\ ^\circ Brix < C_o < 70\ ^\circ Brix$

a,b = พารามิเตอร์ที่ฟิตได้จากสมการที่ (19) สำหรับ t_p ของน้ำตาลในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมีมีค่า 0.31, 0.98 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีมีค่า 27.84, 0.36 ตามลำดับ และสำหรับ t_p ของน้ำ ในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมีมีค่า 88.77, -1.04 ตามลำดับ ในน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีมีค่า 73.58, -0.85 ตามลำดับ

การยอมรับทางประสาทสัมผัส ผลการศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 50 °ซ ในน้ำเชื่อมเข้มข้น 2 ระดับ คือ 60 และ 70 องศาบริกซ์เป็นเวลา 3, 5, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง แล้วนำมาอบแห้งโดยใช้ลมร้อน 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เก็บรักษาในกล่องพลาสติกปิดฝาสนิท 1 วัน ที่อุณหภูมิ 4 °ซ ทำการประเมินคุณภาพด้าน สี ความหวาน ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 12 ดังนี้

สี พบว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลาที่ต่างกัน ได้คะแนนการยอมรับด้านสีแตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) โดยสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง มีสีเหลืองในช่วง 5Y 8/8 - 5Y 8/10 ได้รับคะแนนการยอมรับสูงสุดในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลางและสูงกว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสที่เวลาอื่น ทั้งนี้เนื่องจากสังเกตพบว่าสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีสีเหลืองซีด (5Y 8/6) ส่วนการใช้เวลาในการออสโมซิส 8 และ 9 ชั่วโมง สับปะรดมีสีเหลืองเข้มมากเกินไป (5Y 8/12) จึงทำให้คะแนนการยอมรับลดลง

ความหวาน พบว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ ได้รับคะแนนการยอมรับด้านความหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ระยะเวลาในการออสโมซิสมีผลทำให้คะแนนการยอมรับแตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) โดยสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง ได้รับคะแนนการยอมรับสูงสุดในระดับชอบเล็กน้อย ส่วนสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีความหวานน้อยเกินไป และสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 8 และ 9 ชั่วโมงมีความหวานมากเกินไปจึงทำให้คะแนนการยอมรับลดลง

ลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อม 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 3, 5, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง ได้รับคะแนนการยอมรับ

ตารางที่ 12 คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสโดยใช้ความเข้มข้นน้ำเชื่อมและเวลาในการออสโมซิสที่แตกต่างกัน

สภาวะการทดลอง		คะแนนการยอมรับเฉลี่ย			
ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	เวลาในการออสโมซิส (ชั่วโมง)	สี	ความหวาน	เนื้อสัมผัส	การยอมรับรวม
60	3	5.37^{b*}	5.50^{b}	5.83^{a}	5.27^{b}
	5	6.30^{a}	6.43^{a}	6.33^{a}	6.43^{a}
	7	6.63^{a}	6.47^{a}	6.43^{a}	6.40^{a}
	8	5.90^{ab}	5.87^{ab}	5.70^{a}	5.83^{ab}
	9	5.97^{ab}	6.20^{ab}	6.30^{a}	6.40^{a}
70	3	6.47^{ab}	5.83^{ab}	5.47^{a}	5.87^{c}
	5	7.07^{a}	6.57^{a}	6.03^{a}	6.77^{a}
	7	6.73^{a}	6.43^{a}	6.03^{a}	6.53^{ab}
	8	6.50^{ab}	6.07^{ab}	5.80^{a}	6.40^{abc}
	9	5.93^{b}	5.60^{b}	5.80^{a}	5.97^{bc}

* ค่าในสดมภ์เดียวกันของแต่ละความเข้มข้นน้ำเชื่อมที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

(คะแนนสูงสุดคือ 9 = ชอบมากที่สุด,..., คะแนนต่ำสุดคือ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด)

ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยได้รับคะแนนการยอมรับในระดับชอบเล็กน้อย

การยอมรับรวม พบว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ ได้รับคะแนนด้านการยอมรับรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ระยะเวลาในการออสโมซิสมีผลทำให้คะแนนการยอมรับด้านการยอมรับรวมแตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) โดยสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง และ 70 องศาบริกซ์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้คะแนนการยอมรับด้านการยอมรับรวมสูงสุดในระดับชอบเล็กน้อย

จากผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้ง โดยใช้คุณภาพด้าน สี ความหวานและการยอมรับรวมซึ่งมีคะแนนการยอมรับที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา พบว่าสับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อม 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง ได้รับคะแนนการยอมรับสูงสุด และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายค่าแรงงาน พลังงาน และการประหยัดเวลา จึงสรุปว่าสมควรเลือกใช้สับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

1.4 ขนาดและรูปร่างของสับปะรด

จากการทดลองใช้ขนาดและรูปร่างของสับปะรด 2 ลักษณะคือรูปร่างเป็นแว่นขนาดหนา 1.2 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ซม. และรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดหนา 1.5 ซม. กว้าง 1.5 ซม. และยาว 1.5 ซม. ทำการออสโมซิสในน้ำเชื่อมที่เติมสารเคมีเช่นเดียวกับข้อ 1.2 และน้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี นำผลการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.2 มาหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรด การสูญเสียน้ำจากชิ้นสับปะรด และเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส ได้ผลดังนี้คือ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลในสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่นมีค่ามากกว่าสับปะรดรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (ตารางที่ 13) ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะโครงสร้างและการตัดชิ้นสับปะรดแตกต่างกัน โดยทั่วไปท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหารของผลสับปะรดอยู่ในแนวราบแผ่ออกจากแกนกลาง ส่วนน้ำตาลในชิ้นสับปะรดนั้นส่วนใหญ่จะไม่ได้อยู่ในท่อลำเลียงแต่จะอยู่ในเซลล์ การตัดสับปะรดในลักษณะเป็นแว่นทำให้พื้นที่หน้าตัดด้านแนวราบซึ่งเป็นทิศทางหลักในการแพร่ของน้ำตาลมีค่ามาก จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่ปรากฏมีค่าสูงกว่าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งมีสัดส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดแนวราบเท่ากับพื้นที่หน้าตัดแนวขวาง

ตารางที่ 13 ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำในกระบวนการออสโมซิส

ขนาดและรูปร่างของสับปะรด	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล 10^{10} (เมตร^2/วินาที)		สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ 10^{10} (เมตร^2/วินาที)	
	น้ำเชื่อมไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมเติมสารเคมี	น้ำเชื่อมไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมเติมสารเคมี
สี่เหลี่ยมลูกบาศก์	9.49*	7.25	12.70	12.73
แว่น	14.31	15.14	5.64	4.35

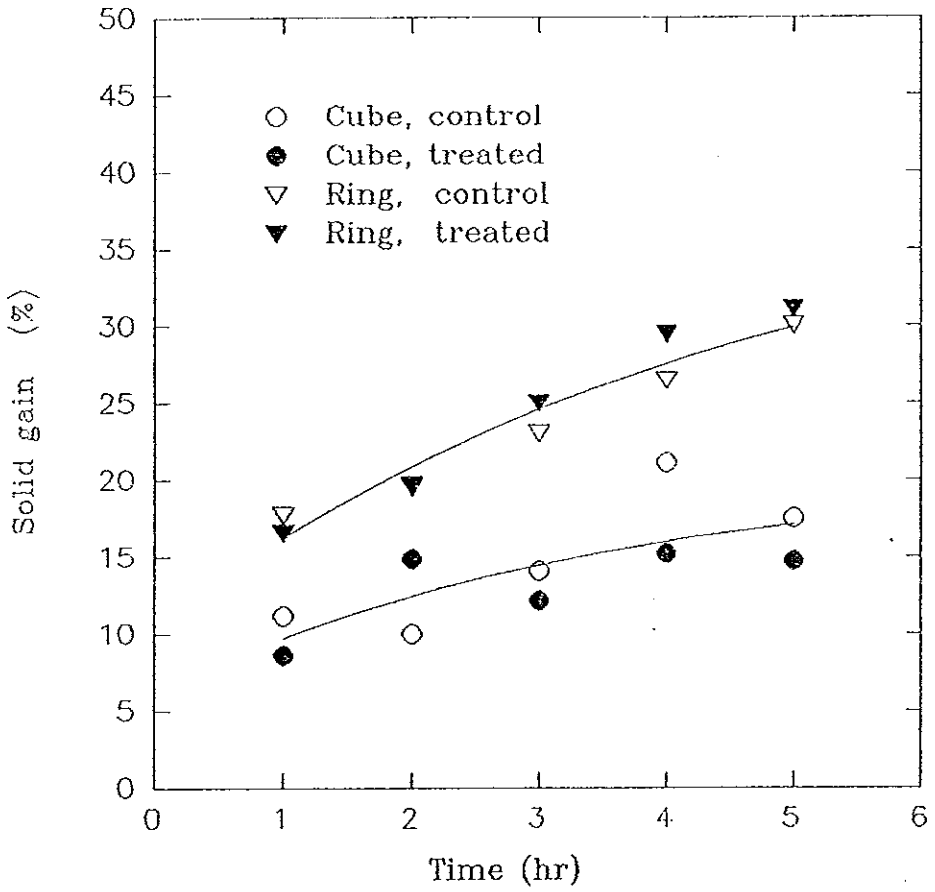
* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีค่ามากกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น (ตารางที่ 13) ซึ่งตรงข้ามกับการแพร่ของน้ำตาล ทั้งนี้อาจเนื่องจากเหตุผลทำนองเดียวกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล เพียงแต่ในทางกลับกันกับการแพร่ของน้ำตาล ทิศทางหลักของการแพร่ของน้ำน่าจะเป็นทิศทางที่ขนานไปกับท่อลำเลียง ซึ่งก็คือพื้นที่หน้าตัดแนวขวางนั่นเอง นอกจากนี้สับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น (ภาคผนวก ง) จึงเป็นผลให้น้ำแพร่ออกจากชิ้นสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เร็วกว่ารูปร่างเป็นแว่น (อ่อนรวี รัตนาพันธุ์, 2533)

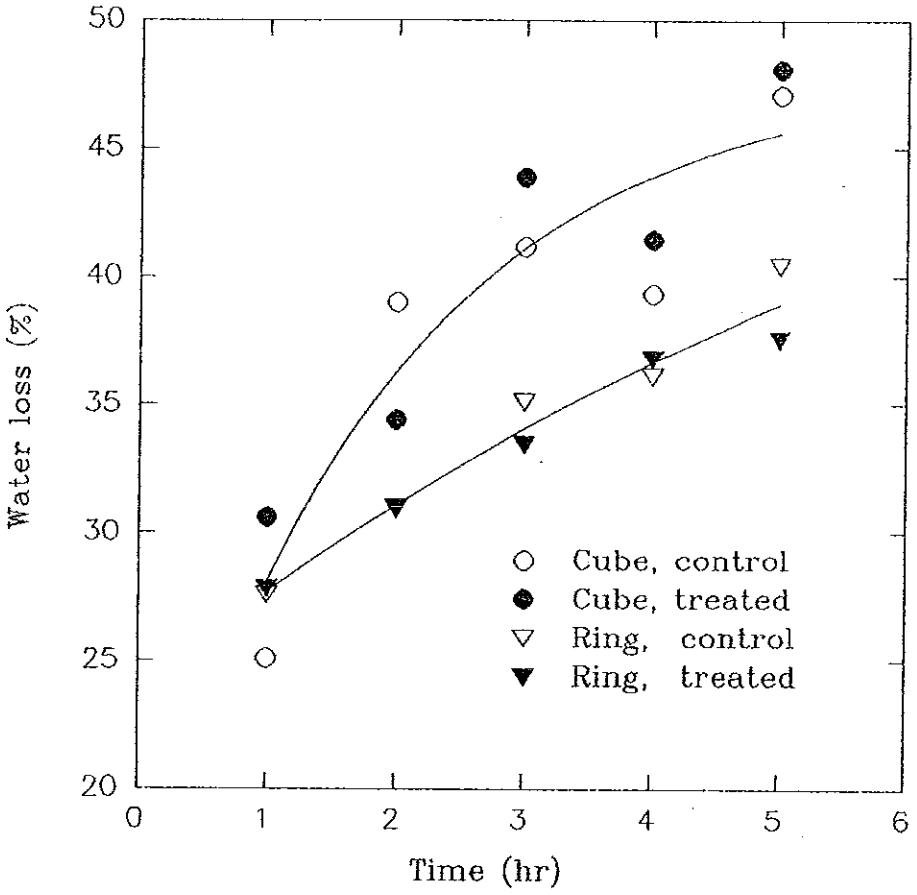
การเพิ่มขึ้นของน้ำตาล พบว่าสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่นมีการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลสูงกว่าสับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (รูปที่ 30) ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลของสับปะรดรูปร่างเป็นแว่นมีค่ามากกว่ารูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งให้ผลการทดลองแตกต่างกับผลการทดลองของ Ravindran (1989) ที่พบว่าขนาดและรูปร่างของสับปะรดไม่มีผลต่อการแพร่ของน้ำและน้ำตาล การแพร่ของน้ำตาลในน้ำเชื่อมที่ไม่เติมและที่เติมสารเคมีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$)

การสูญเสียน้ำ พบว่าการสูญเสียของน้ำในสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีค่ามากกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น (รูปที่ 31) ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในเรื่องสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ การสูญเสียน้ำของชิ้นสับปะรดเมื่อออสโมซิสโดยใช้น้ำเชื่อมที่ไม่เติมและที่เติมสารเคมีไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$)

เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส พบว่าสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำมากกว่าสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่น (ตารางที่ 14) ทั้ง ๆ ที่สับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่าที่มีรูปร่างเป็นแว่น แต่สับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีความหนามาก



รูปที่ 30 ผลของรูปร่างต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1



รูปที่ 31 ผลของรูปร่างต่อการสูญเสียน้ำในสับปะรดที่มีการออสโมซิส โดยใช้น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

กว่า จึงทำให้การแพร่เกิดได้ช้ากว่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและการเพิ่มของน้ำตาลต่ำกว่าสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่น และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและการสูญเสียน้ำสูงกว่าสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่น และข้อดีของสับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ คือทำให้ปริมาณน้ำในชิ้นสับปะรดลดลงมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่หวานมากเกินไป อย่างไรก็ตามผู้บริโภคส่วนใหญ่นิยมบริโภคผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแว่น เพราะมีความคุ้นเคยกับรูปร่างดังกล่าว

ตารางที่ 14 ผลของขนาดและรูปร่างของสับปะรดต่อเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำในกระบวนการออสโมซิส

ขนาดและรูปร่างของสับปะรด	เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาล (ชั่วโมง)		เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำ (ชั่วโมง)	
	น้ำเชื่อมไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมเติมสารเคมี	น้ำเชื่อมไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมเติมสารเคมี
สี่เหลี่ยมลูกบาศก์	1.34*	1.09	1.05	1.16
แว่น	0.37	0.59	0.94	0.70

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

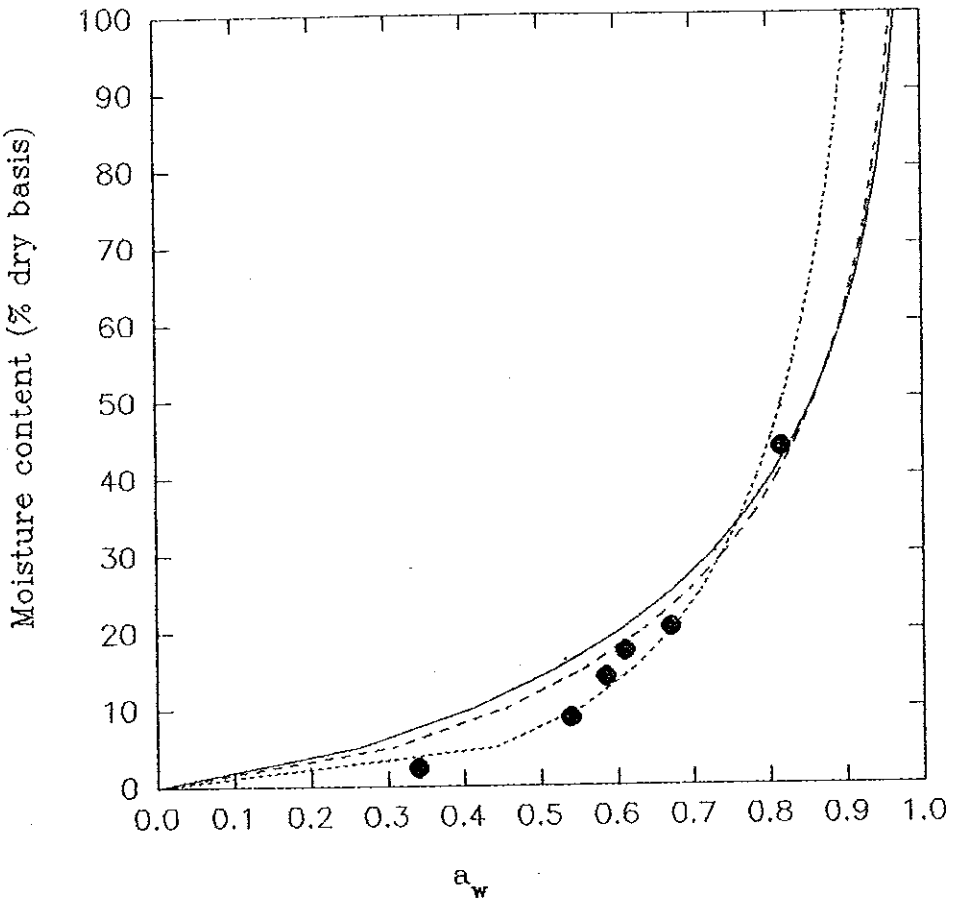
ตอนที่ 2 การอบแห้ง

สับปะรดแว่นที่นำมาอบแห้งได้ผ่านการออสโมซิสภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในตอนที่ 1 คือ น้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 ที่อุณหภูมิ 50 °ซ และใช้เวลาในการออสโมซิส 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำมาอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง เพื่อศึกษาซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรด อัตราการอบแห้ง และการยอมรับทางประสาทสัมผัส ได้ผลดังนี้คือ

2.1 ซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรด ซอร์พชันไอโซเทอมหมายถึง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอคติวิตีกับปริมาณความชื้นในอาหารที่อุณหภูมิคงที่ (Labuza, 1970) ซอร์พชันไอโซเทอมของอาหารสามารถหาได้โดยการนำอาหารที่ทราบปริมาณความชื้นแล้วปล่อยให้เกิดภาวะสมดุลในภาชนะที่ปิดสนิท เมื่อทราบความชื้นสัมพัทธ์สมดุลก็สามารถหาค่าวอเตอร์แอคติวิตีได้ดังสมการ

$$\text{วอเตอร์แอคติวิตี } (a_w) = \frac{\text{ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ร้อยละ)}}{100}$$

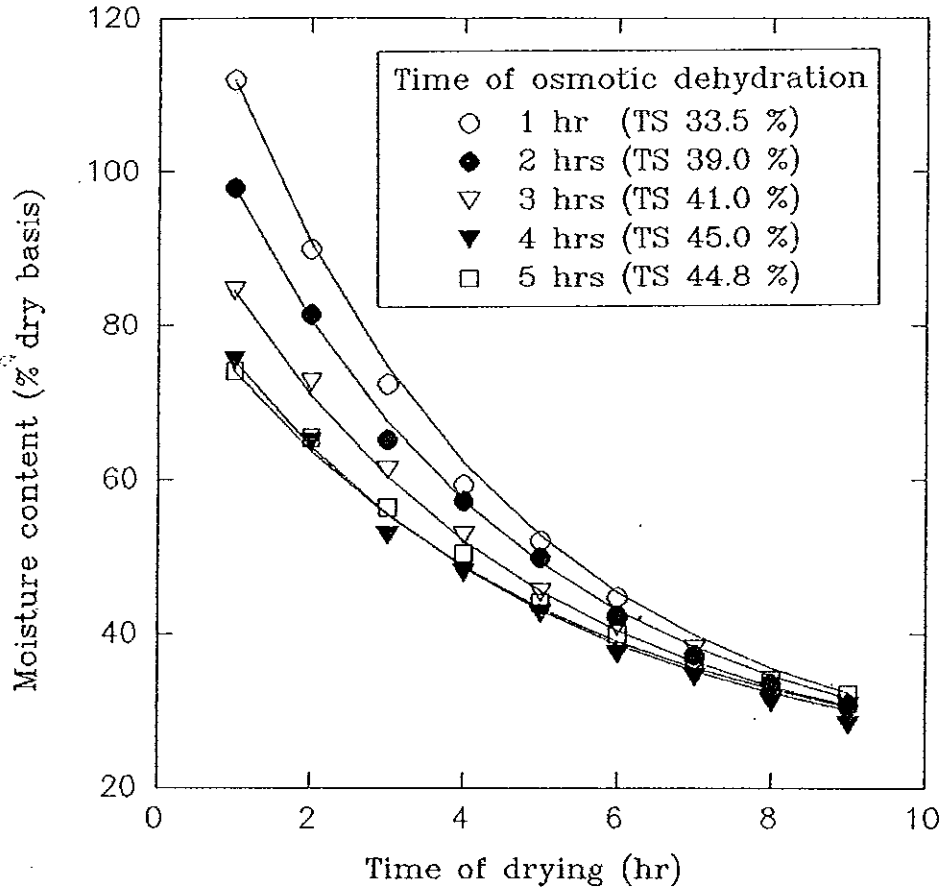
ซอร์พชันไอโซเทอมมีประโยชน์ในการหาระดับความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยการเลือกความชื้นที่ให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตีในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้อยที่สุด นอกจากนั้นซอร์พชันไอโซเทอมที่อุณหภูมิสูง (50 - 70 °ซ) ยังมีประโยชน์ในการคำนวณในกระบวนการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการหาซอร์พชันไอโซเทอมครั้งนี้ใช้อุณหภูมิ 30 °ซ ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวนกระบวนการอบแห้งโดยตรง วัตถุประสงค์หลักของการหาซอร์พชันไอโซเทอมครั้งนี้จึงเพื่อนำไปใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เท่านั้น รูปที่ 32 แสดงผลของซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรดอบแห้งจากการทดลองที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °ซ เปรียบเทียบกับซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรดอบแห้ง จากการทดลองของ Wolf และคณะ (1973) ที่อุณหภูมิ 25 และ 45 °ซ พบว่า



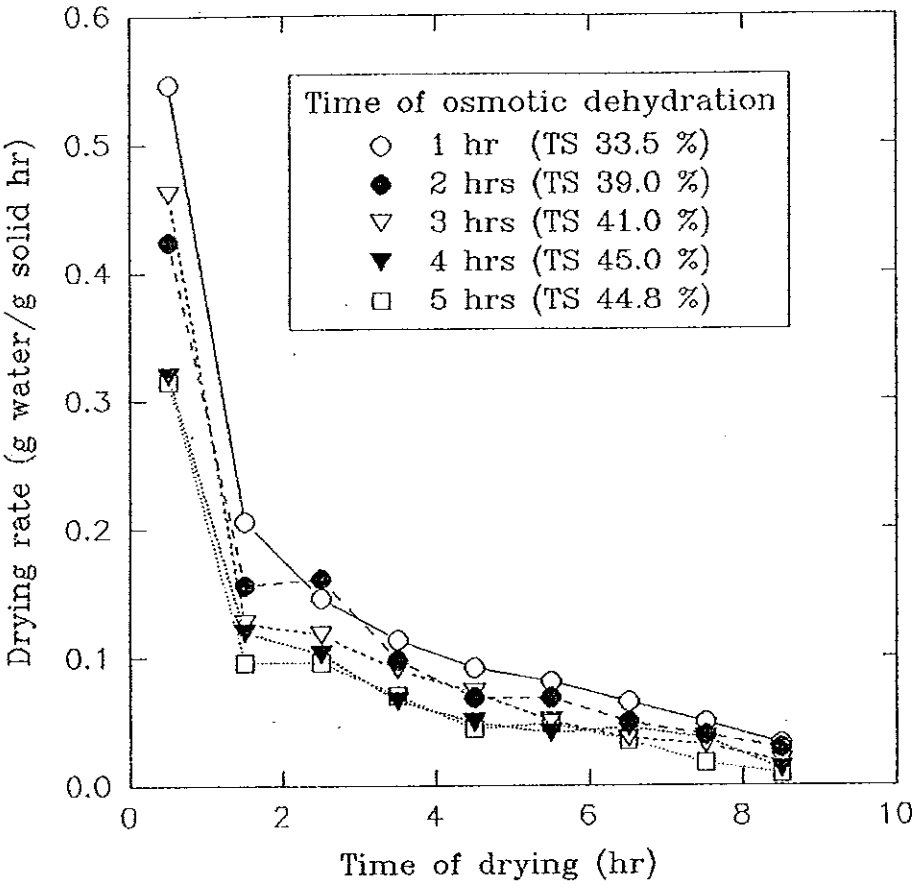
รูปที่ 32 ซอร์พชันไอโซเทอมของสับปะรดอบแห้งด้วยวิธีออสโมติกจากการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °ซ (------) เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Wolf และคณะ (1973) ที่อุณหภูมิ 25 °ซ (——) และ 45 °ซ (– – –)

เส้นกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกัน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการทดลองมีค่าความชื้นร้อยละ 22.07 ซึ่งในเส้นโค้งไอโซเทอมแสดงค่าวอเตอร์แอคติวิตี 0.69 ค่าวอเตอร์แอคติวิตีในช่วงนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของ Labuza (1970) ที่ได้แสดงว่าอาหารที่มีความชื้นปานกลาง มีค่าวอเตอร์แอคติวิตีในช่วง 0.2-0.5 เป็นค่าที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ เพราะว่าวอเตอร์แอคติวิตีในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์จะเสื่อมเสียจากการเจริญของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีน้อยมาก ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าวอเตอร์แอคติวิตีสูงกว่า 0.5 อาจเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เกิดจากเอนไซม์และไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ แต่ในการทดลองนี้ได้ป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ โดยใช้สารเคมีโปตัสเซียมเมตาไบซัลเฟต ถ้าพิจารณาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของอาหารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้วจะเห็นว่าค่าวอเตอร์แอคติวิตีที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สุดท้ายควรมีค่าประมาณ 0.6 (ความชื้นร้อยละ 15) ซึ่งสอดคล้องกับ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535)

2.2 อัตราการอบแห้ง จากการศึกษาผลการอบแห้งสับปะรดแว่นที่ผ่านการออสโมซิสที่อุณหภูมิ 50 °ซ ในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 ใช้ระยะเวลา 5 ชั่วโมง อบแห้งโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 33 โดยพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปก่อนสิ้นสุดการอบแห้งความชื้นของชิ้นสับปะรดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนรูปที่ 34 แสดงผลของเวลาในการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้ง พบว่าในระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง อัตราการอบแห้งมีค่าสูงสุด และจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลาชั่วโมงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ เมื่อสังเกตจากเส้นโค้งอัตราการทำแห้ง พบว่าไม่มีระยะการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งคงที่ แสดงว่าความชื้นเริ่มต้นของชิ้นสับปะรดหลังออสโมซิสต่ำกว่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) คือ ความชื้นที่การอบแห้งเริ่มเปลี่ยนจากการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งคงที่ไปเป็นที่ระยะการอบแห้งลดลง (falling rate period)) และอยู่ในระยะนี้ไปจนสิ้นสุดการอบแห้ง



รูปที่ 33 ผลของเวลาในการอบแห้งต่อความชื้นของสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิส เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง



รูปที่ 34 ผลของเวลาในการอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งของสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิส เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

อาศัยทฤษฎีการอบแห้ง ซึ่งมีสมการการอบแห้งดังนี้ (Singh and Heldman, 1984)

$$t - t_c = A \ln [(M_o - M_e)/(M_t - M_e)] \qquad (20)$$

โดยที่ t = เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

t_c = เวลาวิกฤต ในกรณีนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตสมการ (20)

M_t = ความชื้นที่เวลาใดๆ (dry basis) (ร้อยละ)

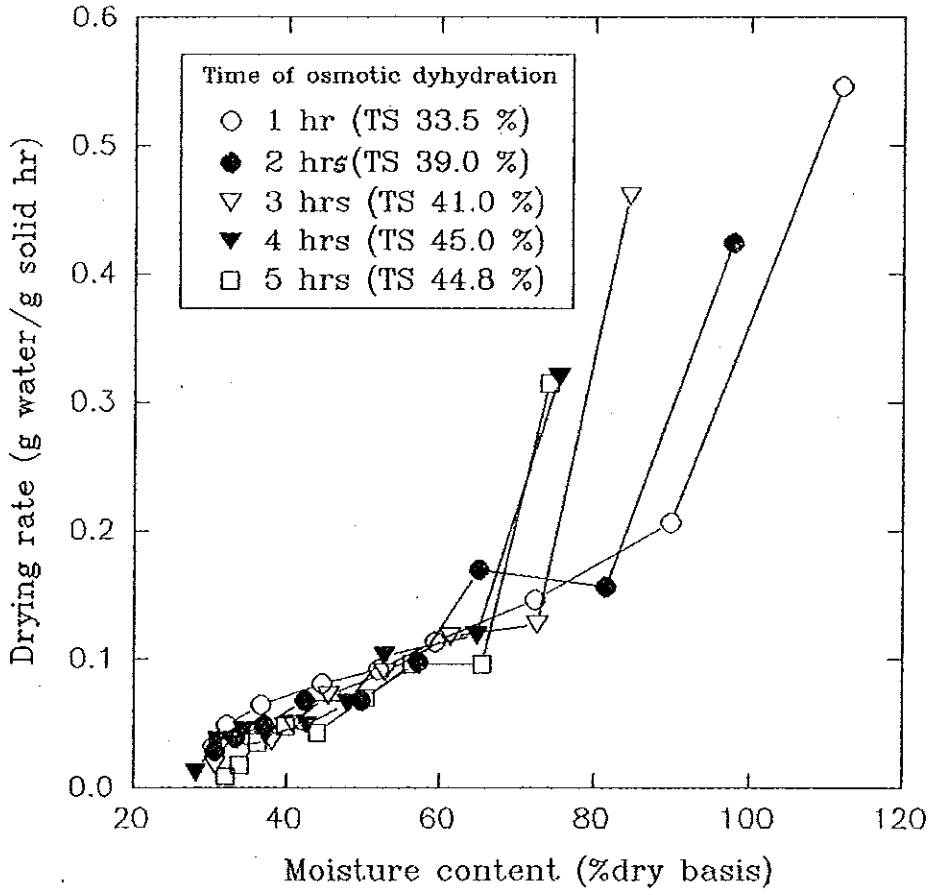
M_o = ความชื้นเริ่มต้นของชิ้นสับปะรด (ร้อยละ)

M_e = ความชื้นที่สภาวะสมดุล (ร้อยละ)

A = พารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตสมการ (20)

เมื่อนำค่าความชื้นและเวลาที่ได้ทั้งหมดมาฟิตเข้ากับสมการ (20) โดยใช้การวิเคราะห์แบบการถดถอยที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear regression) พบว่าได้ค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ t_c = 1 ชั่วโมง, M_e ร้อยละ 21.6 (น้ำหนักแห้ง) และ A ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการออสโมซิส (TL) มีค่า = 0.196 TL + 3.555

สิ่งที่น่าสังเกตประการหนึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 35 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับอัตราการทำแห้งจะเห็นได้ว่า อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นโดยประมาณเมื่อความชื้นสูงขึ้น สาเหตุที่เส้นโค้งทุกเส้นโค้งขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความชื้นใกล้ความชื้นเริ่มต้น (ความชื้นสูงสุดของแต่ละเส้น) นั้นเกิดจากผลของการกระจายความชื้นเริ่มต้นในชิ้นสับปะรดก่อนการอบแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีการแพร่ว่า เมื่อเริ่มการอบแห้งความชื้นมีการกระจายในชิ้นสับปะรดอย่างสม่ำเสมอ ความแตกต่างระหว่างความดันไอของน้ำที่ผิวสับปะรดกับความดันไอของน้ำในบรรยากาศมีค่าสูงสุด ทำให้มีแรงขับเคลื่อนในการแพร่สูงสุด แต่เมื่อเวลาผ่านไปการกระจายของความเข้มข้นของน้ำในชิ้นสับปะรดเข้าสู่ลักษณะพาราโบลิก การแพร่จะเข้าสู่สภาวะที่เรียกว่า



รูปที่ 35 ผลของความชื้นในชิ้นสับปะรดต่ออัตราการทำแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 65 °ซ เป็นเวลา 9 ชั่วโมง

"Pseudo steady state" ซึ่งในที่นี้ก็คือระยะที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นมีลักษณะเชิงเส้น

2.3 การยอมรับทางประสาทสัมผัส ทำการทดลองโดยนำสับปะรดที่ผ่านการออสโมซิสและอบแห้งแล้วมาเก็บรักษาในกล่องพลาสติกที่ปิดฝาสนิทเป็นเวลา 1 วันที่อุณหภูมิ 4 °ซ ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายในตลาดหาดใหญ่ โดยใช้ผู้ทดสอบชิม 10 คน ทำการประเมินคุณภาพด้าน สี ความหวาน ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 15 ดังนี้

สี สับปะรดอบแห้งจากการทดลองและสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่ ได้รับคะแนนด้านสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยสับปะรดจากการทดลองได้รับคะแนนการยอมรับในระดับชอบปานกลางและสูงกว่าผลิตภัณฑ์จากตลาดหาดใหญ่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าผลิตภัณฑ์จากตลาดหาดใหญ่มีค่าความเข้มของสีที่ต่ำกว่า (ตารางที่ 16)

ความหวาน สับปะรดอบแห้งจากการทดลองและสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่ได้รับคะแนนการยอมรับด้านความหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยได้รับคะแนนระดับชอบเล็กน้อย

ลักษณะเนื้อสัมผัส สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง ได้รับคะแนนการยอมรับด้านลักษณะเนื้อสัมผัสในระดับชอบเล็กน้อยและสูงกว่าคะแนนการยอมรับของสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

การยอมรับรวม สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง ได้รับคะแนนการยอมรับรวมในระดับชอบปานกลางและสูงกว่าสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลองได้รับคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส สูงกว่าผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

ตารางที่ 15 คะแนนการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดอบแห้งด้วยวิธีออสโมติก จากการทดลองและสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

ชนิดของสับปะรดอบแห้ง	คะแนนการยอมรับเฉลี่ย			
	สี	ความหวาน	เนื้อสัมผัส	การยอมรับรวม
สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง	7.50[a*]	6.90[a]	6.70[a]	7.20[a]
สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่	4.70[b]	5.60[a]	5.00[b]	5.30[b]

* ค่าในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

(คะแนนสูงสุดคือ 9 = ชอบมากที่สุด,...., คะแนนต่ำสุดคือ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด)

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดสดและผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้ง

โครงสร้างผนังเซลล์ของผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสุก ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการออสโมซิส ผลไม้สุกสามารถผ่านกระบวนการออสโมซิสได้เร็วกว่าผลไม้ดิบ แต่ถ้าสุกเกินไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่น่ารับประทาน สับปะรดที่ใช้ในการทดลองนี้คัดเลือกโดยการสังเกตสีของเปลือก เพื่อเป็นเครื่องบ่งชี้ความอ่อน-แก่ของสับปะรด ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพบางประการของสับปะรดดังแสดงในตารางที่ 16 คือสับปะรดสดพันธุ์ปัตตาเวียที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 15 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 12 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 4.24 ปริมาณ

ตารางที่ 16 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดสด ผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง และสับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

องค์ประกอบ	สับปะรดสด	สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง	สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (ร้อยละ)	15±1.50	76.95±1.62	86.63±0.50
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	12±0.20	32.63±0.18	44.39±0.95
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)	4.24±0.01	14.84±0.35	15.37±0.28
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	83.37±1.70	22.07±0.55	12.05±0.40
ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (ร้อยละ)	0.63±0.01	0.71±0.01	0.17±0.02
ความเป็นกรด-ด่าง	4.0	4.0	4.0
วอเตอร์แอคติวิตี	0.98±0.01	0.82±0.02	0.65±0.02
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	1.03±0.01	1.23±0.01	1.83±0.01
สี	5Y 8/6	5Y 8/10	5Y 8/6

ความชื้นร้อยละ 83.37 ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริกร้อยละ 0.63 (น้ำหนักแห้ง) ความเป็นกรด-ด่าง 4.00 และวอเตอร์แอคติวิตี 0.98 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคือ สับปะรดสดมีปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก ร้อยละ 83.90 14.80 และ 0.37 (น้ำหนักเปียก) ตามลำดับ ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพของสับปะรดจากการทดลอง มีความหนาแน่น 1.03 กรัมต่อลบ.ซม. และ ค่าสี 5Y 8/6

เมื่อนำสับปะรดสดที่มีรูปร่างเป็นแว่นมาผ่านกระบวนการออสโมซิสและอบแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่เลือกได้ในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ให้ผลองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ดังนี้ คือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 76.95 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 32.63 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 14.84 ปริมาณความชื้นร้อยละ 22.07 ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริกร้อยละ 0.71 (น้ำหนักแห้ง) ความเป็นกรด-ด่าง 4.0 วอเตอร์แอคติวิตี 0.82 ความหนาแน่น 1.23 กรัมต่อลบ.ซม. และ ค่าสี 5Y8/10 เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองของ กรุณา วงศ์กระจ่าง (2535) พบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าทั้งนี้เนื่องจากการทดลองของ กรุณา วงศ์กระจ่าง ใช้สภาวะในการออสโมซิสที่อุณหภูมิและความเข้มข้นน้ำเชื่อมสูงกว่า (อุณหภูมิ 70 ซ และ ความเข้มข้นน้ำเชื่อม 65 องศาบริกซ์) และทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่ารวมทั้งใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า (อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 14.42) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์จึงมีค่าสูง (ร้อยละ 69.72)

สับปะรดสดเมื่อนำมาผ่านกระบวนการออสโมซิสและการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงคือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณกรดในรูปกรดซิตริกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสและการอบแห้ง รวมทั้งกรดซิตริกที่เติมลงไปในน้ำเชื่อมทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์ของน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งด้วยวิธีออสโมติกมีค่าความเข้มของสี (chroma) สูงขึ้น (จาก 5Y 8/6

เป็น 5Y 8/10) ส่วนปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเสื่อมเสียของอาหาร การทำนายการเปลี่ยนแปลงความคงตัวของอาหาร การเก็บรักษา และการเลือกใช้ภาชนะบรรจุมีค่าลดลง จากการทดลองผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณความชื้นร้อยละ 22.07 ซึ่งความชื้นยังสูงกว่าอาหารแห้งทั่วไป (มีความชื้นร้อยละ 15) ดังนั้นในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จึงควรเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และควรเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 4 °ซ) อย่างไรก็ตามอาจลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ลงให้เหลือร้อยละ 15 เพื่อให้อายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น

บทสรุป

การศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของสับปะรดแห้งด้วยวิธีออสโมติก 4 ปัจจัย ที่มีผลโดยตรงต่อกระบวนการออสโมซิส ซึ่งได้แก่ การกวน อุณหภูมิ ความเข้มข้นน้ำเชื่อม ขนาดและรูปร่างของสับปะรด นำมาอบแห้งเพื่อศึกษาซอร์ฟชันไอโซเทอมของสับปะรด อัตราการอบแห้ง การยอมรับทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้ง สามารถสรุปได้ดังนี้

การกวน การกวนที่อุณหภูมิ 50 °ซ ไม่ได้เพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล ถ้าชิ้นสับปะรดซ้อนทับกันน้อยมาก และความต้านทานหลักที่จำกัดการแพร่คือความต้านทานภายใน ส่วนความต้านทานภายนอกมีผลน้อยมาก การเพิ่มความเร็วใบพัดในการกวนไม่ได้ทำให้การแพร่เร็วขึ้น และถ้าใช้ความเร็วในการกวนรุนแรงเกินไป (N_{Re} มากกว่า 175) จะทำให้ชิ้นสับปะรดเริ่มมีการฉีกขาดทำให้ผลิตภัณฑ์ด้อยคุณภาพ

อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อกระแสการพาตามธรรมชาติ ทำให้ความต้านทานภายนอกลดลง และมีผลให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำตาลและของน้ำเร็วขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำเร็วขึ้นด้วย อุณหภูมิที่สูงเพียงพอจะทำให้เซลล์ของสับปะรดแตก มีผลให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำสั้นลง

ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเชื่อมทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลและของน้ำภายนอกและภายในมีค่าสูงเกิดเป็นแรงขับ มีผลให้การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำเกิดเร็วขึ้น และทำให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำลดลง แต่ไม่ได้ทำให้เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ขนาดและรูปร่างของสับปะรด ในสภาวะการทดลองเดียวกัน สับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและการสูญเสียน้ำจากชิ้นสับปะรดสูงกว่าสับปะรดรูปร่างเป็นแว่น แต่สับปะรดรูปร่างเป็นแว่นมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล

และการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดสูงกว่าสับปะรดรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

การอบแห้ง ไม่พบระยะการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งแบบคงที่ แต่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลงตลอดเวลาของการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นร้อยละ 22.07 และจากเส้นโค้งซอร์พชันไอโซเทอมพบว่ามีค่าวอเตอร์แอคติวิตีเท่ากับ 0.69

คุณภาพทางประสาทสัมผัส ผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 และ 70 องศาบริกซ์ เป็นเวลา 5 และ 7 ชั่วโมง ได้รับคะแนนการยอมรับรวมสูงสุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลองกับผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกันในตลาดหาดใหญ่ พบว่าผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง ได้รับคะแนนด้าน สี เนื้อสัมผัส และการยอมรับรวมสูงกว่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของสับปะรดสดและผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้ง สับปะรดสดเมื่อผ่านกระบวนการออสโมซิสและการอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลง คือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณกรดในรูปกรดซิตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มของสีสูงขึ้น ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอคติวิตีมีค่าลดลง

นอกจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิส เช่น อัตราส่วนระหว่างน้ำเชื่อมต่อสับปะรด การใช้ความดันต่ำในกระบวนการออสโมซิส รวมทั้งชนิดของผลไม้ นอกจากนี้ภาชนะบรรจุซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ควรได้มีการศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรุณา วงศ์กระจ่าง. 2535. การทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมซีส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จารุพันธ์ ทองแถม. 2526. สับปะรดและอุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนาคารกรุงศรีอยุธยาจำกัด ฝ่ายวิชาการ. 2534. การส่งออกผลไม้และผลิตภัณฑ์จากผลไม้. สถิติและข้อวิจัยเศรษฐกิจการตลาด. 10: 7-9.

ธนาคารกสิกรไทย ฝ่ายวิชาการ. 2531. ผลไม้อบแห้ง. สรุปข่าวธุรกิจ ธนาคารกสิกรไทย. 19: 16-30.

ประสิทธิ์ อติวีระกุล. 2527. เทคโนโลยีของผลไม้และผัก. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก. 2529. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

รัชนี ตัณฑะพานิชกุล. 2533. เคมีอาหาร. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

วิจิตต์ วรรณชิต. 2529. การปลูกสับปะรด. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศิวาพร ศิวเวชช. 2529. วัตถุเจือปนในอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สนอง ปาสลุง. 2535. ภาวะเศรษฐกิจการเกษตร. ข่าวเศรษฐกิจการเกษตร 38 (5) : 33-35.

อ่อนรวี รัตนาพันธุ์. 2533. หลักการทำแห้งผลไม้ด้วยวิธีออสโมติก. อาหาร. 20(4): 240-245.

Adambounou, T.L., Castaigne, F. and Dillon, J.C. 1983. Abaissement de I'activity de I'can de legumes tropicaux partielle. Sciences des Aliments 3:551. cited by: Lerici, C.R., Pinavaia, G., Dalla Rosa, M. and Bartriucei, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. J. Food Sci. 50: 1217-1226.

A.O.A.C. 1990. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. 15th ed. The Association of Official Analytical Chemist, Arlington.

Beristain, C.I., Asuara, E., Cortes, R. and Garicia, H.S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. Int. J. of Food Sci & Technol. 25 : 576-582.

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.

Bongirwa, D.R. and Sreeniyanan, A. 1977. Studies on osmotic dehydration of banana. J. of Food Sci. & Technol. 14: 104-112.

Camiran, W.M., Forry, R.R., Pepper, K., Boyle, F.P. and Stanley, W.L. 1968. Dehydration of membrane-coated foods by osmosis. J. Sci. Food Agric. 19: 472.

Contreras, J.E. and Smyrl, T.C. 1981. An evaluation of osmotic concentration of apple ring using corn syrup solid solution. Can. Inst. Food Sci. Technol. 14: 310-315.

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.

Crafis, A.S., Currier, H.B. and Stocking, C.R. 1949. Water in the physiology of plants. The Ronald Press Company, New York.

Crank, J., 1970. The mathematic of diffussion. Oxford University Press. Oxford, England.

Crank, J. 1976. The mathematic of diffussion. Oxford: Clarendon Press. p. 56-57 cited by Beristain, C.I. Azuara, E., Cortes, R. and Garicia, H.S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. Int. J. of Food Sci. & Technol. 25: 576-582.

De Man, J.M. 1976. Rheology and texture food quality. The AVI Publishing Company, Inc. Westport Connecticut.

Dickey, D.S. and Fenic, J.G. 1976. Dimensional analysis for fluid agitation systems. Chem. Eng. 5 (1) 7-13.

Dull, G.G. 1971. The biochemistry of fruits and their products. Academic Press Inc. London.

Frank, A.L. 1983. Basic food chemistry. The AVI Publishing Company, Inc. Westport Connecticut.

Henderson, S.M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agric. Eng. 33: 29.

Heng, K. Guilbert, S. and Cuq, J.L. 1990. Osmotic dehydration of papaya: Influence of process variables on the product quality. Sciences DES Aliments. 10: 831-848. อ้างโดย กรุณา

วงศ์กระจ่าง. 2535. การทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมซีส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Johnson, R. 1984. Elementary statistics. 4th ed. PWS-Kent Publising Company. Boston.

La Belle, R.L. 1971. Heat and calcium treatment for firming red tart cherries in a hot-fill process. J. Food Sci. 36: 323-325.

Labuza, T.P. 1970. Properties of water as related to the keeping quality of foods. Proceeding of the 3rd. International Congress of Food Science and Technology, SOS/70:565. อ้างโดย ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก. 2529. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Larmond, L. 1977. Laboratory method for sensory evaluation of food. Research Branch Canada Department of Agriculture Publication, Ottawa.

Lenart, A. and Flink, J.M. 1984. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmotic process. Food Technol. 19: 45-63.

Lenart, A. and Lewicki, P.P. 1988. Osmotic dehydration of apples at high temperature. In: Sixth International Drying Symposium IDS'88. Versailees France. อ้างโดย กรุณา วงศ์กระจ่าง. 2535. การทำแห้งสับปะรดด้วยวิธีออสโมซีส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Lerici, C.R., Pinavain, G., Dalla Rosa, M. and Bartriucei, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. J. Food Sci. 50: 1217-1226.

Mehta, G.L., Tomar, M.C. and Gawar, B.S. 1982. Studies on dehydration of pineapple in Uttar Pradesh. Indian Food Packer. 36(2) 35-40.

Moy, J.H., Lau, N.B.H. and Dollar, A.M. 1978. Effect of sucrose and acids on osmovac-dehydration of tropical fruits. J. Food Proc. and Pres. 2: 131-135.

Pinnavaia, G., Dalla Rosa, M. and Lerici, C.R. 1983. La disidratazione mediante osmosi diretta per la valorizzazione di prodotti vegetali. In "Atti 2 ° Convegno Nazionale Nutrizione. Ambiente. Lavoro." p 313. cited by: Lerici, C.R., Pinavaia, G., Dalla Rosa, M. and Bartriucei, L. 1985. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. J. Food Sci. 50: 1217-1226.

Ponting, J.D. 1973. Osmotic dehydration of fruits: Recent modifications and applications. Process Biochem. 8: 18-23.

Ponting, J.D., Waters, G.G., Forry, R.R., Jackson, R. and Stanley, W.L. 1966. Osmotic dehydration of fruit. Food Technol. 20: 125-128.

Rahman, M.S. and Lamb, J. 1990. Osmotic dehydration of pineapple. J. of Food Sci. & Technol. 27(3) 150-152.

Ravindran, G. 1989. Osmotic dehydration of pineapple. In: Trend in food science. Line, W.S. and Foo, C.W. (eds). Conference Proceedings of the 7th World Congress of Food Science and Technology. Singapore, 28 Sept - 2 Oct. 1987. pp. 109-112.

Singh, R.P. and Heldman, D.R. 1984. Introduction to food engineering. Academic Press Inc. London.

Siripatana, C. 1986. Mass transfer in the reversing counter-current extraction. Master of Applied Sci. Thesis. School of Food Technology, University of New South Wales. Australia.

Smogyi, L.P. and Luh, B.S. 1975. Dehydration of fruits in commercial fruit processing. AVI Publishing Co. Inc., Westport. Connecticut. USA. cited by: Ravindran, G. 1989. Osmotic dehydration of pineapple. In: Trend in food science. Line, W.S. and Foo, C.W. (eds). Conference Proceedings of the 7th World Congress of Food Science and Technology. Singapore. 28 Sept.-2 Oct. 1987.

Spiegel, M.R. 1968. Mathematical handbook of formulas and table. McGraw-Hill Company. New York.

Wilke, C.R. and Chang, P. 1981. Molecular diffusion in fluids. P.35. In: Mass-transfer operations. Treybal, R.E. (ed). McGraw-Hill International Book Company. Japan.

Wolf, W., Spiess, W.E.L. and Jung, G. 1973. Die Wasserdamfsorptionsisothermen einiger in der Literatur bislangwening berucksichtigter lebensmittel. Lebensm. Wiss. Technol. 6:94. cited by : Chirife, J.I.H. 1982. Water sorption parameters for food and food components. Academic Press Inc. London.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

1. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (โดยใช้ Abbe Refractometer)

วิธีการ

นำตัวอย่างสับปะรดที่ผ่านการออสโมซีสมาบีบและคั้นน้ำ แล้ววัดด้วย Abbe Refractometer อ่านปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในหน่วยองศาบริกซ์

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

อุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มล.
2. ปิเปต ขนาด 10 และ 50 มล.
3. บูเรตต์ขนาด 50 มล.
4. ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มล. และ 500 มล.
5. เตาให้ความร้อน (hot plate)
6. กระดาษกรอง

สารเคมีและการเตรียม

1. สารละลายเฟ-ลิง A
   - ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต เพนตาไฮเดรต ($CuSO_4.5H_2O$) 34.639 กรัม
   - ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มล.
   - กรองผ่านกระดาษกรอง
2. สารละลายเฟ-ลิง B
   - ชั่งโพแทสเซียมโซเดียมทาเทรต เตตราไฮเดรต ($KNaC_4H_4O_6.4H_2O$) หนัก 173 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัม

- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 500 มล.

3. Neutral lead acetate solution

- ละลาย neutral lead acetate 112.5 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มล.

4. Potassium oxalate solution

- ละลาย potassium oxalate 55 กรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 250 มล.

5. Standard dextrose 1%

- ละลายซูโครสบริสุทธิ์ 9.5 กรัม และกรดไฮโดรคลอริคเข้มข้น 5 มล. ในน้ำกลั่น 100 มล. เก็บไว้ 2-3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาปรับปริมาตรเป็น 1,000 มล. ปรับสภาพสารละลายน้ำตาลให้เป็นกลางก่อนนำมาใช้ในการไตเตรท โดยไปเปตสารละลายน้ำตาลที่เตรียมไว้มา 50 มล. ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 200 มล. หยดฟินอล์ฟทาลีน 2 หยด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริค 1 นอร์มอล ทีละหยดจนสีหายไปปรับปริมาตรให้ได้ 200 มล. นำมาไตเตรทกับสารละลายเฟ-ลิง

<u>วิธีการ</u>

1. การหาค่ามาตรฐานสารละลายเฟ-ลิง

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

1.1 Preliminary method

- ไปเปตสารละลายเฟ-ลิง A และ B อย่างละ 5 มล. ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

- เติมสารละลาย dextrose จากบิวเรตต์ประมาณ 15 มล. ต้มให้เดือด แล้วเติมสารละลาย dextrose ต่อไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งสีน้ำเงินจางลง

- เติม methylene blue 1% 3-4 หยด ค่อย ๆ เติมสารละลายน้ำตาลลงไปอีก จนสีน้ำเงินหายไป และเกิดตะกอนแดงขึ้น

- บันทึกปริมาตรสารละลายน้ำตาลที่ใช้

1.2 Accurate method

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

- ใส่สารละลาย dextrose ลงในขวดรูปชมพู่ ให้ปริมาตรน้อยกว่าจุดยุติประมาณ 1 มล.

- เขย่า ต้มให้เดือดโดยเร็วและสม่ำเสมอนาน 2 นาที

- เติม methylene blue 2-3 หยด

- ไตเตรท โดยใส่ครั้งละ 2-3 หยด ให้ถึงจุดยุติภายในเวลา 3 นาที (ขณะไตเตรท สารละลายในขวดรูปชมพู่ต้องเดือดตลอดเวลา และเขย่าให้เข้ากัน)

- อ่านปริมาตรของ dextrose (มล.) ที่ใช้

- คำนวณค่า factor ของสารละลายเฟ-ลิงดังนี้

<u>การคำนวณหา factor</u>

จากทฤษฎีการเปลี่ยนซูโครสเป็นน้ำตาลอินเวอร์ทดังสมการ

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \xrightarrow{HCl\ conc.} C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$$

(ซูโครส) (กลูโคส) (ฟรุกโตส)

น้ำหนักโมเลกุล 342.296 180.156 180.156

ซูโครสหนัก 342.296 กรัมจะได้น้ำตาลอินเวอร์ท = 2 x 180.156

= 360.312 กรัม

$$\text{ค่าแฟคเตอร์} = \frac{360.312\ XY\ (50)}{342.296 \times 1000 \times 200}$$

เมื่อ X = น้ำหนักซูโครสที่ใช้

Y = ปริมาตรสารละลายซูโครสที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเฟ-ลิง A และ B 10 มล.

2. การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

2.1 การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

- ชั่งตัวอย่างซึ่งผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มล.
- ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล
- ต้มนาน 1 ชั่วโมง มีการคนเป็นครั้งคราว
- เติมน้ำต้มเพื่อปรับให้มีปริมาตรเท่าเดิมก่อนต้ม
- ทำให้เย็น แล้วถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มล.
- เติมสารละลายนิวทรัลเลดอะซิเตด 2 มล. ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
- ตกตะกอนส่วนที่เกินพอด้วยสารละลายโปตัสเซียมออกซาเลท 2 มล.
- ปรับปริมาตร แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง
- นำไปไตเตรทตามวิธีในข้อ 1

2.2 การหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

- ไปเปตตัวอย่างที่กรองได้จากข้อ 2.1 มา 25 มล. เติมน้ำกลั่นเป็น 100 มล.
- เติมกรดไฮโดรคลอริก 5 มล.
- ต้มให้เดือด 10 นาที

- ทำให้เย็นแล้วถ่ายใส่ขวดปริมาตรขนาด 250 มล. ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล
- ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 250 มล. กรองผ่านกระดาษกรอง
- นำไปไตเตรทตามวิธีในข้อ 1.

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์, ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)} = \frac{\text{แฟคเตอร์} \times \text{ปริมาณเจือจาง} \times 100}{\text{ไทเทอร์} \times \text{ปริมาณตัวอย่าง}}$$

3. ปริมาณความชื้น โดยวิธีทำแห้งในตู้อบสุญญากาศ (A.O.A.C. 1990)

อุปกรณ์

1. ตู้อบสุญญากาศ
2. ภาชนะหาความชื้น
3. เดสิเคเตอร์
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า

วิธีการ

ชั่งตัวอย่างสับปะรดที่บดละเอียดแล้วประมาณ 2-5 กรัม ใส่ในภาชนะหาความชื้นที่มีฝาปิด นำเข้าตู้อบสุญญากาศอุณหภูมิ 70 °ซ โดยควบคุมความดันในตู้อบไม่ให้เกิน 100 มม. ของปรอทเป็นเวลา 7-8 ชั่วโมง ปิดฝาอย่างรวดเร็ว ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักทันทีเมื่อตัวอย่างเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง ทำการอบซ้ำจนน้ำหนักในแต่ละครั้งไม่แตกต่างมากกว่า 3 มก.

การคำนวณ

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

4. ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก โดยการไตเตรทกับสารละลายด่างมาตรฐาน 0.1 N (A.O.A.C. 1990)

วิธีการ

นำตัวอย่างสับปะรด 10 กรัม เติมน้ำเล็กน้อย ต้มให้เดือด 2-3 นาที ทำให้เย็น ถ่ายใส่ขวดปริมาณ 50 มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นแล้วกรอง ไปเปตส่วนที่กรองได้ 10 มิลลิลิตรใส่ขวดชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 หยด นำไปไตเรตทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มอล

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (ร้อยละ)} = \frac{\text{ไทเทอร์} \times N \times n \times 100 \times 50}{\text{มก.ของตัวอย่างตัวอย่าง} \times 100}$$

เมื่อ N = นอร์มอลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

n = มิลิอิควิวาเลนท์ของกรดซิตริก = 0.07

5. ความเป็นกรด-ด่าง (โดยใช้พีเอชมิเตอร์)

วิธีการ

สับปะรดสด นำตัวอย่างสับปะรดมาบีบและคั้นน้ำ กรองผ่านผ้าขาวบาง ส่วนสับปะรดอบแห้ง นำสับปะรดอบแห้ง 5 กรัม เติมน้ำ 10 มล. ปั่นนาน 2 นาที กรองผ่านผ้าขาวบาง วัดค่าความเป็นกรดด่างด้วยพีเอชมิเตอร์ ที่ผ่านการปรับด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานพีเอช 4.0 และ 7.0

ภาคผนวก ข. แบบทดสอบชิม Hedonic Scale

แบบทดสอบชิม

ชื่อ..... วันที่.....เวลา.....

จากตัวอย่างที่จัดให้ชอให้ท่านทดสอบชิมตามรายละเอียดข้างล่างนี้

คะแนน

9 = ชอบมากที่สุด

8 = ชอบมาก

7 = ชอบปานกลาง

6 = ชอบเล็กน้อย

5 = เฉย ๆ

4 = ไม่ชอบเล็กน้อย

3 = ไม่ชอบปานกลาง

2 = ไม่ชอบมาก

1 = ไม่ชอบมากที่สุด

ตัวอย่าง คุณภาพ					
สี ความหวาน เนื้อสัมผัส การยอมรับรวม					

ภาคผนวก ค. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับกระบวนการออสโมซีสและการอบแห้ง

- <u>เรนโนลนัมเบอร์</u>

$$N_{Re} = D^2 N\rho / \mu$$

เมื่อ N_{Re} = เรนโนลนัมเบอร์

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

N = จำนวนรอบใบพัดในการกวน (รอบ/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำเชื่อม (กิโลกรัม/เมตร^3)

μ = ความหนืดของน้ำเชื่อม (Pa.s)

(Pa.s = N x m^{-2} = kg.m.S^{-2}.m^{-2})

ตารางผนวกที่ ค1 ผลของความเร็วใบพัดในการกวนต่อค่าเรนโนลนัมเบอร์ที่คำนวณได้

N_{Re}	D (เมตร)	N (รอบ/นาที)	Pa.s (กิโลกรัม/เมตร.วินาที^{2})	ρ (กรัม/มล^3)
0	0.075	0	0.226	1.307
17	0.075	25	0.180	1.302
34	0.075	50	0.180	1.302
68	0.075	100	0.340	1.340
137	0.075	200	0.264	1.312
175	0.075	250	0.340	1.340
209	0.075	300	0.340	1.340

ตัวอย่างการคำนวณค่าเรนโนลนัมเบอร์

ที่ความเร็วใบพัด 25 รอบต่อนาที

$$N_{Re} = (0.075^2)\ \frac{(25)}{60}\ (1.302 \times 10^3) \times \frac{1}{0.180}$$

$$= 16.95$$

- <u>สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล</u>

$$Y + Z = (1-M_o)TW_o \qquad (1)$$

$$d = \frac{Y}{Y+W} \qquad (2)$$

$$W = TW_o - Y-Z \qquad (3)$$

$$d = Y/(TW_o-Z) \qquad (4)$$

$$Z = [(1-M_o)TW_o-dTW_o]/(1-d) \qquad (5)$$

$$\alpha = W_s/(W+Y) \qquad (6)$$

$$Y_\infty = Y + BS_o\ (W_s)/(W+Y+W_s) \qquad (7)$$

$$W_\infty = Y_\infty\ (W+Y)/(W+Y+Z) \qquad (8)$$

พล็อตกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{x - x_\infty}{x_0 - x_\infty}\right)$ กับเวลา หาความลาดชัน แล้วนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลดังสมการ

$$D_s = - \text{Slope} / \left[\left(\frac{\alpha + 1}{\alpha}\right) \left(\frac{F_1}{a_1^2} + \frac{F_2}{a_2^2} \right) \right]$$

เมื่อ D_s = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล

α = อัตราส่วนระหว่างน้ำเชื่อมต่อสับปะรด

F_1 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นแผ่นราบ

มีค่า = 2.4522-(0.38399/)

F_2 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก

มีค่า = 2.8494-(0.6475/)

a_1 = ครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นสับปะรด = 0.006 เมตร

a_2 = ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นสับปะรด = 0.04 เมตร

Y = น้ำหนักของของแข็งที่ละลายได้ในชิ้นสับปะรด (g)

Y_∞ = น้ำหนักของของแข็งที่ละลายได้ในชิ้นสับปะรด (g) ที่จุดสมดุล

W = น้ำหนักของน้ำในชิ้นสับปะรด (g)

W_∞ = น้ำหนักของน้ำในชิ้นสับปะรด (g) ที่จุดสมดุล

Z = น้ำหนักขององค์ประกอบเฉื่อย (g)

d = สัดส่วนของค่าเฉลี่ยของของแข็งที่ละลายได้

BS_o = สัดส่วนของความหวานเริ่มต้นของน้ำเชื่อม

M_o = สัดส่วนของความชื้นเริ่มต้นของสับปะรด

W_s = น้ำหนักเริ่มต้นของน้ำเชื่อม (g)

TW_o = น้ำหนักเริ่มต้นทั้งหมดของสับปะรด (g)

x = สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดที่เวลา t

x_o = สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดเริ่มต้น

x_∞ = สัดส่วนของความหวานของชิ้นสับปะรดที่จุดสมดุล

- <u>สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ</u>

พล๊อตกราฟระหว่าง $\ln\left(\frac{x - x_\infty}{x_o - x_\infty}\right)$ กับเวลา หาความลาดชัน แล้วนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำดังสมการ

$$D_w = - \text{Slope} / \left[\left(\frac{\alpha + 1}{\alpha} \right) \left(\frac{F_1}{a_1^2} + \frac{F_2}{a_2^2} \right) \right]$$

เมื่อ D_w = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ

α = อัตราส่วนระหว่างน้ำเชื่อมต่อสับปะรด

F_1 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นแผ่นราบ

F_2 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก

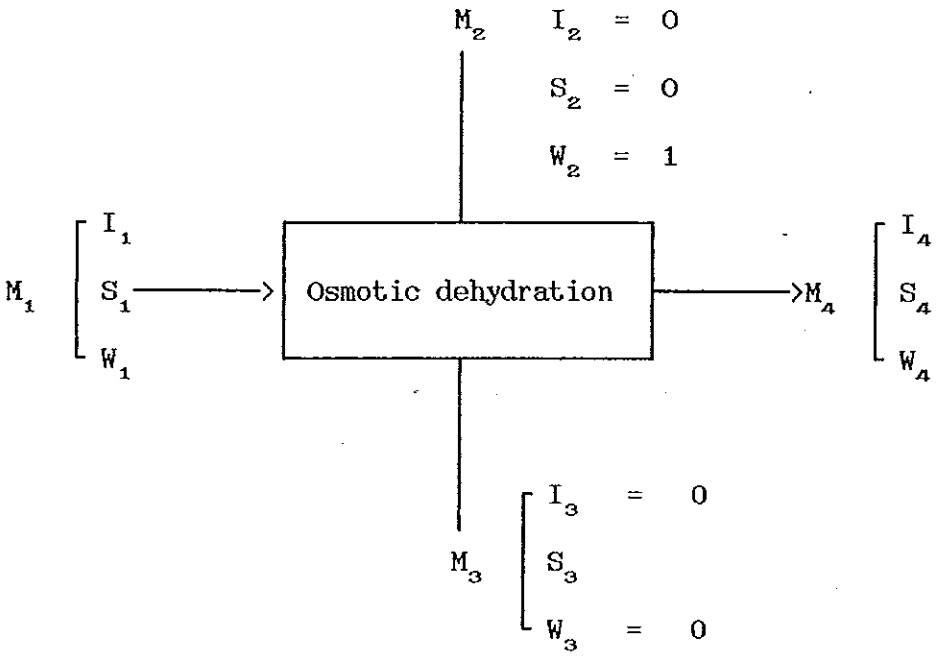
a_1 = 1/2 ของความหนาของสับปะรด

a_2 = 1/2 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นสับปะรด

WL_t = การสูญเสียน้ำออกจากสับปะรดที่เวลาใด ๆ (ร้อยละ)

WL_∞ = การสูญเสียน้ำออกจากสับปะรดที่จุดสมดุล (ร้อยละ)

- การคำนวณอัตราการแพร่ของน้ำตาลและอัตราการแพร่ของน้ำ



Inert balance

$$I_1W_1 = I_4W_4 \quad (1)$$

Overall balance

$$W_1+W_3 = W_2+W_4 \quad (2)$$

Water balance

$$M_1W_1 = M_4W_4+W_4 \quad (3)$$

Solute balance

$$S_1W_1 + S_3W_3 = S_4W_4 \quad (4)$$

จากนิยามของ Brix

$$X_4 = \frac{S_4W_4}{S_4M_4 + M_4W_4}$$

$$= \frac{S_4}{S_4 + M_4} \quad (5)$$

จากนิยามของสัดส่วน

$$M_4 + S_4 + I_4 = 1 \quad (6)$$

$$S_1 = \frac{X_1 M_1}{(1-X_1)} \quad (7)$$

จาก (1) $$I_4 = I_1W_1/W_4 \quad (8)$$

จาก (6) $$M_4 = \frac{1 - I_4}{\frac{1 + X_4}{1-X_4}} \quad (9)$$

จาก (5) $$S_4 = \frac{X_4 M_4}{(1-X_4)} \quad (10)$$

$$W_2 = M_1 W_1 - M_4 W_4 \quad (11)$$

$$W_3 = W_2 - W_4 - W_1 \quad (12)$$

นำค่า water loss (M_2) และ solid gain (M_2) ไปคิดเป็นร้อยละ

เมื่อ X_1 = สัดส่วนของความหวานของสับปะรดเริ่มต้น

X_4 = สัดส่วนของความหวานของสับปะรดหลังออสโมซิส

I_1 = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยภายในชิ้นสับปะรดเริ่มต้น

I_2 = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยที่ออกไปจากชิ้นสับปะรด = 0

I_3 = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยที่เข้าไปจากชิ้นสับปะรด = 0

I_4 = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉื่อยภายในชิ้นสับปะรดหลังออสโมซิส

W_1 = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดเริ่มต้น (g)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดที่สูญเสีย (g)

W_3 = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดที่เพิ่มขึ้น (g)

W_4 = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดหลังออสโมซิส (g)

S_1 = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดเริ่มต้นไม่คิดองค์ประกอบเฉื่อย

S_2 = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดที่สูญเสีย = 0

S_3 = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดที่เพิ่มขึ้น

S_4 = สัดส่วนของของแข็งที่ละลายได้ของสับปะรดหลังออสโมซิส

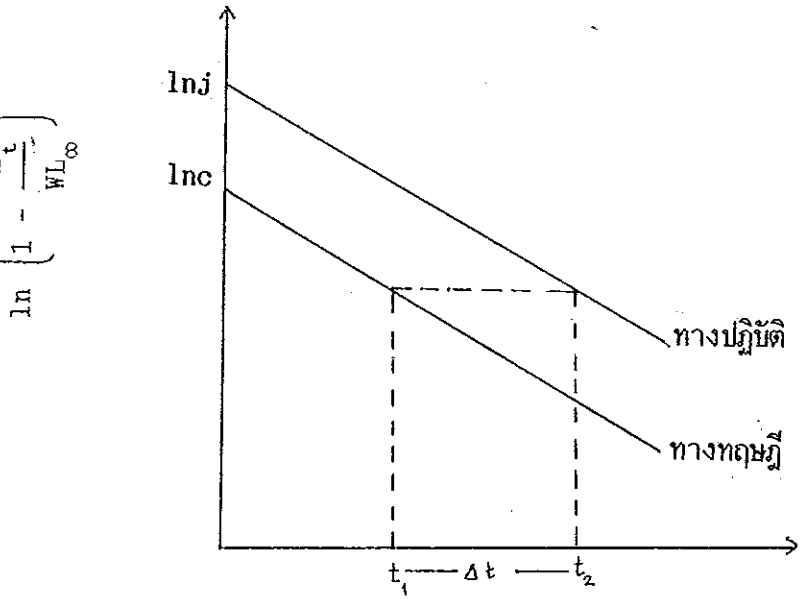
M_1 = สัดส่วนของความชื้นของสับปะรดเริ่มต้น

M_2 = สัดส่วนของความชื้นของสับปะรดที่สูญเสีย = 1

M_3 = สัดส่วนของความชื้นที่ออสโมซิสเข้าไปในชิ้นสับปะรด = 0

M_4 = สัดส่วนของความชื้นสุดท้ายของชิ้นสับปะรด

- การคำนวณเวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิสของน้ำตาลและของน้ำ



$$tp = \frac{(lnj - lnc)}{-S}$$

เมื่อ tp = เวลาล่าช้าเนื่องจากพลาสมอลิซิส

lnj = จุดตัดบนแกน Y ในกราฟการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลหรือของน้ำ

lnc = ได้จาก $C = \{2 / (\gamma_1 + F_1)\}\{2 / (\gamma_2 + F_2)\}$

S = slope

F_1 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปร่างเป็นแผ่นราบ

γ_1 = 1 ในกรณีของแข็งที่มีรูปร่างเป็นแผ่นราบ

F_2 = ค่า F สำหรับของแข็งที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก

γ_2 = 2 ในกรณีของแข็งที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก

การคำนวณสมการการทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ในทางทฤษฎี Wilke และ Chang (1981) ได้เสนอการคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$D = \frac{(117.3 \times 10^{-18}) (\Psi M_B)^{0.5} T}{VA^{0.6}}$$

เมื่อ D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

M_B = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย (kg./K.mol) กรณีน้ำเป็นตัวทำละลาย $M_B = 18.02$

T = อุณหภูมิ (k)

μ = ความหนืดของสารละลาย (kg/m.s)

V_A = ปริมาตรต่อโมลของตัวทำละลาย กรณีน้ำเป็นตัวทำละลายมีค่า = 0.076

Ψ = ความสัมพันธ์ของแฟคเตอร์ของตัวทำละลายกรณีน้ำเป็นตัวทำละลายมีค่า = 2.26

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

น้ำเชื่อม 40 องศาบริกซ์ มีความหนืด = 3.3 (mPas) = 0.003 ($kg.s^{-1},m^{-1}$)

M_B = 18.02

T = 273 + 50 = 323 k

V_A = 0.076

Ψ = 2.26

$$\therefore \quad D = (117.3\times10^{-18})\,(2.26\times18.02)^{0.5}\,(323)$$
$$(0.076)^{0.6}$$

$$= \quad 3.44 \times 10^{-10} \quad m^2/s$$

การคำนวณสมการการทำนายวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) (Henderson, 1952)

$$a_w = 1-\exp\,(-B_2\, X^{B1})$$

เมื่อ B_1 = พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิ 25 °ซ มีค่า 0.8096

B_2 = พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิ 25 °ซ มีค่า 0.8021

ภาคผนวก ง. การคำนวณพื้นที่ผิวของสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และสับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่น

1. สับปะรดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

ให้ a = ความยาวของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (ซม.)

พื้นที่ผิว (A_1) $= 6a^2$

$= 6 \times 1.5^2$

$= 13.5$ ซม.^{2}

ปริมาตร (V_1) $= a^3$

$= 1.5 \times 1.5 \times 1.5$

$= 3.38$ ซม.^{3}

$A_1/V_1 = 3.9940$

2. สับปะรดที่มีรูปร่างเป็นแว่น

พื้นที่ผิว (A_2) $= 2\pi R^2 - 2\pi r^2 + 2\pi Rh + 2\pi rh$

$= 2\pi(R^2 - r^2) + 2\pi h(R + r)$

$= 2\pi(4^2 - 0.95^2) + 2\pi(1.2)(4+0.95)$

$= 132.18$ ซม^2

ปริมาตร (V_2) $= \pi R^2 h - \pi r^2 h$

$= \pi h(R^2 - r^2)$

$= 56.92$ ซม^3

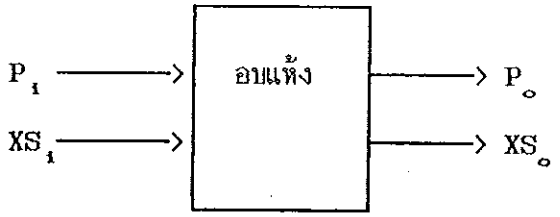
$A_2/V_2 = 2.3222$

ภาคผนวก จ. การวัดและการคำนวณความหวานของผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลองและผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

การคำนวณความหวานของผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากการทดลอง

วิธีการคำนวณ

Mass balance ของการอบแห้ง



Material input = Material output

Sugar balance

$$XS_i P_i = XS_o P_o$$

เมื่อ P_i = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดก่อนอบแห้ง (กรัม)

P_o = น้ำหนักของชิ้นสับปะรดหลังอบแห้ง (กรัม)

XS_i = สัดส่วนของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดก่อนอบแห้ง

XS_o = สัดส่วนของน้ำตาลในชิ้นสับปะรดหลังอบแห้ง

การวัดและการคำนวณความหวานของผลิตภัณฑ์สับปะรดอบแห้งจากตลาดหาดใหญ่

วิธีการ

1. หาความชื้นของผลิตภัณฑ์
2. นำผลิตภัณฑ์มาชั่งน้ำหนักและเติมน้ำกลั่น (วัดปริมาตรที่แน่นอน) แล้วนำมาปั่น 2 นาที
3. ตั้งไฟอ่อน ๆ เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในภาชนะปิดสนิท 24 ชั่วโมง
4. วัดความหวานสุดท้าย

วิธีการคำนวณความหวาน

Mass balance

น้ำหนักของผลิตภัณฑ์สับปะรด = น้ำหนักน้ำ + น้ำหนักองค์ประกอบเฉื่อย + น้ำหนักน้ำตาล

$$\text{จาก} \quad \text{Brix} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำตาล}}{\text{น้ำหนักน้ำตาล + น้ำหนักน้ำ}}$$

น้ำหนักน้ำตาล = Brix ของผลิตภัณฑ์หลังเจือจาง (น้ำหนักน้ำตาล + น้ำหนักน้ำในชิ้นสับปะรด + น้ำหนักที่เติม)

$$\text{ดังนั้น Brix ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะมีค่า} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำตาล}}{\text{น้ำหนักน้ำตาล + น้ำหนักน้ำในชิ้นสับปะรด}}$$

ภาคผนวก ฉ. ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลและของน้ำ

ตารางผนวกที่ ฉ1 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาลที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1 และความหนืดของของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำตาล x 10^{10} (เมตร^2/วินาที)	
	น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี
40	16.25	16.45
50	14.15	17.30
60	17.60	20.05
70	13.25	12.80

ตารางผนวกที่ ฉ2 ผลของความเข้มข้นน้ำเชื่อมต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราส่วนน้ำเชื่อมต่อสับปะรด 8:1

ความเข้มข้นน้ำเชื่อม (องศาบริกซ์)	สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ x 10^{10} (เมตร^2/วินาที)	
	น้ำเชื่อมที่ไม่เติมสารเคมี	น้ำเชื่อมที่เติมสารเคมี
40	8.32	11.13
50	10.89	9.45
60	12.69	9.56
70	8.75	11.84