

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของการใช้สูญญากาศในการแช่อิมว่วนทางจระเข้  
EFFECT OF VACUUM IMPREGNATION FOR  
ALOE VERA CANDYING



รฟ.  
ร/๒๒๑๘  
๒๕๔๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72253  
วัน,เดือน,ปี..... 12 ส.ย. 2550

b. 117 ๒๒๖๘  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของการใช้สุญญากาศในการแช่อิ่มว่านหางจระเข้


Effect of Vacuum Impregnation for Aloe Vera Candyng


ผู้จัดทำ


- |            |         |              |          |
|------------|---------|--------------|----------|
| 1. ปิยะนุช | ยศคำลือ | รหัสประจำตัว | 46010461 |
| 2. ศीलวัต  | สุดโต   | รหัสประจำตัว | 46010786 |



  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.ปานมนัส สิริสมบูรณ์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.วิภา เจียรฉนวนิชระ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ธีรพงศ์ พลโพธิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลของการใช้สุญญากาศในการแช่แข็งวุ้นหางจระเข้

นางสาวปิยะนุช ยศคำลือ 46010461  
 นายศीलวัต สุดโต 46010786  
 รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ผศ.ดร.วิภา เกียรติระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา  
 อาจารย์ธีรพงศ์ ผลโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2549

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาผลของการใช้สุญญากาศในการแช่แข็งวุ้นหางจระเข้ การออกแบบอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง และการประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบดังกล่าวเพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง โดยในเบื้องต้นได้ทำการกำหนดสถานะการทดลองและทำการทดลองโดยใช้หลักการ Response Surface Methodology (RSM) แบบ Box-Behnken Design 3 ปัจจัย ปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ 1. ความเข้มข้นของสารละลาย (10, 37.5 และ 65°Brix) 2. เวลา (5, 10 และ 15 นาที) และ 3. ความดัน (0, 400 และ 800 mbar) ตรวจสอบค่าต่างๆ เพื่อกำหนดตัวแปรเพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์การทำแช่แข็ง ได้แก่ ปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water loss), ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid grain), เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage), ค่าความสว่าง (Translucent) และเนื้อสัมผัส (Average firmness) จากการทดลองทำให้เราสามารถเลือกสถานะที่เหมาะสมได้ คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ 30°Brix ใช้เวลา 5 นาที และอยู่ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 200 mbar และเพื่อให้วุ้นหางจระเข้มีเนื้อสัมผัสที่แน่นขึ้น ได้ทำการทดลองแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยการเลือกสถานะที่เหมาะสมจากการทดลองเช่นเดียวกับการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการทำแช่แข็งวุ้นหางจระเข้ และค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ คือ ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 % ของน้ำ ใช้เวลา 10 นาที (จากเดิมแช่เป็นเวลา 30 นาที) และความดัน 200 mbar สำหรับการออกแบบอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง วุ้นหางจระเข้ 100 kg อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประกอบด้วย 1) ถังความดัน (Vacuum tank) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 cm และสูง 90 cm 2) Vacuum pump ขนาด 0.5 แรงม้า อัตราการไหล 4.5 m<sup>3</sup>/hr 3) ถังสำหรับใส่สารละลายออสโมติก มีขนาดเท่ากับถังความดัน 4) ปั๊มสำหรับดูดสารละลายเข้าสู่ถังความดัน ขนาด 1.5 Hp 5) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 7500 watt 6) เทอร์โมมิเตอร์ (0-100 °C) และ 7) ท่อ PVC ขนาด 1 1/2" จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ทำให้ทราบต้นทุนในการผลิตรวมเท่ากับ 100,000 บาท และจุดคุ้มทุน คือ ปริมาณการผลิตเท่ากับ 10,000 kg และ ต้นทุนการผลิตรวม 450,000 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Effect of Vacuum Impregnation for Aloe Vera Candying

### Abstract

This study was to investigate the effect of vacuum impregnation for Aloe vera candying, design of vacuum impregnation apparatus and economic feasibility assessment of the system for medium industries. The experiment was designed by Response Surface Methodology (RSM) using Box-Behnken Design with three factors. The factors studied were 1. osmotic solution concentration (10, 37.5 and 65<sup>o</sup>Brix) 2. Vacuum treatment duration (5, 10 and 15 minutes) and 3. Vacuum pressure (0, 400 and 800 mbar). The properties of Aloe vera included water loss, solid gain, percent shrinkage, lightness and average firmness were measured. The result showed that the suitable condition was 30% Brix solution concentration with 5 minute duration vacuum treatment time and vacuum pressure of 200 mbar. The experiment was also conducted by using calcium chloride solution treating the Aloe vera samples for their firmer texture and used the achieved suitable condition. It was found that the suitable concentration of calcium chloride solution was 0.1% treated within 10 minutes (prior was 30 minutes) and the suitable vacuum pressure was 200 mbar. The vacuum impregnation apparatus was designed for 100 kg Aloe vera. The apparatus was consisted of 1) Vacuum tank with 90 cm diameter and height 2) Vacuum pump of 0.5 Hp and 4.5 m<sup>3</sup>/hr 3) Osmotic solution tank with the same size as vacuum tank 4) 1.5 Hp liquid pump for circulation of solution in the vacuum tank and the system 5) 7,500 watt Heater 6) Thermometer (0-100 °C) and 7) 1 1/2 inches PVC pipe system. The economic feasibility study showed that the production cost was 100,000 baht and the break even point was at 10,000 kg and 450,000 baht.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจจะสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือให้คำแนะนำจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ได้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ, ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ผศ.ดร.วิภา เจียรโนวชิระ และอาจารย์ธีรพงศ์ ผลโพธิ์ ที่ช่วยแนะแนวทาง ให้คำปรึกษา ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ ตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่น้อง เจ้าหน้าที่ และคณาจารย์ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางกอก อโถ ที่ช่วยกรุณาสนับสนุนว่านหางจระเข้ ให้คำแนะนำต่างๆ ในเรื่องว่านหางจระเข้ และอนุญาตให้เข้าเยี่ยมชมโรงงาน

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งแก่ คุณพ่อ คุณแม่ ของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นบุคคลที่สำคัญที่สุดของชีวิตของข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ ที่เลี้ยงข้าพเจ้าจนเติบโตใหญ่ดูแลเอาใจใส่และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีที่สุด พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาแก่ข้าพเจ้าอย่างเต็มที่ตลอดมา ข้าพเจ้าจะขอระลึกพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณ ณ ที่นี้

ขอคุณพระศรีรัตนตรัยจงช่วย คลบ้นกาล ปกปักษ์รักษาให้ทุกท่านที่ข้าพเจ้าเฝ้าถึงมีสุขภาพและพลานามัยที่แข็งแรงและมีความสุข ตลอดไป

ขอขอบคุณ

นางสาวปิยะนุช ชคคำลือ  
นายศีลวัต สุคโต

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้าที่   |
|--|-----------|
| 2.6.2 สารออสโมติก ที่นิยมใช้กับผลไม้   | 16        |
| 2.6.3 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก   | 18        |
| 2.6.4 อัตราส่วนระหว่าง สารละลายออสโมติกกับผลไม้  | 18        |
| 2.7 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารที่ผ่านการคึ่งน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก                         | 18        |
| 2.7.1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain, SG) | 18        |
| 2.7.2 ระบบการวัดค่าสี  | 19        |
| 2.7.3 เฟอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage)  | 21        |
| 2.7.4 เนื้อสัมผัส (Texture)  | 21        |
| 2.7.5 การวัดค่าของความพรุนในผลไม้ (Porosity)   | 24        |
| 2.7.6 ความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density)   | 25        |
| 2.7.7 ความชื้น (Moisture content)  | 25        |
| 2.8 หลักการ Response Surface Methodology (RSM)   | 25        |
| 2.8.1 ความหมาย   | 25        |
| 2.8.2 นิยาม  | 25        |
| 2.8.3 แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot)  | 26        |
| 2.8.4 ขั้นตอนการทำ RSM   | 27        |
| 2.8.5 เทคนิคในการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด  | 28        |
| 2.8.6 การสร้าง Contour plot  | 28        |
| 2.8.7 การออกแบบการทดลอง (Experimental design RMS)  | 28        |
| 2.8.8 การใช้โปรแกรม STATISTICA 5.0 ในการสร้าง Contour Plot ใน RSM                        | 35        |
| 2.8.9 การทดสอบ Lack of fit ของ RSM ใน SPSS ต้องทำโดยอ้อม                                 | 36        |
| <b>บทที่ 3</b> <b>อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>   | <b>37</b> |
| 3.1 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อการทำแช่อิ่มว่านหางจระเข้ โดยวิธีออสโมติก                 | 37        |
| 3.1.1 ศึกษาผลของการใช้สภาวะความดันบรรยากาศ และความเข้มข้นของซูโครสไซรัป                  | 37        |
| 3.1.2 เพื่อศึกษาผลของการใช้สภาวะความดันบรรยากาศ และความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ | 37        |
| 3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี   | 37        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 4

|  |    |
|--|----|
| 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ   | 38 |
| 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการและวิธีการทดลอง   | 41 |
| 3.4.1 ศึกษาผลของการใช้สุญญากาศในการแช่แข็งวุ้นหางจระเข้  | 41 |
| 3.4.2 การเตรียมวุ้นวุ้นหางจระเข้   | 43 |
| 3.4.3 การเตรียมซูโครสไซรัปและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์   | 43 |
| 3.4.4 การแช่ในซูโครสไซรัป  | 43 |
| 3.4.5 การแช่ในแคลเซียมคลอไรด์  | 43 |
| 3.5 การเลือกใช้หลักการ Response Surface Methodology (RSM)  | 44 |
| ผลการทดลอง   | 46 |
| 4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวุ้นหางจระเข้   | 46 |
| 4.1.1 การหาความเป็นรูพรุนวุ้นหางจระเข้ (Porosity)  | 46 |
| 4.1.2 ความหนาแน่นเนื้อ (Solid density)   | 46 |
| 4.1.3 ค่าความสว่าง (Translucent)   | 46 |
| 4.1.4 เนื้อสัมผัส (Texture, Average firmness)  | 47 |
| 4.1.5 ค่าความชื้น (Moisture content)   | 47 |
| 4.1 ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายซูโครสในการทำแช่แข็งวุ้นหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง | 47 |
| 4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของวุ้นวุ้นหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง                                  | 47 |
| 4.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของวุ้นวุ้นหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง                              | 48 |
| 4.2.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของวุ้นวุ้นหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง                                      | 48 |
| 4.2.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของวุ้นวุ้นหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง                               | 48 |
| 4.2.5 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส (Texture, Average Firmness)หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง                     | 48 |
| 4.3 ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง                 | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้าที่ |
|--|---------|
| 4.3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ(Water Loss,WL)ของชิ้นว่านทางจระเข้<br>สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศ<br>ก่อนการทำแช่แข็ง | 54      |
| 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชิ้นว่านทางจระเข้สำหรับการใช้<br>สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง                | 54      |
| 4.3.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นว่านทางจระเข้สำหรับการใช้สารละลาย<br>แคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง                        | 54      |
| 4.3.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง(L*)ของชิ้นว่านทางจระเข้สำหรับการ<br>ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์หลังการใช้สุญญากาศก่อน<br>การทำแช่แข็ง          | 54      |
| 4.3.5 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture, Average Firmness)สำหรับการ<br>ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อน<br>การทำแช่แข็ง      | 55      |
| <b>บทที่ 5</b> การออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการแช่แข็งว่านทางจระเข้<br>และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง | 61      |
| 5.1 แนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการแช่แข็ง<br>ว่านทางจระเข้   | 61      |
| 5.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็งว่านทางจระเข้   | 61      |
| 5.2.1 ปัจจัยและเงื่อนไขในการออกแบบ   | 61      |
| 5.2.2 การออกแบบถังสุญญากาศ   | 62      |
| 5.2.3 การออกแบบระบบไหลวนของน้ำแช่แข็ง  | 67      |
| 5.2.4 การออกแบบปั๊มสุญญากาศ  | 75      |
| 5.3 ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม  | 75      |
| 5.3.1 การประเมินราคาต้นทุน   | 75      |
| <b>บทที่ 6</b> สรุปและวิจารณ์ผล  | 78      |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง   | 78      |
| 6.1.1 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สุญญากาศระหว่าง<br>การแช่แข็งว่านทางจระเข้โดยใช้ซูโครสไซรัป   | 78      |
| 6.1.2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สุญญากาศก่อน  | 78      |

การเชื่อมขวางจระเข้โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.2   | สรุปเกี่ยวกับชุดอุปกรณ์การทำเชื่อมขวางจระเข้และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง | 79 |
| 6.2.1 | ชุดอุปกรณ์การทำเชื่อมขวางจระเข้  | 79 |
| 6.2.2 | การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง   | 79 |
| 6.3   | ข้อเสนอแนะ   | 79 |

|               |    |
|---------------|----|
| ภาคผนวก ก     | 80 |
| ภาคผนวก ข     | 84 |
| ภาคผนวก ค     | 88 |
| ภาคผนวก ง     | 93 |
| ภาคผนวก จ     | 96 |
| ภาคผนวก ฉ     | 98 |
| เอกสารอ้างอิง | 99 |



สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 2.1  | (ก) ว่านหางจระเข้พันธุ์ <i>Aloe vera</i> (ข) ว่านหางจระเข้พันธุ์ <i>Aloe barbadensis</i> Mill.                                      | 4  |
| รูปที่ 2.2  | การถ่ายเทมวลสารระหว่างมวลสารภายในเซลล์อาหารและสารละลาย ออสโมติก   | 9  |
| รูปที่ 2.3  | โมเดลของกระบวนการออสโมซิส   | 9  |
| รูปที่ 2.4  | เปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและน้ำตาลระหว่างการคั่งน้ำออกจากผลไม้แบบ ออสโมติก   | 11 |
| รูปที่ 2.5  | ขั้นตอนหลักที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแพร่ในสุญญากาศของความพรุน ของอาหาร(ผลไม้) ที่แช่อยู่ในของเหลวเป็นสถานการณ์ของรูพรุน ในอุดมคติ | 15 |
| รูปที่ 2.6  | การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ.   | 20 |
| รูปที่ 2.7  | Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้ม ของโทนสี  | 20 |
| รูปที่ 2.8  | การหาปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง โดยการแทนที่ของเหลว   | 21 |
| รูปที่ 2.9  | กราฟของ แรง - การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการกด, การทดสอบการคลาย ตัว และการคืนสภาพ  | 23 |
| รูปที่ 2.10 | ลักษณะของแผนภาพคอนทัวร์ (2 มิติ) ชนิดต่างๆ (A, B, C, D) และ surface plot (3 มิติ) (E)   | 26 |
| รูปที่ 2.11 | การวางแผนแบบ Rotatable design   | 29 |
| รูปที่ 2.12 | Central composite design ใน 2 ปัจจัย (k = 2) และ 3 ปัจจัย (k = 3) โดยที่ $a = (2^3)^{1/4} = 1.68$                                   | 31 |
| รูปที่ 2.13 | Face-centered central composite design ใน 3 ปัจจัย  | 32 |
| รูปที่ 2.14 | Three factor Box-Behnken design (code factor levels)  | 33 |
| รูปที่ 2.15 | Trilinear coordinate system ที่ใช้ใน Mixture design   | 34 |
| รูปที่ 2.16 | Simplex design  | 34 |
| รูปที่ 2.17 | Contour plot ที่ได้จากโปรแกรม STATISTICA  | 35 |
| รูปที่ 3.1  | ชุดควบคุมความดัน  | 38 |
| รูปที่ 3.2  | Hot air oven  | 38 |
| รูปที่ 3.3  | เครื่อง Texture Analysis  | 39 |
| รูปที่ 3.4  | เครื่องวัดสี  | 39 |
| รูปที่ 3.5  | Digital Refractometer   | 40 |
| รูปที่ 3.6  | Pycnometer ขนาด 25 ml   | 40 |
| รูปที่ 3.7  | ขั้นตอนการทดลองการทำแช่แข็งโดยวิธีใช้สุญญากาศระหว่างการแช่แข็งโดย ใช้ซูโครสไซรัป  | 41 |
| รูปที่ 3.8  | ขั้นตอนการทดลองการใช้สุญญากาศร่วมกับการใช้เคลือบมอลโดโรด์ก่อน การแช่แข็ง  | 42 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ญ

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.1  | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของปริมาตรของสารละลาย(X) กับ 1-Pt/Patm   | 46 |
| รูปที่ 4.2  | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสเมื่อถูกกด โดยเครื่อง Texture Analysis  | 47 |
| รูปที่ 4.3  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชี้นว่านหางจระเข้ หลังการใช้สุญญากาศ   | 49 |
| รูปที่ 4.4  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชี้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศ  | 50 |
| รูปที่ 4.5  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชี้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศ  | 51 |
| รูปที่ 4.6  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของชี้นว่านหางจระเข้ หลังการใช้สุญญากาศ  | 52 |
| รูปที่ 4.7  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส ของชี้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศ  | 53 |
| รูปที่ 4.8  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชี้นว่านหางจระเข้ สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่     | 56 |
| รูปที่ 4.9  | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชี้นว่านหางจระเข้ สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่ | 57 |
| รูปที่ 4.10 | แผนภาพคอนทัวร์แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชี้นว่านหางจระเข้ สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่         | 58 |
| รูปที่ 4.11 | แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของชี้นว่านหางจระเข้ สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่  | 59 |
| รูปที่ 4.12 | แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Average Firmness) สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่ | 60 |
| รูปที่ 5.1  | ฉนวนกันความร้อน Rock-wool ในท้องตลาดทั่วไป   | 65 |
| รูปที่ 5.2  | อุปกรณ์ในการแช่ชี้นว่านหางจระเข้ที่สุญญากาศ  | 66 |
| รูปที่ 5.3  | ประเภท Band Heater   | 67 |
| รูปที่ 5.4  | โมโนแกรมใช้หาขนาดของท่อประหยัด   | 72 |
| รูปที่ 5.5  | การหาค่าต่าง ๆ จากแผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน  | 77 |

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

|            |   |    |
|------------|---|----|
| รูปที่ 5.6 | กราฟแสดงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน  | 77 |
| รูปที่ ง.1 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ 1-Pt/Patm สำหรับวุ้นหางจรเข้ส่วน โคน  | 93 |
| รูปที่ ง.2 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ 1-Pt/Patm สำหรับวุ้นหางจรเข้ส่วน กลาง | 94 |
| รูปที่ ง.3 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ 1-Pt/Patm สำหรับวุ้นหางจรเข้ส่วน ปลาย | 95 |
| รูปที่ จ.1 | ค่าสัมประสิทธิ์ความเรียบของผนังท่อ สำหรับท่อที่ทำด้วยวัสดุชนิดต่างๆ                                 | 96 |
| รูปที่ จ.2 | ค่า k สำหรับอุปกรณ์ประกอบท่อ  | 96 |
| รูปที่ จ.3 | ค่า k สำหรับปากทางเข้าแบบต่างๆ  | 97 |
| รูปที่ จ.4 | ค่า k สำหรับปากทางเข้าและปากทางออกแบบต่างๆ  | 97 |



สารบัญตาราง

หน้าที่

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1 | สรรพคุณการรักษาโรคต่างๆ ของว่านหางจระเข้   | 7  |
| ตารางที่ 2.2 | ค่าของ coded level ใน Rota table design (2 ปัจจัย)   | 30 |
| ตารางที่ 2.3 | ค่าของ code level ใน Central composite design (2 ปัจจัย)   | 31 |
| ตารางที่ 2.4 | ค่าของ code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย)   | 32 |
| ตารางที่ 2.5 | Box-Behnken Design 3 ปัจจัย  | 33 |
| ตารางที่ 2.6 | Box-Behnken Design 4 ปัจจัย  | 34 |
| ตารางที่ 2.7 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ model ที่ใช้ใน RSM  | 36 |
| ตารางที่ 3.1 | แสดงแผนการทดลองการหาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้สูญญากาศก่อนการแช่<br>อิม สำหรับซูโครสไซรัป   | 44 |
| ตารางที่ 3.2 | แสดงแผนการทดลองการหาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้สูญญากาศก่อนการแช่<br>อิม สำหรับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์   | 45 |
| ตารางที่ ก.1 | ตารางบันทึกผลการทดลองปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water Loss) และปริมาณ<br>ของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain) โดยใช้ซูโครสไซรัป                        | 80 |
| ตารางที่ ก.2 | ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยใช้ซูโครสไซรัป  | 81 |
| ตารางที่ ก.3 | ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความสว่าง (L*) โดยใช้ซูโครสไซรัป   | 82 |
| ตารางที่ ก.4 | ตารางบันทึกผลการทดลองค่าเนื้อสัมผัส (Texture)  | 83 |
| ตารางที่ ข.1 | ตารางบันทึกผลการทดลองปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water Loss) และปริมาณ<br>ของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์                    | 84 |
| ตารางที่ ข.2 | ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์  | 85 |
| ตารางที่ ข.3 | ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความสว่าง (L*) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์   | 86 |
| ตารางที่ ข.4 | ตารางบันทึกผลการทดลองค่าเนื้อสัมผัส (Texture) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์  | 87 |
| ตารางที่ ค.1 | ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส<br>(Texture) สำหรับการใส่ซูโครสไซรัปโดยใช้โปรแกรม Texture Exponent 32      | 88 |
| ตารางที่ ค.2 | ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture) สำหรับ<br>การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้โปรแกรม Texture Exponent 32 | 90 |
| ตารางที่ ง.1 | ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนโคน  | 93 |
| ตารางที่ ง.2 | ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนกลาง   | 94 |
| ตารางที่ ง.3 | ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนปลาย   | 95 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ว่านหางจระเข้ หรือว่านไฟไหม้ เป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี ช่อและปล้องสั้น ใบเดี่ยว เรียงรอบต้น อวบน้ำมาก สีเขียวอ่อนหรือเขียวเข้ม ภายในมีวุ้นใสได้หิวสีเขียวมีน้ำยางสีเหลือง ดอกช่อออกจากซอกใบ ก้านดอกยาวมาก ดอกย่อยเป็นหลอดห้อยลง สีส้ม บานจากล่างขึ้นบน ในประเทศไทยเราพบเห็นว่านหางจระเข้เชื้อมีอยู่ทั่วไป และปลูกกันอย่างกว้างขวาง โดยที่พบปลูกมากที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ว่านหางจระเข้ที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิด *Aloe vera* Linn. var. *chinensis* (Haw) Berg. [1]

ความโดดเด่นที่รู้จักกันไปของว่านหางจระเข้ ก็คือ มีสารเคมีที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย โดยเฉพาะจากส่วนวุ้นใส ซึ่งประกอบด้วยสารสารออล็อคติน อโลอีโมคิน อโลซิน อโลอิน โกลโคโปรตีน และโพลีแซคคาไรด์ ที่มีฤทธิ์เร่งการจับตัวของเลือดและเร่งการเจริญเติบโตของเซลล์ร่างกาย และยังมีสารบราซิโคไนเนส ที่ช่วยดูดพิษเพื่อลดการอักเสบของบาดแผลได้ดียิ่ง มีสารอโลอีลซิน ช่วยยับยั้งการสังเคราะห์ฮีสตามีน และส่วนรากมีฤทธิ์บรรเทาอาการทางเดินปัสสาวะอักเสบ ยางสีเหลืองจากเปลือกมีสารแอนทราควิโนน ช่วยกระตุ้นการบีบตัวของลำไส้ ทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้เป็นปกติ วุ้นจากว่านหางจระเข้จะช่วยบำรุงร่างกาย บรรเทาความอ่อนเพลียเนื่องจากพักผ่อนน้อย รวมไปถึงการบำบัดแผลเรื้อรัง และแผลในกระเพาะอาหารได้เป็นอย่างดี สามารถช่วยให้กระบวนการเมตาโบลิซึม ให้ทำงานได้เป็นปกติ ลดการติดเชื้อ สลายพิษของเชื้อโรค กระตุ้นการเกิดใหม่ ของเนื้อเยื่อส่วนที่ชำรุด [1]

ปัจจุบันผู้บริโภคมีความตื่นตัวและให้ความสนใจต่อสุขภาพมากขึ้น จึงมีการนำว่านหางจระเข้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิด เช่น หั่นเป็นชิ้นบรรจุกระป๋อง หรือนำมาทำเป็นเครื่องดื่ม ซึ่งได้รับความนิยมมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ การนำเอาว่านหางจระเข้มาเชื่อมเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่า และยืดอายุการเก็บของว่านหางจระเข้ ทำให้ผู้บริโภคมีทางเลือกในการบริโภคมากขึ้น ทั้งยังส่งผลดีต่อสุขภาพด้วย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำมาใช้เพื่อผสมหรือรับประทานกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น โยเกิร์ต ไอศกรีม หรือนำมาอบแห้งต่อ เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เชื่อมอบแห้ง

การแปรรูปด้วยการเชื่อม อาศัยหลักการของการออสโมซิส โดยการแช่ผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่าผลไม้ นั้น สารออสโมติกที่ใช้ในการเชื่อมคือน้ำเชื่อม ระหว่างการเชื่อมน้ำจะถูกกำจัดออกจากชั้นของผลไม้ ในขณะที่เคียวกันการเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำตาลเข้าไปในชั้นของผลไม้ การเชื่อมทำให้  $a_w$  ของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ต้องการความร้อนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการฆ่าเชื้อ จึงมีผลดีต่อการคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการและคุณค่าด้านต่างๆ ที่มีถูกทำลายด้วยความร้อนสูง ซึ่งมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ยืนยันว่าการใช้ความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศก่อนการแช่แข็งจะทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำตาลเข้าสู่ผลไม้ได้เร็วขึ้น มีผลให้เพิ่มผลผลิต (yield) ช่วยให้ได้น้ำหนักผลิตภัณฑ์สูงขึ้น มีการสูญเสียให้น้ำน้อย มีการดูดซึมสารละลายออสโมติก (น้ำเชื่อม) มากขึ้น มีปริมาณเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า มีความใสมากกว่า ทำให้คุณารับประทานเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแช่แข็งที่บรรยากาศปกติ [2, 3, 4] ผลดีของการใช้สุญญากาศระหว่างการแช่แข็ง แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้และความเป็นรูปทรง ระหว่างโครงสร้างของผลไม้ นั้น ซึ่งการศึกษาผลของการใช้สุญญากาศในการทำแช่แข็งว่านหางจระเข้ ยังไม่มีผู้ใดศึกษามาก่อน

โครงการจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการใช้สุญญากาศ ระหว่างการทำแช่แข็งว่านหางจระเข้ กับ วิธีการทำแช่แข็งในบรรยากาศปกติ และเพื่อออกแบบอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการแช่แข็ง และประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบดังกล่าว เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง ซึ่งเป็นการพัฒนากระบวนการผลิตใหม่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาผลของการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็งว่านหางจระเข้ เปรียบเทียบกับวิธีการแช่แข็งในบรรยากาศปกติ
2. เพื่อออกแบบอุปกรณ์ โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง และประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบดังกล่าว เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม (เวลา ความดัน และความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก) ในการแช่แข็งว่านหางจระเข้โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการดำเนินการวิจัยเน้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สุญญากาศในการการทำแช่แข็งว่านหางจระเข้ วิเคราะห์ผลการศึกษาเพื่อนำไปออกแบบอุปกรณ์ โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่แข็ง และประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบดังกล่าว เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง แล้วสรุปผล

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เทคนิค กรรมวิธี และสภาวะการผลิตที่เหมาะสม ของการผลิตว่านหางจระเข้แช่แข็ง
- 2) ได้แบบอุปกรณ์ ที่พร้อมนำไปสร้างเครื่องในระดับอุตสาหกรรม
- 3) ได้ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณภาพ มีความแปลกใหม่ ทั้งยังสามารถเพิ่มมูลค่าของผลผลิต

ทางการเกษตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

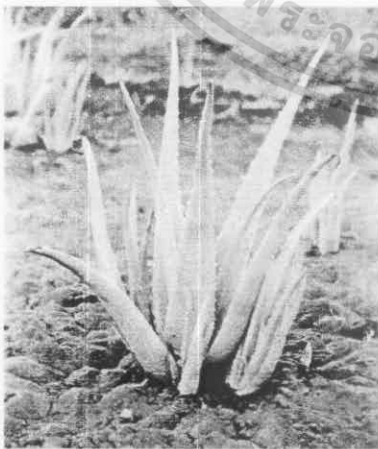
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับว่านหางจระเข้

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของว่านหางจระเข้ [5]

ว่านหางจระเข้มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า “*Aloe vera* Linn,“ เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ “*Liaceae*” หรือ “*Lily Family*” ใช้ชื่อเรียกกันต่าง ๆ เช่น ทางภาคเหนือ เรียกว่า ว่านไฟไหม้ ภาคกลาง เรียกว่า ว่านหางตะเข้ หรือ ว่านจระเข้ ส่วนชาวจีนเรียกว่า “น้ำเต็ก” ว่านหางจระเข้เป็นพืชพื้นเมืองของแอฟริกาใต้ เท็กซัส ฟลอริดา แอฟริกาเหนือและใต้ เอธิโอเปีย บราซิล มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และประเทศไทย

ลักษณะใบทั่วไปของว่านหางจระเข้ คือ ใบหนาประมาณ 1 นิ้ว ยาว 30 นิ้ว โคนใบใหญ่ ปลายใบแหลม มีหนามแหลมตามริมครีบบน ใบสีเขียว มีกระขาวอวบอ้วน ภายในมีวุ้นและเมือก โคนต้นพื้นดินเล็กน้อยก้านดอกแทงขึ้นจากกลางต้น เป็นก้านแข็ง สูงราว 2 ฟุต ดอกมีสีแดงอมเหลือง คล้าย ดอกชอนกลั่นตุมๆ

สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมปลูกได้เกือบทุกฤดู แต่ถ้ามีการชลประทานที่ดีน่าจะปลูกฤดูแล้งก่อนฤดูฝน เพราะถ้าปลูกฤดูฝน จะทำให้มีน้ำค้างตรงกาบใบ และเมื่อแดดออกจะทำให้ลวกกาบใบ กาบใบจะเน่าได้ ดินชอบดินปนทราย หรือดินร่วน แต่ต้องมีการระบายน้ำดี แสงแดดรำไรถึงปานกลาง [1]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) ว่านหางจระเข้พันธุ์ *Aloe vera* (ข) ว่านหางจระเข้พันธุ์ *Aloe barbadensis* Mill.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกว่านหางจระเข้ เพื่อใช้ใบซึ่งมีปริมาณน้ำเมือกจะต้องปลูกใกล้ริมทะเลว่านหางจระเข้ที่รู้จักกันดีมี 2 พันธุ์ คือ *Aloe vera* และ *Aloe barbadensis* ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีลักษณะ ใบคล้ายกริชสีเทาเขียว ใบแก่ ๆ จะมีสีเขียวจัด ความยาวประมาณ 24-30 นิ้ว แต่ละใบมีหนามอยู่ขอบใบ การขยายพันธุ์ใช้วิธีแยกหน่อ และนำไปวางลงในที่ปลูก อย่ากดทับให้ดินแน่นเกินไป การปลูกควรจะให้ดินไหลเล็กน้อย เพื่อความสะดวกในการแตกหน่อได้เร็วขึ้น ในประเทศไทยเราพบเห็นว่านหางจระเข้อยู่ทั่วไป และปลูกกันอย่างกว้างขวาง ว่านหางจระเข้ที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิด *Aloe vera* Lin. var. *chinensis* (Haw) Berg. โดยที่พบปลูกมากที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ [1]

ส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์ คือ น้ำเมือกหรือวุ้นจากใบ และน้ำยางหรือกาวย ซึ่งมียาลักษณะเหลวสีเหลืองเข้มเรียก Aloin การปลูกว่านหางจระเข้ได้ทำกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในหมู่บ้าน Rio Grande ทางตอนใต้ของรัฐเท็กซัสในสหรัฐอเมริกา เริ่มปลูกกันในสวนหลังบ้าน เป็นระบบครอบครัว ต่อมาได้ขยายพันธุ์เพิ่มเนื่องที่การปลูกมากขึ้นเรื่อยๆ จาก 500-600 เอเคอร์ หรือ 1250 ไร่ ขยายขึ้นเป็น 4000 เอเคอร์ เนื่องจากมีสภาพดินฟ้าอากาศเหมาะสม พื้นที่ส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 ของหมู่บ้านนี้ จึงปลูก *Aloe vera* มาก และจากการสำรวจการเก็บเกี่ยวใบของว่านหางจระเข้จะได้ประมาณ 23-36 ปอนด์/ต้น หรือ 10.43-16.33 kg/ต้น รวมแล้วผลผลิตจากคั้นที่นับว่าได้ผลดีจะประมาณ 70000-87000 ปอนด์/ปี หรือ 31.75 – 39.46 ton/ปี นับว่าสามารถนำสารจากใบ *Aloe vera* มาวิจัยและใช้ประโยชน์ทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากที่สุดในประเทศญี่ปุ่นก็เช่นกัน นักวิจัยได้ทำการทดลองเกี่ยวกับพืช ว่านหางจระเข้และยังได้จดทะเบียนสิทธิบัตรเกี่ยวกับนำสาร Aloin ใบใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง และในทางการแพทย์ เช่น ใช้ประโยชน์ในการสมานแผลรักษาแผลสดอันเกิดจากไฟไหม้ ฉ่าเบคทีเรียทำให้แผลไม่เน่าเปื่อยลุกลามมากขึ้น [5]

ซึ่งการวิจัยเรื่องนี้ ทางประเทศไทยได้เคยนำมาทดลองใช้กับคนไข้ในโรงพยาบาลวังน้ำเย็น จังหวัดปราจีนบุรี ปรากฏว่า สามารถรักษาแผลเน่าเปื่อยให้แห้งและไม่ถูกลุกลามมากขึ้น นายแพทย์แผนปัจจุบันต่างก็แปลกใจ ในคุณสมบัติของว่านหางจระเข้ เพราะใช้ประโยชน์ได้คืออย่างหนึ่ง ในวงการแพทย์ และมีราคาถูก ทั้งหมดนี้เราจะพบว่าว่านหางจระเข้พืชสมุนไพรมหัศจรรย์นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย ซึ่งรวบรวมพอสังเขป ได้ดังนี้

1. ใช้เป็นยา บรรเทาอาการปวดศีรษะ
2. ใช้เป็นยาระบาย
3. ใช้แก้การถูกไฟไหม้ แผลพุพอง แผลงมีพิษกัดต่อย
4. แก้หนองใน
5. เป็นส่วนผสมของแชมพูโปรตีน ช่วยปรับสภาพเส้นผมให้อ่อนนุ่ม สลวย
6. เครื่องดื่มว่านหางจระเข้ใช้บริโภค มีคุณค่าบำรุงร่างกาย เป็นส่วนผสมใน เครื่องดื่มลดความอ้วน
7. เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องสำอาง บำรุงผิวทุกส่วนของร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่า ว่านหางจระเข้ เป็นว่านสมุนไพรธรรมชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างมาก ผู้สนใจต่างๆ รวมทั้งแพทย์แผนปัจจุบันในหลายประเทศได้ให้ความสนใจนำไปศึกษาค้นคว้าและสามารถนำสารประกอบที่มีอยู่ในว่านหางจระเข้ มาใช้ประโยชน์ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด แต่เป็นที่น่าเสียดายอย่างยิ่งที่ประเทศไทยมีว่านหางจระเข้แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ให้แพร่หลายกว้างขวางเท่าที่ควร [5]

### 2.1.2 พันธุ์ว่านหางจระเข้ [1]

พันธุ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่สีเขียว คือ *Aloe barbadensis* Mill สำหรับพันธุ์พื้นบ้านที่พบได้ทั่วไป ใบมีขนาดเล็กสีเขียวอ่อนลายกระสีขาว คือ *Aloe indica* Royle

### 2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของว่านหางจระเข้ [6]

สถาบันวิจัยเกี่ยวกับว่านหางจระเข้ (Aloe Vera Research Institute) ที่เมืองไซเพรส (Cypress) รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐฯ ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์พบว่า

- ว่านหางจระเข้ประกอบด้วยกรดอะมิโนเรียงตามตัวอักษรดังนี้ Alanin, Arginin, Asparaginacid, Glutaminacid, Serin, Glyzin, Histidin, Lysin, Methionin, Plolin, Tyrosin
- เกลือแร่ (Mineral) อีก 7 ชนิด คือ Iron, Calcium, Calcium Carbonate, Magnesium, Manganese, Sodium, Zinc
- นอกจากนี้ ว่านหางจระเข้ยังอุดมด้วยวิตามิน A, B1, B2, B6, B12, C, E และ Chlorine

ดร.โซเอคะ โมโมเอะ ผู้เชี่ยวชาญด้านปฏิกิริยาของสารที่มีชื่อเสียงของญี่ปุ่น ได้วิจัยว่านหางจระเข้ เมื่อ พ.ศ.2540 โดยนำสารละลายของว่านหางจระเข้มากรอง แล้วนำไปแช่แข็ง จากนั้นจึงสกัดเป็นผงแล้วสกัดอีกครั้งด้วยน้ำและแอลกอฮอล์แล้วตรวจวัดทันที พบสารตกตะกอนหลายชนิด เดิมทราบแต่เพียงว่าว่านหางจระเข้มีสารสองชนิด คือ สารอโลอิน และสารอะโลโอะโมดิน แต่ดร.โซเอคะ ได้ค้นพบสารใหม่ที่ออกฤทธิ์เป็นยาอีก 3 ชนิด คือ

1. อะโลติน มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคและเชื้อรา
2. อะโลมิน มีฤทธิ์ยับยั้งการเติบโตของเนื้องอก
3. อโลจอร์จีน มีฤทธิ์ช่วยสมานแผล

ด้วยองค์ประกอบสำคัญดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ว่านหางจระเข้จึงมีคุณประโยชน์สำคัญในการบรรเทาโรคต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรรพคุณการรักษาโรคต่างๆ ของว่านหางจระเข้ [6]

| โรค และอาการ                              | สรรพคุณ   |
|---|---|
| 1. โรคกระเพาะอาหาร                        | ใช้เป็นยารักษาโรคกระเพาะอาหารได้ดี ช่วยปรับการทำงานของกระเพาะอาหารและลำไส้                                |
| 2. โรคแผลในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กตอนต้น | ช่วยในการสมานแผล ใช้รักษาแผลในอวัยวะย่อยอาหาร   |
| 3. ท้องผูก                                | บางสีเหลืองที่ผิวใบมีสารอโลอิน กับสารอโลอินิน ซึ่งมีฤทธิ์เป็นยาระบาย                                      |
| 4. ความดันโลหิตสูง                        | ช่วยให้หลอดเลือดอ่อนนุ่ม และช่วยกระตุ้นการไหลเวียนของโลหิต  |
| 5. ความดันโลหิตต่ำ                        | ช่วยกระตุ้นการไหลเวียนของโลหิต ทำให้กระบวนการเผาผลาญอาหารในร่างกายดำเนินไปด้วยดี                          |
| 6. ไข้หวัด                                | ระงับการขยายตัวของไวรัสซึ่งเป็นสาเหตุของไข้หวัด   |
| 7. หอบหืด                                 | ช่วยขจัดคันแสบของการแพ้ (ต้องใช้ต่อเนื่องเป็นเวลา 1-2 เดือน จึงจะเห็นผล)                                  |
| 8. เมลาหวน                                | ช่วยกระตุ้นการเผาผลาญอาหาร ใช้เป็นยารักษาควบคู่ไปกับยาแผนปัจจุบันจะช่วยให้ยาออกฤทธิ์ได้ผลดีขึ้น           |
| 9. โรคตับอักเสบ                           | ช่วยสลายพิษในร่างกายได้ จึงช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพการทำงานของตับได้ดี  |
| 10. เมารถ – เมารถ                         | ช่วยระงับประสาท ขจัดอาการอ่อนเพลีย ช่วยบรรเทาอาการเมารถเมารถได้ดี   |
| 11. ริดสีดวงทวาร                          | ใช้เป็นยาระบาย แก้อาการท้องผูก บรรเทาอาการปวด ใช้ทาหัวริดสีดวงจะ ได้ผลดี                                  |
| 12. แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก                  | ช่วยฆ่าเชื้อ ป้องกันอาการอักเสบและการติดเชื้อแทรกซ้อนได้ และยังกระตุ้นให้ผิวหนังกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เร็ว |
| 13. อ่อนกงฟูต                             | ช่วยทำลาย และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรค บรรเทาอาการปวดและคันได้                                     |
| 14. ตาปลา                                 | ช่วยให้ผิวหนังที่หยาบกร้านอ่อนนุ่มขึ้น และกำจัดตาปลาได้   |

|                        |   |
|------------------------|---|
| 15. ปวดฟันและโรคเหงือก | ใช้แก๊อักษบ ป้องกันความเจ็บปวดเย็บปล้น ลดอาการปวดฟัน เนื่องจากฟันผุเป็นการชั่วคราว                  |
| 16. ช่องปากอักเสบ      | ว่านหางจระเข้สามารถฆ่าเชื้อ โรคประเภท Streptococcus และเชื้อโรคอื่นๆ ได้ทำให้อาการอักเสบหายเร็วขึ้น |

## 2.2 หลักการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก (Osmotic Dehydration) [7]

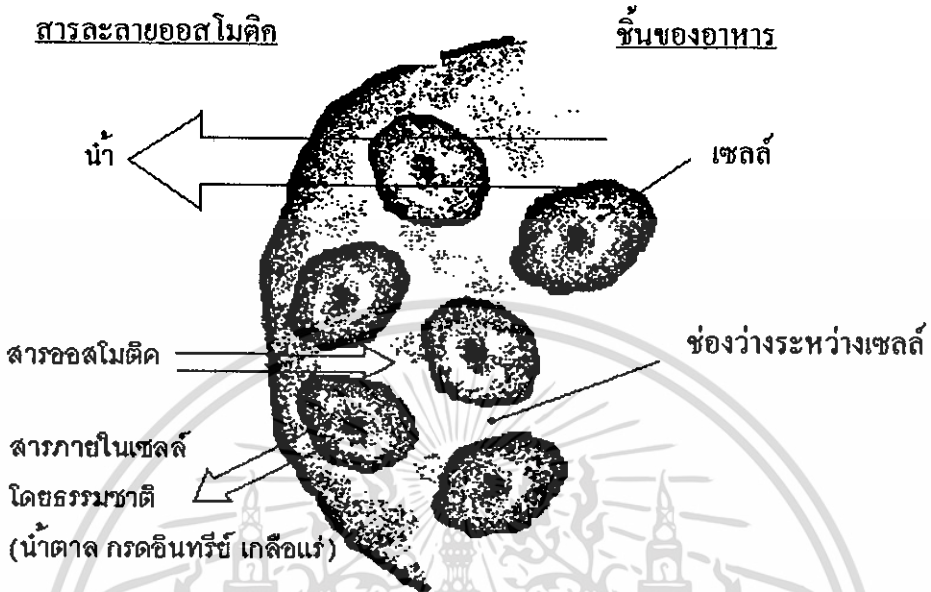
การดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก คือวิธีการที่ใช้ในการถนอมอาหารวิธีหนึ่งโดยอาศัยหลักการของการออสโมซิส หมายถึง การกำจัดน้ำออกจากอาหารโดยการแช่ในสารละลายออสโมติกซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือมีค่า  $a_w$  (Water activity) ต่ำกว่าอาหารสารที่นำมาใช้ทำสารละลายนี้เรียกว่า สารออสโมติก (Osmotic agent) อาทิเช่น น้ำตาล, เกลือ, Sorbitol และ Glycerol เป็นต้น

สารออสโมติก คือสารที่ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างชั้นของอาหารและสารละลายออสโมติก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงขับ (Driving force) เป็นแรงที่นำไปใช้ในการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการออสโมซิส สามารถอธิบายได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- 1) น้ำจะซึมออกจากเซลล์อาหาร โดยผ่านผนังเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็น semi permeable membrane สู่อารละลายออสโมติก
- 2) สารออสโมติก (Osmotic agent) เช่น น้ำตาลจะซึมจากสารละลายออสโมติกสู่ภายในเซลล์ของอาหาร
- 3) สารบางอย่างซึ่งมีอยู่ภายในเซลล์โดยธรรมชาติ เช่น น้ำตาล, กรดอินทรีย์ หรือ เกลือแร่ จะซึมผ่านออกนอกผนังเซลล์ของอาหารสู่อารละลายออสโมติก
- 4) กระบวนการทั้งหมดนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งเกิดความสมดุลระหว่างแรงดันออสโมติกในชั้นอาหารและสารละลายออสโมติก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

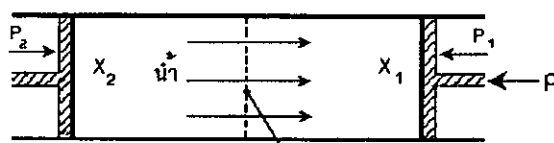
ในการถ่ายเทมวลสารของกระบวนการออสโมซิส โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นต่ำในเซลล์อาหาร จะเป็นโมเลกุลที่มีพลังงานอิสระสูงกว่าโมเลกุลของน้ำในสารละลายออสโมติก ในขณะที่โมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกก็มีพลังงานอิสระสูงกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายจากสารละลายเจือจางในเซลล์อาหารเช่นกัน โมเลกุลที่มีพลังงานอิสระสูงทั้งสองโมเลกุลนี้จะเกิดความไม่เสถียรภายในตัว จึงเปลี่ยนสภาพไปเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียรโดยการพยายามลดพลังงานภายในให้ต่ำลง ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติก เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันออสโมติส (Osmosis pressure) ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้เกิดแรงขับ (Driving force) ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในข้างต้น ทั้งนี้เพื่อที่จะกำจัดพลังงานอิสระ

ทั้งหมดในกระบวนการนั่นเอง ซึ่งถ้าหากแรงดันออสโมซิสที่เกิดขึ้นนี้มีค่ามากจะทำให้อัตราการออสโมซิสสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทมวลสารระหว่างมวลสารภายในเซลล์อาหารและสารละลายออสโมติก [7]

โดยกระบวนการออสโมซิส เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติ เช่น กระบวนการออสโมซิสในพืช น้ำในดินจะซึมผ่านเยื่อผนังเซลล์รากของพืชเพื่อหล่อเลี้ยงลำต้นและใบ เป็นต้น แต่เมื่อใดที่แรงดันในสารละลายออสโมติกมีค่ามากกว่าแรงดันออสโมซิส โมเลกุลของน้ำก็จะไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติ นั่นคือต้องเพิ่มแรงดันจากภายนอกช่วยเสริมให้แก่สารละลายออสโมติก และแรงดันนั้นจะต้องเพิ่มมากกว่าเพื่อเอาชนะแรงดันออสโมซิส ซึ่งกระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารได้เช่นกัน อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์น้ำดื่ม RO ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้เข้มข้นซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ เป็นต้น



semipermeable membrane

รูปที่ 2.3 โมเดลของกระบวนการออสโมซิส [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : สัญลักษณ์

$X_1$  คือ สายละลายที่ 1

$X_2$  คือ สายละลายที่ 2

$P_1$  คือ partial pressure ของน้ำในสารละลาย  $X_1$

$P_2$  คือ partial pressure ของน้ำในสารละลาย  $X_2$

$P$  คือ แรงดันที่จะต้องใช้ดันสารละลาย  $X_1$  เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลระหว่างแรงดันของสารละลายทั้งสอง

จากรูปที่ 2.3 โมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนตัวจากบริเวณที่มี partial pressure สูง ไปสู่บริเวณที่มีค่านี้ต่ำกว่า ซึ่งสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจะมี partial pressure ของน้ำสูง และถ้าให้  $X_1$  เป็นสารละลายความเข้มข้นสูง และ  $X_2$  เป็นสารละลายความเข้มข้นต่ำ นั่นคือน้ำจะเคลื่อนตัวจากสารละลายที่ 2 ไปสู่สารละลายที่ 1 ซึ่งมี partial pressure ต่ำกว่านั่นเอง โดยเคลื่อนตัวผ่าน semi permeable membrane ดังรูป แรงดัน  $P$  (atm) เป็นแรงดันที่จะต้องใช้ดันสารละลายที่ 1 เพื่อให้เกิดภาวะสมดุลระหว่างแรงดันของสารละลายทั้งสอง นั่นคือไม่เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างกัน โดยแรงดัน  $P$  มีค่าเป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$P = \frac{RT}{V} \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ (atm)} \quad (2.1)$$

$R$  = gas constant ( $82.0 \text{ cm}^3 \text{ atm K mole}^{-1}$ )

$T$  = absolute pressure (K)

$V$  = partial molar volume ของน้ำ ( $\text{cm}^3 \text{ mole}^{-1}$ )

$P_1$  = partial pressure ของน้ำในสารละลายที่ 1 (atm)

$P_2$  = partial pressure ของน้ำในสารละลายที่ 2 (atm)

ค่า  $P$  นี้อาจเรียกว่า Diffusion pressure deficit หรือ suction force เมื่อ  $P$  มีค่าเป็นบวก แสดงว่าต้องใช้แรงดันในด้านที่มีสารละลายที่ 1 ถ้ามีค่าเป็นลบแสดงว่าต้องใช้ในด้านตรงข้าม คือในสารละลายที่ 2 [8]

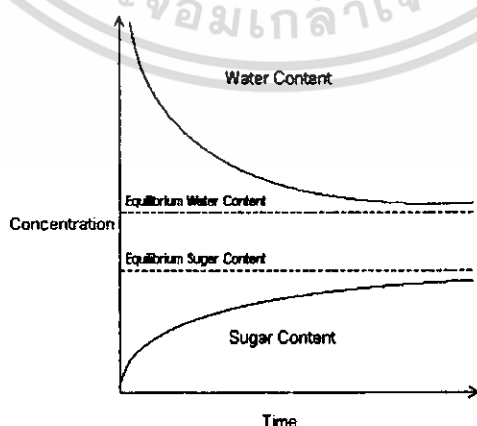
สำหรับวัตถุดิบที่นิยมนำมาคั้นน้ำออกแบบออสโมติกนั้นมักเป็นอาหารประเภทที่เสื่อมเสียได้ง่าย (Perishable) เช่น ผัก ผลไม้ ที่มีน้ำ แปร น้ำตาลและสารอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบภายในค่อนข้างสูงซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ในกระบวนการทำแห้งสารต่าง ๆ เหล่านี้จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารละลายเจือจางภายในเซลล์โดยที่เปลือกหรือผิวหนังของวัตถุดิบจะทำ

หน้าที่เป็น semi permeable membrane ที่มีประสิทธิภาพ นั่นคือมันจะยอมให้น้ำซึมผ่านมากกว่า สารออสโมติก กล่าวคือน้ำที่อยู่ภายในเซลล์อาหารจะซึมแพร่ผ่านผนังเซลล์ออกมายังสารละลาย ออสโมติกได้ง่ายกว่า ด้วยอัตราการซึมผ่านจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ภายหลังจากนั้นจะ ลดลง ขณะเดียวกันสารออสโมติกจากสารละลายก็จะซึมแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์เช่นกัน ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายภายในเซลล์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์จะช้า กว่าอัตราการซึมผ่านออกจากผนังเซลล์ของน้ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4

ดังนั้นจึงทำให้สารออสโมติกที่ซึมแพร่เข้าไปส่วนใหญ่จับอยู่เฉพาะบริเวณขอบของชิ้น อาหาร นั่นคือหากใช้ชูโครสไซรัปเป็นสารละลายออสโมติก ผลไม้ซึ่งนำมาแช่ไว้เป็นระยะเวลา ไม่นานน้ำหนักภายในเซลล์ผลไม้จะซึมออกได้มากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลซึ่งจะซึมเข้าไปได้เฉพาะ บริเวณขอบ ๆ และส่วนใหญ่จะอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ของอาหาร ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการทำ แห้งผักผลไม้ด้วยวิธีออสโมติกนี้เป็นการทำให้ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์เนื่องจาก น้ำตาลซึมเข้าไปและปริมาณน้ำลดลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำซึ่งทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงและ สามารถลดลงได้ถึงร้อยละ 50-60 ของน้ำหนักวัตถุดิบที่นำมาทำแห้ง

ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในการคั่งน้ำออกด้วยซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ฉะนั้นผักผลไม้ที่ผ่านกระบวนการคั่งน้ำออกแบบออสโมติกนี้จึงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน เพราะมีแรงดันออสโมติกของน้ำตาลสูงและค่า  $a_w$  (Water activity) ต่ำ ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสม ต่อการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ของเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะเชื้อยีสต์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผัก ผลไม้เน่าเสีย

ปิยวรรณและคณะ [9] ได้กล่าวว่ามีผักผลไม้ 2 ชนิดที่ไม่สามารถนำมาคั่งน้ำออกด้วยวิธีนี้ได้ ชนิดแรกได้แก่ ผักผลไม้ที่มีปริมาณน้ำภายในโครงสร้างเซลล์น้อย อาทิเช่น หอม และกระเทียม และอีกชนิดได้แก่ผักผลไม้ที่มีปริมาณน้ำภายในโครงสร้างเซลล์มากแต่มีองค์ประกอบของพวกแป้ง หรือน้ำตาลน้อย เช่น แดงโม



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและน้ำตาลระหว่างการคั่งน้ำออก

จากผลไม้แบบออสโมติก [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ชนิดของการดึงน้ำออกแบบออสโมติก [7]

ชนิดของการดึงน้ำออกแบบออสโมติกแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ตามตัวกลางที่ใช้ในการออสโมติก (Osmotic medium) คือ ระบบแห้ง (Dry system) และระบบสารละลาย (Solution system) [9]

### 2.3.1 การออสโมติกโดยระบบแห้ง [7]

การออสโมติกโดยระบบแห้ง คือการกำจัดน้ำออกจากชิ้นของผลไม้โดยการออสโมซิสใน osmotic medium ที่แห้ง ได้แก่ น้ำตาลทรายซึ่งเป็นตัวกลางออสโมติกที่นิยมใช้กัน โดยการโรยสลับเป็นชั้น ๆ กับชิ้นผลไม้จนได้ความหนาประมาณ 1 นิ้ว ด้วยอัตราส่วนต่อชิ้นผลไม้ประมาณ 1 : 1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่ 50 องศาเซลเซียสหรือ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง น้ำหนักชิ้นผลไม้จะลดลงได้ถึงร้อยละ 50 ตัวกลางออสโมติกที่แห้งนี้จะละลายกับน้ำที่ถูกขับออกมาจากชิ้นผลไม้ (exosmosis) วิธีการออสโมติกแบบนี้จะมีอัตราการออสโมซิสช้ากว่าระบบสารละลาย และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะของคุณภาพเนื้อสัมผัสไม่ดีนักเพราะถูกผลึกของตัวกลางออสโมติกตกลงไปที่ผิวหน้าทำให้ข้างจึงไม่เป็นที่นิยม การออสโมติกด้วยวิธีนี้ได้แก่ แบบ Static treatment แบบ Tumbling and mixing และแบบ Fluidized bed

1) Static treatment เป็นวิธีที่ไม่มีการคนชิ้นของผลไม้แต่อย่างใดจึงมีการแตกช้ำน้อยกว่าวิธีอื่น แต่บริเวณผิวหน้าโดยเฉพาะผลไม้ชนิดที่มีเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม เช่น กุ้ง ก็จะทำให้เสียหายไปบ้าง มีวิธีการทำคือหลังจากการออสโมติกชิ้นผลไม้จนได้น้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 50 แล้วจะแยกชิ้นผลไม้ออกจากตัวกลางออสโมติก ที่เคลือบผิวออกโดยจุ่มลงในน้ำสะอาดหรืออาจจะไม่ล้างออกก็ได้ แล้วจึงนำไปทำแห้งด้วยวิธีอื่นต่อไป

2) Tumbling and mixing เป็นวิธีที่อาศัยการคนหรือการคลุกเคล้าผลไม้กับตัวกลางออสโมติกในระหว่างการออสโมติก อัตราการออสโมซิสจะเพิ่มขึ้นจากวิธีแรกเพราะมีการคนหรือทำให้ชิ้นส่วนผลไม้เคลื่อนไหวในตัวกลางออสโมติก น้ำที่ถูกกำจัดออกจากชิ้นผลไม้บริเวณผิวหน้าจะทำให้ความเข้มข้นของตัวกลางออสโมติกลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากมีน้ำเข้าไปทำละลายจึงทำให้อัตราการออสโมซิสช้าลง ดังนั้นการคนหรือการเคลื่อนไหวชิ้นผลไม้จึงเป็นการกระจายความเข้มข้นภายนอกชิ้นผลไม้ช่วยให้อัตราการออสโมซิสเร็วขึ้น การคนจำเป็นต้องทำอย่างเบา ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นผลไม้ชำและแตกหักได้ วิธีการนี้มีประโยชน์มากสามารถไล่ความชื้นออกจากชิ้นผลไม้ที่ต้องการในระยะเวลาสั้น ๆ ได้หากใช้อุณหภูมิในการคนสูง

3) Fluidized bed เป็นวิธีที่ใช้อากาศร้อนแบบ Fluidized bed เข้าร่วมด้วย โดยนำชิ้นผลไม้คลุกเคล้ากับตัวกลางออสโมติกอย่างเดียวหรือตัวกลางออสโมติกที่ผสมกับสารอื่นก็ได้ อาทิเช่น แป้ง วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนักแต่มีผลดีเนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้นและสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง แต่ก็มีข้อเสียคือการจับตัวแข็งของตัวกลางออสโมติก บริเวณขอบของชิ้นผลไม้ สาเหตุเกิดจากมีอัตราการออสโมซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างการทำแห้งในตอนแรก น้ำที่ถูกขับออกจากชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลไม้มักจะทำให้โมเลกุลของตัวกลางออสโมติกเคลื่อนที่เข้าไปในผิวหน้าชั้นผลไม้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นกันจนน้ำไม่สามารถซึมออกมาได้ทัน จึงเกิดการจับตัวแข็งของตัวกลางออสโมติกบริเวณขอบของชั้นผลไม้มัน ซึ่งมีวิธีแก้ไขคือใช้ส่วนผสมของตัวกลางออสโมติกที่เหมาะสมร่วมกับการเค็มแป้งลงไปผสมเล็กน้อย น้ำที่ถูกขับออกจากชั้นของผลไม้มันจะจับตัวกับแป้งเมื่อได้รับความร้อนจากลมร้อนจะเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่มีความหนืด ซึ่งจะหน่วงเหนี่ยวและสกัดกั้นโมเลกุลของตัวกลางออสโมติกให้เคลื่อนที่เข้าไปในชั้นผลไม้มันได้ช้าลงจึงเป็นการทำให้อัตราการออสโมซิสช้าลง

### 2.3.2 การออสโมซิสโดยระบบสารละลาย [7]

การออสโมติกโดยระบบสารละลาย คือการใช้ตัวกลางออสโมติกเป็นสารละลาย ระบบสารละลายนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ระบบแห้ง และสะดวกในการที่จะนำสารละลายออสโมติกกลับมาใช้ใหม่จึงช่วยประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่าย ความเข้มข้นของสารละลายที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 50-70 องศาบริกซ์ หากใช้สารละลายเป็นซูโครสไซรัปที่มีความเข้มข้นสูงเกินกว่า 67 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นจุดอิ่มตัวของน้ำตาลซูโครสควรใช้น้ำตาลอินเวิร์ทร่วมด้วย เพราะจะช่วยให้ความสามารถในการละลายของน้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทรายมีมากขึ้น วิธีการออสโมติกโดยระบบนี้มีหลายวิธี ได้แก่ แบบ Static method แบบ Mechanical-agitated และแบบ Reconciliation of syrup

1) Static method เป็นวิธีที่สะดวกที่สุดชั้นผลไม้มันจะแช่อยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงในเวลาสั้นหรือความเข้มข้นต่ำแต่ใช้เวลานาน อาจเก็บที่อุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือเก็บที่อุณหภูมิห้องก็ได้จนกว่าน้ำหนักของผลไม้มันจะลดลงไปประมาณร้อยละ 50 แล้วนำขึ้นมาล้างน้ำหรือไม้อ่างก็ได้ก่อนการนำไปตากแห้งด้วยวิธีอื่นต่อไป

2) Mechanical-agitated เป็นวิธีที่มีการหมุนเวียนตัวกลางออสโมติกทำให้อัตราการออสโมซิสเร็วขึ้นกว่าวิธีแรก การใช้สารละลายจะช่วยให้ชั้นผลไม้มันไม่บอบช้ำมาก แต่ก็ควรทำอย่างช้า ๆ และเบา ๆ เพื่อป้องกันโครงสร้างของเซลล์ผลไม้มันถูกทำลาย วิธีที่สะดวกและมีประสิทธิภาพ คือการใช้ปั๊มให้สารละลายหมุนเวียนอยู่ในภาชนะที่ใส่ผลไม้มัน

3) Reconciliation of syrup เป็นวิธีที่รักษาความเข้มข้นของตัวกลางออสโมติกให้คงที่อยู่ตลอดเวลาเพื่อให้อัตราการออสโมซิสคงที่ โดยการปั๊มสารละลายบางส่วนในระหว่างการออสโมติกเข้าไปในเครื่องระเหยแบบความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure evaporator) ซึ่งเป็นตัวระเหยน้ำที่ถูกขับออกจากผลไม้มัน แล้วปั๊มสารละลายที่ได้ใหม่นี้กลับลงภาชนะที่ทำการออสโมติกอีกครั้ง การใช้เครื่องระเหย (Evaporator) จะใช้พลังงานเพียงร้อยละ 25 ในการระเหยน้ำออกจากสารละลาย เมื่อเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการทำแห้งด้วยลมร้อน (hot air dehydration) การที่ความเข้มข้นของสารละลายคงที่เช่นนี้จึงสามารถใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำได้ เช่น 50 องศาบริกซ์ ในกรณีที่ต้องการให้การออสโมซิสมีอัตราเร็วโดยไม่ใช้วิธีนี้จำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นของสารละลายสูงเพราะในระหว่างการออสโมติกความเข้มข้นของสารละลายจะลดลงเรื่อย ๆ พบว่าอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออสโมซิส โดยวิธีนี้เกือบจะเร็วเท่ากับการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ในการออสโมติกแต่การใช้สารละลายเจือจางจะสะดวกต่อการทำงานของปั๊มเนื่องจากมีความหนืดต่ำและเป็นการประหยัดในด้านของค่าใช้จ่ายในการเตรียมสารละลายด้วย

## 2.4 หลักการการใช้สุญญากาศ (Vacuum Impregnation) [11]

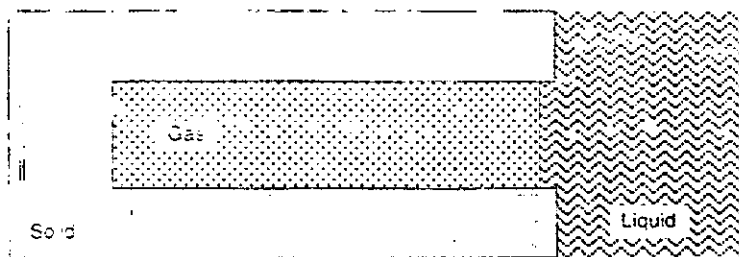
เทคโนโลยีการใช้สุญญากาศ หรือที่เรียกกันว่า “Vacuum Infusion” หรือ “Vacuum Impregnation” (VI) เป็นการวิเคราะห์และใช้เป็นกระบวนการทดลองทำการปฏิบัติสำหรับผัก และผลไม้ เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพ โดยมีสิ่งที่จะใช้ร่วมในการทดลอง เช่น กรด, Preservatives, Water activity depressor, หรือ Firming agent ในโครงสร้างของผักและผลไม้ เทคโนโลยี Vacuum Infusion เป็นพื้นฐานของ Hydrodynamic mass transfer ซึ่งทำโดยการเปลี่ยนแปลงความดัน และเป็นการใช้สารละลายให้ซึมซาบเข้าไปในส่วนประกอบโครงสร้างของผักและผลไม้ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ก่อนที่จะทำการเก็บรักษาไว้ที่ความดันปกติ ซึ่งทำให้ดูดก๊าซที่อยู่ในช่องว่างภายในผักและผลไม้ ทำให้เกิดการแทนที่โดยการซึมซาบของสารละลายเข้าไป ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว การปฏิบัติและการทดลองโดยทั่วไปสามารถที่จะดัดแปลงเพื่อที่จะให้ได้ผลดีในการซึมซาบของสารละลายเข้าไปในผักและผลไม้ได้ ทั้งสามารถทำกับผักผลไม้ได้ทั้งผล และ ได้ทั้งแบบเป็นชิ้นก็ได้ จากรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงการทำงานของใช้เทคโนโลยีการใช้สุญญากาศ

ผลที่ได้รับจากการปฏิบัติโดยใช้วิธีนี้จะช่วยลดปริมาณการเน่าเสียของผัก และผลไม้ให้น้อยลงได้ จึงเป็นวิธีการแปรรูปและวิธีถนอมหรือรักษาพืชผักผลไม้ที่ดีในรูปลักษณะต่างๆกัน เช่น แห้งเย็น แห้งแข็ง หรืออบแห้ง ผลกระทบที่ได้รับในเชิงคุณภาพ เช่น เนื้อสัมผัส สี รสชาติ หรือกลิ่นของผักผลไม้

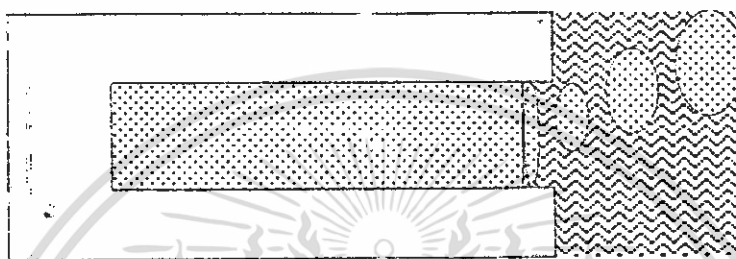
## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงน้ำออกแบบออสโมติกและใช้สุญญากาศระหว่างการทำแช่อิ่ม [7]

### 2.5.1 ชนิดของผลไม้ พันธุ์ และความสุก

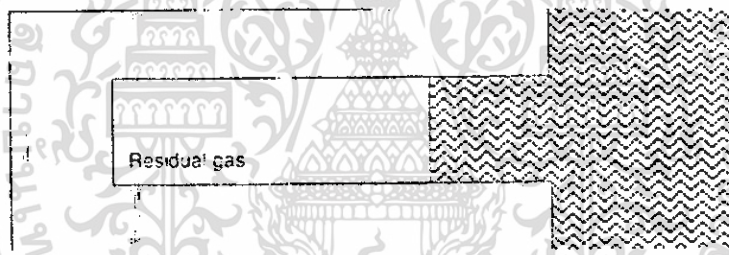
ชนิดของผลไม้มีผลต่ออัตราเร็วของการซึมของน้ำออกจากเซลล์ผลไม้ ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของผนังเซลล์และเนื้อเยื่อของเซลล์ พันธุ์และความแก่อ่อนของผลไม้ก็มีผลต่ออัตราการออสโมซิสด้วย วนิดาและปราณี, 2544 [12] พบว่า ฟักทองอ่อนจะมีอัตราการออสโมซิสสูงกว่าฟักทองแก่ เนื่องจากฟักทองอ่อนมีปริมาณน้ำอยู่สูงเมื่อแช่ลงในสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ระหว่างภายในเซลล์ของฟักทองกับสารละลายภายนอกสูงกว่าฟักทองแก่



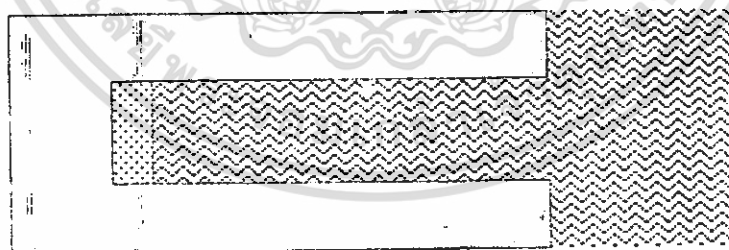
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนหลักที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแพร่ในสุญญากาศของความพรุนของอาหาร (ผลไม้) ที่แช่อยู่ในของเหลวเป็นสถานการณ์ของรูพรุนในอุดมคติ (ก) ผลของ Capillary ภายใต้ความดันปกติ (ข) สถานะที่เกิดการไล่แก๊สออก (ค) ผลของ Capillary ภายใต้ความดันที่ลดลง (ง) กลไกชลพลศาสตร์ที่สถานะปกติ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 รูปร่างและขนาดของผลไม้

รูปร่างและขนาดของผลไม้มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร ถ้าอัตราส่วนนี้สูง จะทำให้น้ำซึมออกจากเซลล์ของผลไม้เร็วขึ้น เพราะว่า สารละลายสามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวได้มากขึ้น ทำให้ สารออสโมติก สามารถดึงน้ำออกจากชั้นผลไม้ได้มาก ดังนั้น ผลไม้ถ้าเป็นชิ้นใหญ่หรือมีรูปร่างกลม น้ำจะซึมออกได้น้อย เพราะว่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าน้อย ปิยวรรณและคณะ [9] ได้กล่าวไว้ว่า การตัดผลไม้ทุกชนิดแบบวงแหวนจะมีการสูญเสียน้ำมากที่สุด รองลงมา เป็นแบบลูกเต๋า การที่แบบลูกเต๋ามีการสูญเสียน้ำมากในขณะที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่านั้นอาจเป็นผล เนื่องมาจากการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion coefficient) ซึ่งเป็นผลมาจากการมี ปริมาณของแข็งเข้าไป (Solid agent) สูง จึงสรุปได้ว่า แม้ว่าจะเป็นภายใต้สภาวะออสโมซิสเดียวกัน แต่เนื่องจากความแตกต่างของขนาดผลไม้ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันด้วย

### 2.5.3 ความพรุนของผลไม้

ความพรุน (Porosity) หมายถึง ช่องว่างที่อยู่ภายในผลไม้ ซึ่งผลไม้แต่ละชนิดจะมีค่า ความพรุนไม่เท่ากัน ซึ่งความพรุนนี้จะมีผลต่อการแทรกซึมของน้ำเชื่อม

## 2.6 ข้อพิจารณาในการเลือกสภาวะของการดึงน้ำออกแบบออสโมติก [7]

ปิยวรรณและคณะ [9] ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า สารออสโมติก ไว้ว่า เป็น“สารที่ใช้เป็นตัวแทนทำให้เกิดแรงเคลื่อนที่ออสโมซิส”

### 2.6.1 ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกสารออสโมติก

- 1) สารออสโมติกที่ใช้ต้องไม่ส่งผลทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป
- 2) ราคาของสารออสโมติกต้องมีราคาต่อหน่วยถูก ไม่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นมา
- 3) สารออสโมติกที่ใช้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพราะถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำตาลกลูโคสจะทำให้มีปริมาณน้ำตาลซึมเข้าไปในเนื้อผลไม้เพิ่มมากกว่าการสูญเสีย น้ำ
- 4) สารออสโมติกที่ใช้ต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity ,  $a_w$ ) ต่ำ
- 5) สารออสโมติกที่ใช้ต้องมีแรงดันออสโมซิสได้
- 6) สารออสโมติกที่ใช้ต้องไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และมีรสชาติเป็นที่ยอมรับ

### 2.6.2 สารออสโมติก ที่นิยมใช้กับผลไม้ ได้แก่

- 1) น้ำตาลทรายขาว (ซูโครส) ในการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก ผลของน้ำตาล ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มี 2 ประการคือ ประการที่ 1 จะมีผลมากในการเป็นตัวยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากออกซิเจน (Oxidative
- เอ็กสตรันเป็นเอ็กสตรันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

browning) ประการที่ 2 ใช้ป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสที่ระเหยไปได้ระหว่างการทำแห้ง แม้ว่าจะทำภายใต้สภาวะสุญญากาศสูง ๆ อื่น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ความเข้มข้นอยู่ที่ 30-70°Brix แต่การใช้น้ำตาลก็มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดการตกผลึกของ น้ำตาลได้ ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันโดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า “คอกเตอร์” เช่น กรดน้ำส้ม (น้ำส้มสายชู) กรดซิตริก ลงไป อ่อนริว [8] ได้กล่าวว่า สารละลาย กลูโคสช่วยกำจัดน้ำได้ดีกว่าฟรุกโตสและซูโครสแต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ สารละลายซูโครส เนื่องจากเป็นสารที่ให้แรงดันออสโมซิส ให้รสหวาน ทำให้เกิดน้ำหนักรวม และยังมีราคาถูกกว่าน้ำตาลชนิดอื่นๆ

2) กรด ในสารละลายออสโมติกจะมีการเติมกรดลงไปเพื่อเพิ่มอัตราการออสโมซิส และกรดยังช่วยถนอมอาหารหรือยืดอายุการเก็บของอาหาร ช่วยเพิ่มกลิ่นและรสให้กับอาหาร สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ซึ่งจะช่วยให้ผลไม้มีกลิ่น รส สี และลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงธรรมชาติมากขึ้น

ในบรรดากรดอินทรีย์ทั้งหลาย พบว่า กรดแลคติกจะมีผลต่ออัตราการคั่งน้ำออกมากที่สุด ส่วนกรดอะซิติกจะมีผลรองลงมา โดยกรดจะไปยับยั้งการเกิดเจลของสารประกอบเพคตินจากการคั่งเอาซูโครสเข้าไป ทำให้อัตราการสูญเสียน้ำน้อยลงเพราะเจลจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำ วนิตา และ ปราณี (2544) [12] พบว่า การใช้กรดซิตริกร่วมกับซูโครสไซรัปมีผลให้ค่า Water Loss (WL) และ Solid Gain (SG) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้กรดซิตริกในปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากกรดซิตริกสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีขนาดเล็ก ทำให้สารละลายเข้มข้นของไอออน (Molar concentration) เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมซิสระหว่างภายในชิ้นฟักทองกับสารละลายภายนอกมีค่าสูงขึ้น มีผลให้สามารถคั่งน้ำออกจากชิ้นฟักทองได้มากขึ้น นอกจากนี้ขนาดไอออนที่เล็กลงยังมีผลต่อการซึมผ่านของตัวถูกละลายเข้าไปในเซลล์เมมเบรนของชิ้นฟักทองได้ง่ายกว่าทำให้ชิ้นฟักทองมีปริมาณของแข็งสูงขึ้นด้วย

3) กลีเซอรอล การใช้กลีเซอรอลในการอบแห้ง เพื่อทำให้ค่า Water activity ต่ำลง Ramanuja และ Jayaraman (1980) [13] พบว่า เทคนิคการเตรียมอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (Intermediate moisture food) โดยใช้วิธีออสโมติก เพื่อทำให้เป็นผลไม้แปรรูปพร้อมที่จะบริโภค (ready to eat process fruit) ควรจะมีความชื้นร้อยละ 25 โดยการใช้น้ำตาลซูโครสร่วมกับกลีเซอรอลและสารกันรา โดยได้ทดลองกับกล้วย ฝรั่ง มะม่วงและสับปะรด ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

4) โซเดียมคลอไรด์ร่วมกับกลูโคสไซรัป การใช้โซเดียมคลอไรด์ร่วมกับกลูโคสไซรัปมีผลให้ Water Loss และ Solid Gain มีค่าเพิ่มขึ้น วนิตา และ ปราณี [12] กล่าวว่า อัตราการออสโมซิสจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของขนาดและ molar concentration ของโซเดียมคลอไรด์ สามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีขนาดเล็ก ไอออนของเกลือจึงสามารถซึมผ่านเซลล์เมมเบรนได้ง่ายกว่า ทำให้ปริมาณ

ของแข็งมีค่าสูงกว่าแต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกดึงออกมาจะมีค่าสูงขึ้นด้วยเนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกละลายมีในปริมาณมากกว่าเมื่อไม่ใช่โซเดียมคลอไรด์

ในส่วนของข้อดีของการใช้เกลือ คือ สามารถทดแทนน้ำตาลบางส่วนซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ เพราะเกลือมีราคาถูก ช่วยเพิ่มรสชาติให้กับอาหารด้วย ทำให้ค่า  $a_w$  ลดต่ำลง และยังช่วยยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์

### 2.6.3 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

สารละลายออสโมติกควรมีความเข้มข้นสูง เพราะความเข้มข้นมีส่วนช่วยดึงน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ โดยทำให้ค่า Water activity ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าน้อยลง จึงเกิดอัตราการสูญเสียน้ำเพิ่มขึ้นและอัตราการแพร่เข้าของตัวถูกละลายลดลง แต่ขณะเดียวกันน้ำตาลที่ซึมเข้าไปในผลไม้ได้มากขึ้นมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเป็นข้อดีอันหนึ่งของวิธีการนี้ คือ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่หวานจนเกินไป และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น

### 2.6.4 อัตราส่วนระหว่าง สารละลายออสโมติกกับผลไม้

ถ้าอัตราส่วนของสารละลายออสโมติกมากจะทำให้อัตราการออสโมซิสเร็วขึ้นกว่าการใช้สารละลายออสโมติกน้อย ๆ แต่เนื่องจากการใช้สารละลายออสโมติกมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและยังมีปัญหาในเรื่องการจัดการกับสารละลายหลังการออสโมซิส แต่ถ้าใช้สารละลายออสโมติกน้อยเกินไปมีผลให้ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางลง ส่งผลให้แรงดันออสโมซิสลดลงด้วย ดังนั้นจึงต้องหาอัตราส่วนของสารละลายออสโมติกต่อผลไม้ให้เหมาะสมเพื่อดึงน้ำออกจากผลไม้ได้มาก สั้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย และผลไม้มีคุณภาพดีด้วย Lenart และ Flink (1984) [14] พบว่า อัตราการออสโมซิสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 ตามลำดับ และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการออสโมติก คือ 1: 3

## 2.7 การตรวจสอบคุณภาพของอาหารที่ผ่านการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมติก [7]

### 2.7.1 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss, WL) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain, SG)

เป็นค่าที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำที่สูญเสียไปและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถหาได้จากสูตร [13]

$$WL = \frac{\text{ปริมาณน้ำในวันทางจระเข้ก่อนแช่} - \text{ปริมาณน้ำในวันทางจระเข้หลังแช่}}{\text{น้ำหนักวันทางจระเข้สดเริ่มต้นก่อนแช่}} \quad (2.2)$$

$$SG = \frac{\text{ปริมาณของแข็งในวันทางจระเข้หลังแช่} - \text{ปริมาณของแข็งในวันทางจระเข้ก่อนแช่}}{\text{น้ำหนักวันทางจระเข้สดเริ่มต้นก่อนแช่}} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ WL คือ ปริมาณน้ำที่ลดลงในว่นทางจระเข้ภายหลังการแช่ (water loss) (กรัม/100กรัม)

SG คือ ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นในว่นทางจระเข้ภายหลังการแช่ (solid gain) (กรัม/100กรัม)

**การวัดค่าปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water Loss, WL) และปริมาณการเพิ่มของแข็ง (Solid Gain, SG)**

ทำการชั่งน้ำหนักว่นทางจระเข้ก่อนแช่ แล้วนำว่นทางจระเข้ที่ผ่านการแช่เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที แล้วนำขึ้นมาวางเรียงไว้ หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักก่อนที่จะนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักของชิ้นว่นทางจระเข้มีค่าคงที่ ชั่งน้ำหนักสุดท้ายที่ได้ แล้วนำไปเทียบกับค่าที่วัดได้จากว่นทางจระเข้สดด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน แล้วนำไปหาค่าตามสมการที่ 2.2 และ 2.3

### 2.7.2 ระบบการวัดค่าสี

สีเป็นปัจจัยคุณภาพปัจจัยแรกที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจตัดสินใจยอมรับคุณภาพของอาหาร เพราะสีเป็นสิ่งที่คนเรารับรู้ได้ง่ายที่สุดเมื่อเทียบกับการรับรู้ทางประสาทสัมผัสชนิดอื่น สียังสามารถบอกถึงปัจจัยคุณภาพอื่น คือ ความแก่อ่อน ความสุก และความสด ซึ่งมนุษย์จะมีการจดจำความหมายของสีที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีค่าสีมาตรฐานเพื่อใช้บ่งชี้ว่าสีที่เราเห็นมีค่าเท่าใดเพื่อที่เกษตรกร ผู้ซื้อ ผู้ผลิตและผู้บริโภคได้เข้าใจตรงกันและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามต้องการ

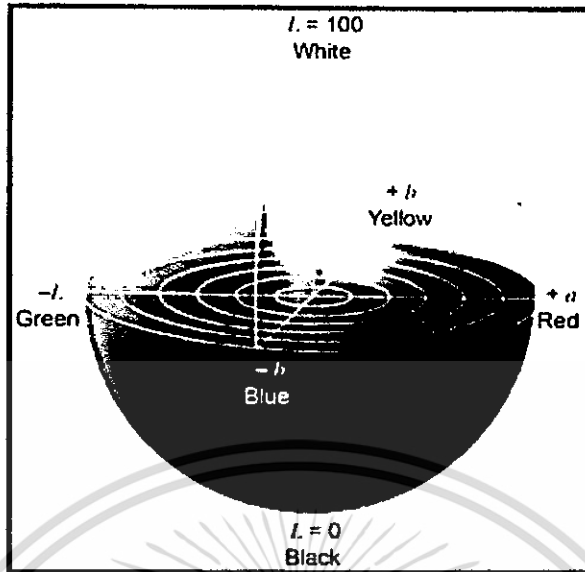
ซึ่งระบบการวัดค่าสีที่นิยมใช้ในงานวิจัยทางด้านอาหารจะนิยมใช้ระบบ Hunter Color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) ซึ่งเป็นระบบที่มีการพัฒนามาจากค่าสีไอโอโทรสติกมิวลิส ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) และค่าพิกัดสีไอโอโทรมาติซิติ ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) เพื่อให้สามารถบอกค่าความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งความหมายของค่า Hunter  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  มีดังนี้ และแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7

- 1) ค่า Hunter  $L^*$  เป็นค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 – 100 โดยที่
  - ค่า Hunter  $L^* = 0$  แสดงถึงความเป็นสีดำอย่างสมบูรณ์
  - ค่า Hunter  $L^* = 100$  แสดงถึงความเป็นสีขาวอย่างสมบูรณ์
- 2) ค่า Hunter  $a^*$  เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว โดยที่
  - ค่า Hunter  $a^*$  เป็นบวก แสดงความเป็นสีแดง
  - ค่า Hunter  $a^*$  เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว
- 3) ค่า Hunter  $b^*$  เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือความเป็นสีน้ำเงิน โดยที่
  - ค่า Hunter  $b^*$  เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง
  - ค่า Hunter  $b^*$  เป็นลบ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

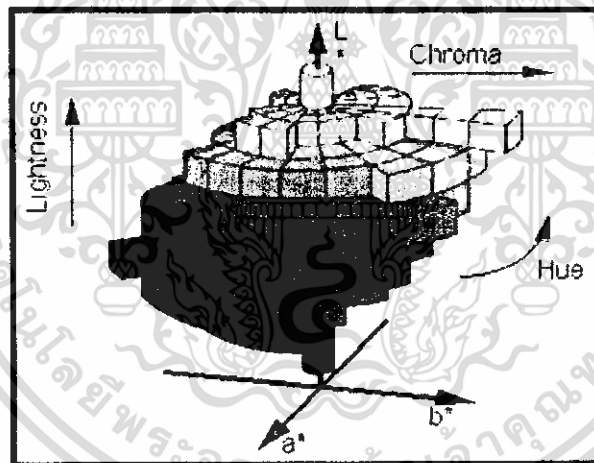
นอกจากนี้ในกรณีที่มีตัวอย่างหลาย ๆ ชิ้นที่ต้องการเทียบสีกับตัวอย่างมาตรฐาน อาจบอกค่าความแตกต่างโดยใช้ค่า  $\Delta E^*$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ. [16]



รูปที่ 2.7 Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี. [17]

### การวัดค่าสี (Colorimeter)

นำชิ้นตัวอย่างวุ้นหางจรเข้มาวัดค่าสีด้วย colorimeter (TRI-STI MULUS model Color J.C. 801, Japan) โดยการเข้าโปรแกรมการวัดสี เลือกคำสั่ง MEASUREMENT ต่อจากนั้นเปิดเครื่องวัดสี เลื่อนแถบกันแสง แล้วนำ Light Tap Block วางครอบช่องวัดสีของตัวอย่าง กด F1 ใส่แผ่นมาตรฐานที่เป็นวัตถุขาววางครอบช่องวัดสีของตัวอย่าง จากนั้นเปิดเครื่องวัดสีเลื่อนแถบกันแสงเข้าที่เดิมแล้วกด F1 ตรวจวัดค่าวัตถุขาวให้ได้ตามกล่อง ซึ่งมีค่า  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ดังนี้ 99.10, 0.11, -0.40 ใส่ตัวอย่างวุ้นหางจรเข้ลงไป แล้วกด Enter 2 ครั้ง และใช้การบอกค่าสีด้วยระบบ Hunter ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

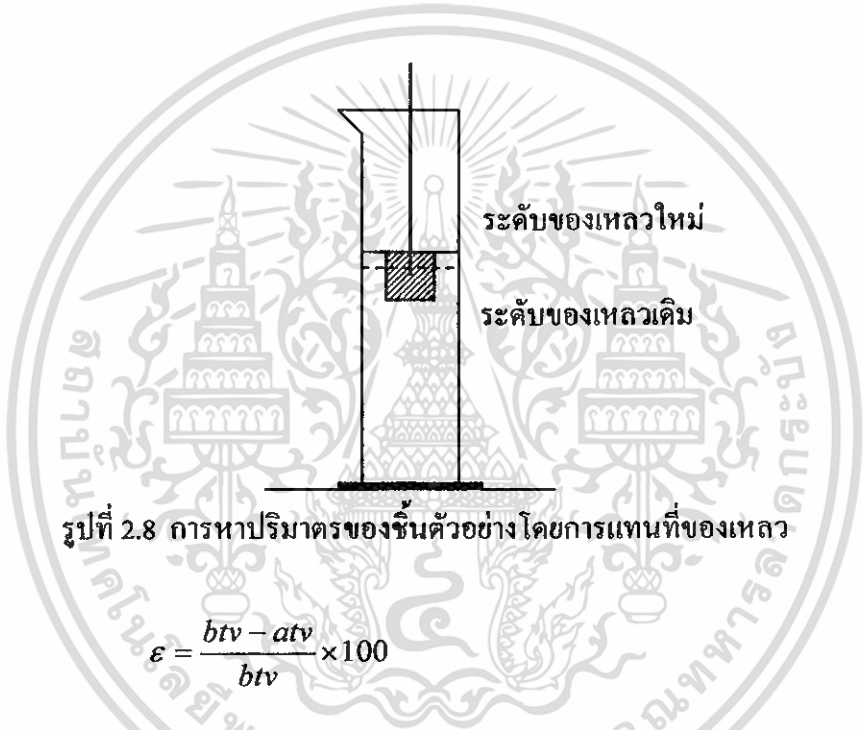
โดย  $L^*$  คือค่าที่แสดงความสว่าง,  $a^*$  คือค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือสีเขียว,  $b^*$  คือค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

### 2.7.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage)

เปอร์เซ็นต์การหดตัว เป็นการแสดงให้เห็นความยืดหยุ่นของผลไม้ ภายหลังจากการผ่านกระบวนการต่างๆ ว่ามีการหดตัวมากหรือน้อย

#### การวัดเปอร์เซ็นต์การหดตัว(Shrinkage)

โดยการจุ่มชิ้นวุ้นทางจระเข้ลงในกระบอกตวงที่บรรจุสารละลาย Isotonic ประมาณ 500 มิลลิลิตร เพื่อวัดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และการหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 นี้



รูปที่ 2.8 การหาปริมาณของชิ้นตัวอย่างโดยการแทนที่ของเหลว

$$\varepsilon = \frac{btv - atv}{btv} \times 100$$

(2.5)

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัว

$btv$  คือ ปริมาตรของวุ้นทางจระเข้ก่อนแช่(before treatment volume)(มิลลิลิตร)

$atv$  คือ ปริมาตรของวุ้นทางจระเข้หลังการแช่(after treatment volume)(มิลลิลิตร)

### 2.7.4 เนื้อสัมผัส (Texture)

เนื้อสัมผัส หมายถึง สิ่งที่เราได้โดยการสัมผัส เช่น การเคี้ยว การจับ การฟังเสียงขณะเคี้ยว ว่ามีลักษณะอย่างไร เช่น มีความแข็ง นุ่ม อ่อน นอกจากนี้ยังอาจหมายถึงลักษณะผิวที่มองเห็นจากภายนอกวัสดุ เช่น หยาบ ตะเีียด เป็นต้น

## การวัดค่าเนื้อสัมผัส โดยใช้หัวกดแบบแผ่นแบนเพื่อทดสอบ Texture

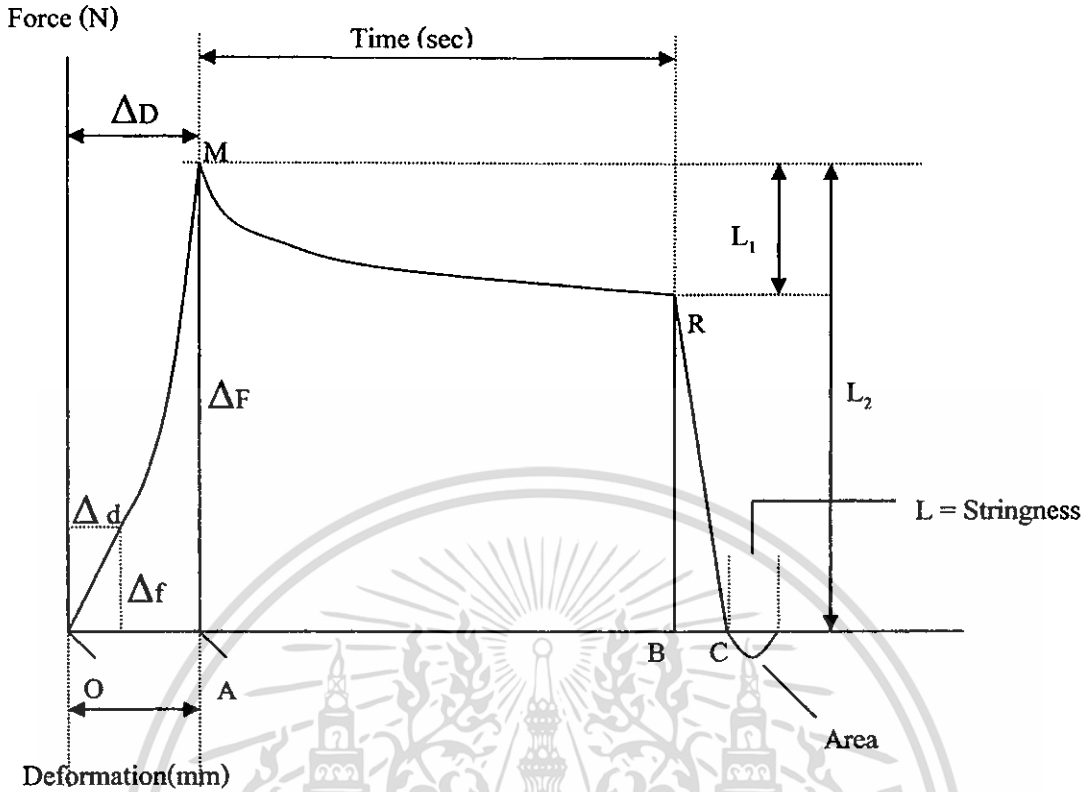
### 1) วัสดุและอุปกรณ์

1. ว่านหางจระเข้ที่ปอกเปลือกและตัดเป็นรูปทรงกระบอกขนาด 2.0X2.0 เซนติเมตร
2. เครื่องวัดสมบัติเชิงกลของผักผลไม้ 1 เครื่อง (TA.XT.plus, Stable Micro System, UK) พร้อมหัวกดแบบแผ่นแบน

### 2) วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องวัดสมบัติเชิงกล และทำการติดตั้งหัวกดแบบแผ่นแบน
2. เช็ดและทำความสะอาดเครื่องด้วยกระดาษทิชชู ก่อนเป็นอันดับแรก
3. ทำการ Calibrate ตัวเครื่องวัด โดยใช้ท่อนเหล็กหนัก 2000 กรัม วางบนเครื่องเป็นเวลา 10 วินาที
4. จากนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้มือจึงสามารถคัปป์ให้หัวแผ่นแบนสูงขึ้นไประยะหนึ่งก่อนได้
5. นำว่านหางจระเข้ตัวอย่างที่ปอกเปลือกและตัดเป็นทรงกระบอก 2.0X2.0 เซนติเมตรวางบนแท่นเครื่องให้ได้ศูนย์กลางทั้ง 4 แนว
6. เลื่อนหัวกดลงมาในตำแหน่งที่สูงจากพื้นผิวเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับทดลอง
7. เริ่มทำการบันทึกข้อมูลตั้งให้หัวกดทำงาน กดลงด้วยความเร็วคงที่ 0.2 มิลลิเมตร/วินาที จนกระทั่งแรงกดเท่ากับ 5 N ให้สั่งให้หัวกดหยุดไว้ 30 วินาที
8. สั่งให้หัวกดเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วเท่าเดิม ทั้งนี้จะเห็นว่าว่านหางจระเข้ตัวอย่างจะติดกับแผ่นหัวกดขึ้นไประดับหนึ่งเนื่องจากมีความเหนียว ให้ปล่อยไว้แบบนี้จนกว่าจะตกลงมาเอง
9. นำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างแรงกดกับการเปลี่ยนรูปร่าง จะเห็นว่าจะมีช่วงที่กราฟติดลบเนื่องจากผลของว่านที่ติดขึ้นไปกับแผ่นหัวกด
10. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหัวกดและฐานรองทุกครั้งก่อนที่จะเปลี่ยนชิ้นทดลองต่อไป
11. คำนวณหา Average Firmness, Energy absorption, Degree of elasticity, Deformation ratio, Relaxation ratio และ recovery ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟของ แรง - การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการกด,  
การทดสอบการคลายตัว และการคืนสภาพ

$$\text{Initial Firmness (N/mm)} = \frac{\Delta f}{\Delta d} \quad (2.6)$$

$$\text{Average Firmness (N/mm)} = \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad (2.7)$$

$$\text{Relaxation (\%)} = \frac{L_1}{L_2} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\text{Energy absorption (N mm)} = (\text{Area}_{OMA} - \text{Area}_{BRC}) \cdot v \quad (2.9)$$

$v$  = speed ของหัวกด (0.2 mm/s)

$$\text{Degree of elasticity (Recovery Ratio)} = \frac{BC}{OA} \quad (2.10)$$

$$\text{Deformation ratio} = \left( \frac{OA}{D} \right) \cdot v \quad (2.11)$$

$$\text{Springiness (mm)} = BC \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.5 การวัดค่าของความพรุนในผลไม้ (Porosity) [13]

สัมประสิทธิ์ของความพรุน ( $\epsilon_o$ ) เป็นการกำหนดสัดส่วนของปริมาตรแก๊สในเนื้อเยื่อผลไม้ในการเปรียบเทียบกับปริมาตรรวมของผลไม้ตัวอย่าง ในส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อสดๆของผลไม้ แก๊สปริมาณหนึ่งจะเป็นตัวกีดกันทานอยู่ภายในรูพรุน เป็นการนำไปสู่การชี้แจงของเรื่องรูพรุน การปฏิบัติการในเรื่องการวัดค่าความพรุนนั้นถูกออกแบบตามการใช้สารละลายน้ำตาล isotonic เป็นการเตรียมสำหรับค่า  $a_w$  ของผลไม้สดแต่ละตัวอย่าง หลังจากที่ได้ทำการตัดผลไม้สดออกเป็นรูปลูกบาศก์ และมีน้ำหนัก, ปริมาตรเริ่มแรกของผลไม้ตัวอย่างเป็นการหาโดยการวัดสารละลายน้ำตาล isotonic กับรูปลูกบาศก์

สำหรับการวัดค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนระหว่างการใช้สุญญากาศ (Vacuum) ในสารละลาย isotonic, สำหรับในผลไม้ตัวอย่างนั้นเป็นการจุ่มในสารละลาย Isotonic ภายใต้อุณหภูมิความดันที่ 800, 600, 400, 200, 100 และ 50 มิลลิบาร์ ตามลำดับ ในเวลา 2 นาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 23 องศาเซลเซียส) และที่การทดลองขั้นสุดท้ายของแต่ละการใช้สุญญากาศ, เป็นการเคลื่อนย้ายผลไม้จากการจุ่ม เช็ดให้แห้งและนำไปชั่งน้ำหนัก แก๊สที่อยู่ภายในชิ้นผลไม้จะถูกเคลื่อนย้ายออก และสารละลาย isotonic จะเคลื่อนย้ายมาสู่ในชิ้นผลไม้แทน สัดส่วนของปริมาตรของสารละลายแทนด้วย (X) และคำนวณโดยใช้สูตร

$$X = \frac{M_t - M_o}{\rho \cdot V_o} = D \cdot \left( 1 - \frac{P_t}{P_{atm}} \right) + X_o \quad (2.13)$$

สัมประสิทธิ์ความพรุน ( $\epsilon_o$ ) สามารถหาได้จากสมการ (2.6)

$$\epsilon_o = \frac{X}{\left( 1 - \frac{P_t}{P_{atm}} \right)} \quad (2.14)$$

$$\epsilon_o = D + X_o \cdot \frac{P_{atm}}{(P_{atm} - P_t)} \quad (2.15)$$

|     |            |   |  |
|-----|------------|---|--|
| โดย | $M_o$      | = | น้ำหนักเริ่มต้นของผลไม้ที่ทดลอง (kg)   |
|     | $M_t$      | = | น้ำหนักของผลไม้ที่ทดลอง ที่เวลา t หลังจากการจุ่มในสารละลาย Isotonic ภายใต้อุณหภูมิความดัน (kg) |
|     | $V_o$      | = | ปริมาตรเริ่มต้นของผลไม้ที่ทดลอง ( $m^3$ )  |
|     | $\epsilon$ | = | ความหนาแน่นของสารละลายน้ำตาล isotonic ( $kg/m^3$ )   |
|     | $P_{atm}$  | = | ความดันปกติ (1030 มิลลิบาร์)   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_t$  = ความดันสูญญากาศในแต่ละการทดลอง ที่ เวลา  $t$  (มิลลิวินาที)  
 $D, X_0$  = ค่าคงที่เฉพาะของแต่ละผลไม้

ค่าคงที่เฉพาะ  $D$  และ  $X_0$  ใช้ได้เหมือนกัน ในค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนของผลไม้ 3 ชนิดที่เลือกทำการทดลองดังตารางที่ 2.2 ในผลไม้ชนิดเดียวกันที่มีค่าต่างๆที่เหมือนกันก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนที่แตกต่างกันทั้งนี้เนื่องจาก ความแก่, สุก ที่เลือกมาใช้นั้นต่างกัน

### 2.7.6 ความหนาแน่นเนื้อ (Solid Density)

ค่าความหนาแน่นเนื้อ หาได้จากการชั่งน้ำหนักชิ้นว่านหางจระเข้ และชั่งน้ำหนักในสารละลาย Isotonic เพื่อหาปริมาตรของชิ้นว่านหางจระเข้ แล้วนำมาคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นเนื้อ} = \frac{\text{มวลชิ้นว่านหางจระเข้}}{\text{ปริมาตรชิ้นว่านหางจระเข้}} \quad (2.16)$$

### 2.7.7 ความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้นหาได้จากการนำชิ้นว่านหางจระเข้ไปอบจนแห้งหรือจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ชั่งน้ำหนักชิ้นว่านหางจระเข้ก่อนอบ และชิ้นว่านหางจระเข้หลังอบ แล้วนำมาคำนวณหาค่าความชื้นได้จาก สมการ

$$\text{Moisture Content} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นว่านหางจระเข้ก่อนอบ} - \text{น้ำหนักชิ้นว่านหางจระเข้หลังอบ}}{\text{น้ำหนักชิ้นว่านหางจระเข้ก่อนอบ}} \times 100 \quad (2.17)$$

## 2.8 หลักการ Response Surface Methodology (RSM) [18]

### 2.8.1 ความหมาย

เป็นเทคนิคทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เป็นที่สนใจของนักวิจัย ผลที่ตามมาคือนักวิจัยสามารถที่จะหาสูตรหรือสถานะที่เหมาะสม (Optimization) จากความสัมพันธ์เหล่านั้นได้เมื่อพิจารณาปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมๆกัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้คือ การวางแผนการทดลอง (Experimental design), การวิเคราะห์สมการถดถอย (regression analysis) และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้างแผนภาพคอนทัวร์

### 2.8.2 นิยาม

RSM เป็นการแสดงหรือเป็นตัวแทนทางเรขาคณิตที่ได้รับเมื่อผลตอบสนองของตัวแปร (Response) ถูกพล็อตเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเหล่านั้น  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทั่วไป

$$Y = f(X_1 + X_2 + \dots + X_k) + E \tag{2.18}$$

โดยที่

$Y$  คือ ค่าตอบสนอง (Response), dependent variable

$X_1 + X_2 + \dots + X_k$  คือ ตัวแปรที่สนใจ, Independent variables

$E$  คือ Error term

ความสัมพันธ์ หรือฟังก์ชันของตัวแปรเหล่านี้มักใช้สมการลำดับที่หนึ่ง (First order) หรือสมการลำดับที่สอง (Second order) หรือแบบจำลองพหุนาม (Polynomial model) เป็นตัวอธิบายวิธีการทางสถิติที่ใช้จะใช้วิธีกำลังน้อยที่สุด (The least square method) เพื่อประมาณค่าของ parameter ต่างๆ ฟังก์ชันที่ใช้เรียกว่าฟังก์ชันของการตอบสนองที่เหมาะสม (Fitted response function)

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + \dots + b_nX_n \tag{2.19}$$

โดยให้  $\hat{y}$  = ตัวแปรตาม

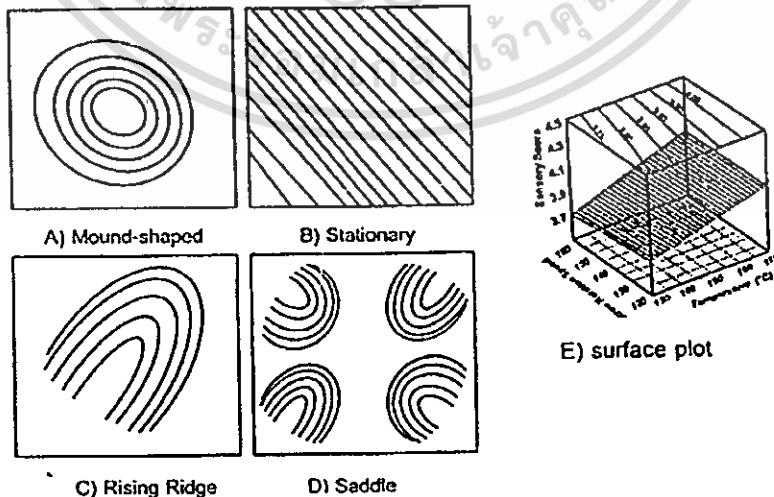
$X_i$  = ตัวแปรต้น

$b_i$  = สัมประสิทธิ์

$i$  = จำนวนเลข (0-n)

### 2.8.3 แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot)

แผนภาพคอนทัวร์ เป็นอนุกรม (Series) ของเส้น หรือกราฟซึ่งมีค่าที่แน่นอนและคงที่ สอดคล้องกับ ระดับของปัจจัยที่เปลี่ยนไป แผนภาพคอนทัวร์มีหลายแบบสอดคล้องกับสมการถดถอย ที่ตรวจสอบได้ (รูปที่ 2.10) เช่น mound-shaped, stationary ridge, rising ridge, saddle โดยแผนภาพคอนทัวร์ที่สร้างเป็นแผนภาพ 3 มิติ เรียกว่า surface plot (รูปที่ 2.10E)



รูปที่ 2.10 ลักษณะของแผนภาพคอนทัวร์ (2 มิติ) ชนิดต่างๆ (A, B, C, D) และ surface plot (3 มิติ) (E)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.4 ขั้นตอนการทำ RSM

1. เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้างแผนภาพคอนทัวร์
2. สร้างสมการ regression ที่ดีที่สุด (แนะนำให้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ แนะนำ SAS, SPSS, MINITAB)
3. สร้าง contour plot จากสมการที่หามาได้ (โดยใช้ software ต่างๆ แนะนำ STATISTICA หรือ MINITAB)
4. ตรวจสอบ Optimization
5. Verification โดยการทำ Independent run ภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว
6. ถ้า Model ไม่เหมาะสม (Invalid) ให้สร้าง Model ใหม่ (ทำซ้ำข้อ 2 ถึง 5)

การเลือกแบบจำลอง (Model selection) ในการสร้างแบบจำลองสำหรับ RSM นั้นมีหลายเทคนิคในการสร้างและคัดเลือกแบบจำลอง (Model) ที่ดีที่สุดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การวางแผนตั้งแต่เริ่มต้น ในกรณีที่มีแผนการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม บางการทดลองที่ไม่มีการวางแผนล่วงหน้าว่าจะใช้แบบจำลองใด อาจดำเนินการดังนี้ ซึ่งน่าจะเป็นที่เหมาะสมมากที่สุด

1. วิธีการแบบจำลองแบบสมบูรณ์ (Full model technique) วิธีการนี้จะระบุแบบจำลองที่ต้องการใช้ เช่น แบบจำลองอันดับหนึ่ง (First order model) หรืออันดับสอง (Second order model) หลังจากนั้นจึงใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวในแบบจำลอง

2. วิธีการแบบจำลองลดรูป (Reduced model technique) วิธีการนี้จะแสดงแบบจำลองแบบลดรูป (Reduced model) โดยจะเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองมาใช้สร้างแผนภาพคอนทัวร์ หรือ surface plot เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการถดถอยได้แก่ stepwise technique, all possible regression technique)

ส่วนการวางแผนการทดลองใน RSM แผนการทดลองที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ใน RSM นั้นขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ต้องการนำมาใช้ ถ้าต้องการแค่แบบจำลองอันดับหนึ่ง การทดลองที่มีปัจจัยแค่ 2 ระดับ ก็เพียงพอ แผนการทดลองที่นำมาใช้ได้แก่ แฟคทอเรียล  $2 \times 2$  ใน CRD หรือ RBD หรือ แฟคทอเรียลบางส่วนของ  $2^k$  series ซึ่งอิทธิพลหลัก (Main effect) ไม่อัลเลียส (alias) ซึ่งกันและกัน, การใช้แฟคทอเรียลที่มีปัจจัย 2 ระดับ ต้องระวังเมื่อใช้ในแบบจำลองอันดับหนึ่ง เพราะจะไม่สนใจเทอมอันตรกิริยา (Interaction term) หรือ Cross product และควรระวังก่อนว่าปัจจัยที่นำมาศึกษาไม่อันตรกิริยากัน

ในกรณีที่ต้องการใช้สมการลำดับ 2 (Second order model) จำเป็นต้องเลือกแผนการทดลองที่มีปัจจัย 3 ระดับขึ้นไป ได้แก่  $2^k$  factorial in CRD or RBD ซึ่งจะรวมกับ cross product โดย k คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา,  $3^k$  factorial CRD or RBD, fractional factorial in CRD or RBD, การทดลองแบบผสม ถ้าจำนวนสิ่งทดลองมีมากเกินไป การใช้แผนการทดลองที่ดัดแปลงจากแฟคทอเรียล เช่น การทดลองแบบหมุน (Rotatable design), Central composite design (CCD), Box-Behnken design ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นเดียวกัน

### 2.8.5 เทคนิคในการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุด

#### 1. Stepwise technique (forward or backward)

Forward, เพิ่มตัวแปรทีละตัว

Backward, ลดตัวแปรทีละตัว

#### 2. All possible regression technique

ค่าสถิติที่ใช้พิจารณา Model:  $R^2$ , adjusted  $R^2$ ,  $C_p$

### 2.8.6 การสร้าง Contour plot

ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น SURFER, SAS, SIGMA PLOT, STATISTICA, MINITAB ข้อจำกัด-ต้องรู้เทคนิคในแต่ละโปรแกรม

SURFER: ใช้ข้อมูลดิบและให้ contour plot ออกมา แต่ไม่ได้ให้สมการออกมา รูป contour plot คุณภาพดี

SAS: การเขียนโปรแกรมค่อนข้างยุ่งยาก แต่จะให้รายละเอียดของสมการและการทดสอบทางสถิติ รวมทั้งจุดสูงสุดต่ำสุด, รูป contour plot มีคุณภาพไม่ดี (ไม่ค่อยละเอียด) ปัจจุบันมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นแล้ว

SIGMA PLOT: การใช้ค่อนข้างง่าย ให้รายละเอียดของ contour plot ดี แต่ต้องเอาสมการที่ดีที่สุดจาก SAS หรือ SPSS มา generate ข้อมูลเพื่อทำ contour plot

STATISTICA: การใช้งานค่อนข้างง่าย ให้รายละเอียดของ contour plot ดีมาก สามารถที่นำเอาสมการที่ดีที่สุดจาก SPSS หรือ SAS มาสร้าง contour plot ได้ด้วย

MINITAB: การใช้งานค่อนข้างง่าย ให้รายละเอียดของ contour plot ดีพอสมควร สามารถที่นำเอาสมการที่ดีที่สุดจาก SPSS หรือ SAS มาสร้าง contour plot ได้ด้วย นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบ lack of fit ของสมการได้ด้วย

### 2.8.7 การออกแบบการทดลอง (Experimental design RMS)

Factorial in CRD or RBD design

Fractional factorial in CRD or RBD design

Rota table design

Central composite design

Box-Behnken design

Mixture design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.7.1 Design for first order model

- $2^k$  factorial in CRD or RBD
- fractional factorial ของ  $2^k$  series ซึ่ง main effect ไม่ alias ซึ่งกันและกัน
- การใช้ 2-level factorial ต้องระวังใน first order model เพราะจะไม่สนใจ cross product (interaction term) ควรจะแน่ใจว่าปัจจัยที่นำมาศึกษาไม่ ปฏิกริยาสัมพันธ์กัน

### 2.8.7.2 Design for second order model

- $2^k$  factorial in CRD or RBD ซึ่งจะรวม cross product
- $3^k$  factorial in CRD or RBD
- fractional factorial in CRD or RBD
- Rotatable design
- Central composite design
- Box-Behnken design
- Mixture design

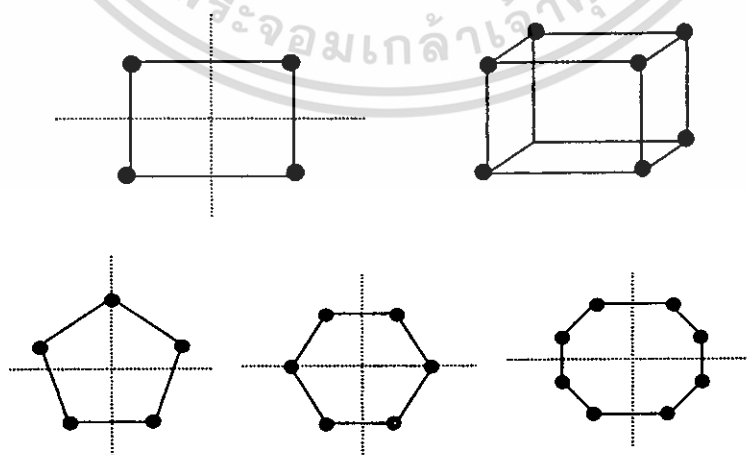
การจัดการทดลองแบบ Factorial และ fractional factorial ได้กล่าวไปแล้ว ในที่นี้จะขอล่าว เฉพาะ Rotatable design, Central composite design, Box-Behnken design

#### 2.8.7.3 Rotatable design

ทุกระดับห่างจาก Center ของ design เท่ากัน ทั่วไปสร้างได้จากทรงกลม, วงกลม หรือลูกบาศก์:

$2^k$  ทุกอัน เป็น Rota table

$3^k$  บางอันเท่านั้นที่เป็น Rotatable



รูปที่ 2.11 การวางแผนแบบ Rotatable design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าของ coded level ใน Rota table design (2 ปัจจัย)

| Trt | Square |       | Pentagon |       | Hexagon |       | Octagon |       |
|-----|--------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|
|     | $X_1$  | $X_2$ | $X_1$    | $X_2$ | $X_1$   | $X_2$ | $X_1$   | $X_2$ |
| 1   | -1     | -1    | 0        | 1     | 1       | 0     | 1       | 0     |
| 2   | -1     | 1     | .951     | .309  | .500    | .866  | .707    | .707  |
| 3   | 1      | -1    | .588     | -.809 | -.500   | .866  | 0       | 1     |
| 4   | 1      | -1    | -.588    | -.809 | -1      | 0     | -.707   | .707  |
| 5   |        |       | -.951    | .309  | -.500   | -.866 | -1      | 0     |
| 6   |        |       |          |       | .500    | .866  | .707    | -.707 |
| 7   |        |       |          |       |         |       | 0       | -1    |
| 8   |        |       |          |       |         |       | -.707   | -.707 |

## การคำนวณ 2-level coding

1. หาค่าเฉลี่ยของระดับ (avg)
2. หาค่าช่วงกลางของระดับ (Mid):  $\text{Mid} = (\text{upper level} - \text{lower level})/2$
3. Code ระดับของปัจจัย

$$\text{Code level} = (\text{true level} - \text{avg})/\text{Mid}$$

## 2.8.7.4 Central composite design (CCD)

เป็นแผนการทดลองที่เพิ่มการทดลองระหว่างระดับของปัจจัย

- สร้าง  $2k$  factorial อย่างสมบูรณ์
- เพิ่ม  $2k$  axial หรือจุดบนแกน coordinate โดยมีค่า code level ดังตารางข้างล่าง

$$(\pm a, 0, 0, \dots, 0),$$

$$(0, \pm a, 0, \dots, 0),$$

$$(0, 0, 0, \dots, \pm a),$$

$a$  = ค่าคงที่ตามกำหนด

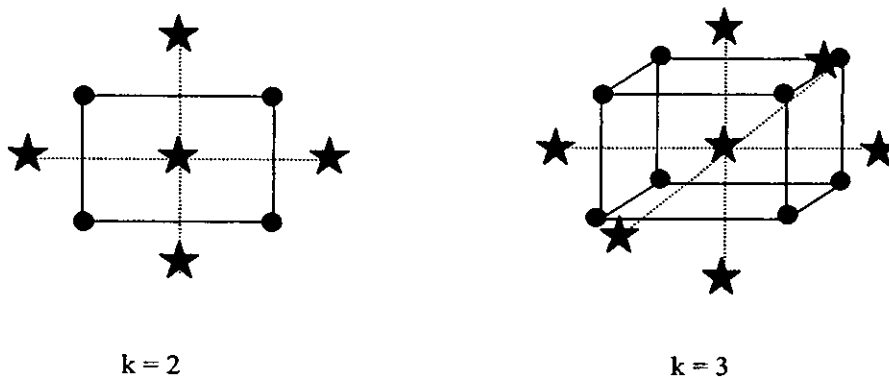
- เพิ่มจำนวน  $m$  ที่ center:  $(0, 0, 0, \dots)$

- สุ่มแต่ combination ไปยังแต่ละ experimental unit

total observation (n):  $n = 2^k + 2k + m$  ซึ่ง  $n < 3^k$  เสมอ

ถ้า  $a = F^{1/4}$ : ( $F$  = จำนวนของ combination ทั้งหมดใน factorial ที่ใช้) Central composite design นี้จะเป็น Rotatable design ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



k = 2

k = 3

รูปที่ 2.12 Central composite design ใน 2 ปัจจัย (k = 2) และ 3 ปัจจัย (k = 3) โดยที่  $a = (2^k)^{1/4} = 1.68$ 

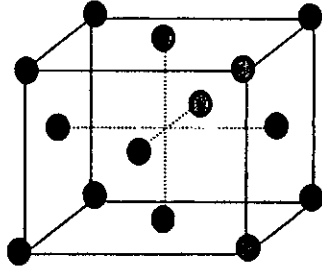
ตารางที่ 2.3 ค่าของ Code level ใน Central composite design (2 ปัจจัย)

| Run no. | Code level |          |
|---------|------------|----------|
|         | ปัจจัย A   | ปัจจัย B |
| 1       | +1         | +1       |
| 2       | +1         | -1       |
| 3       | -1         | +1       |
| 4       | -1         | +1       |
| 5       | 0          | 0        |
| 6       | +1.414     | +1.414   |
| 7       | 0          | 0        |
| 8       | -1.414     | -1.414   |
| 9       | 0          | 0        |
| 10      | 0          | 0        |
| 11      | 0          | 0        |
| 12      | 0          | 0        |
| 13      | 0          | 0        |

ในบางกรณีที่มี  $a = 1$  ซึ่งแต่ละจุดของการทดลองที่เพิ่มขึ้นจะอยู่บนแต่ละด้านของลูกบาศก์ของ  $2^k$  factorial Design แบบนี้จะเรียกว่า Face – Centered central composite design (รูปที่ 2.13) ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนระดับในแต่ละปัจจัยจะน้อยลงไป เช่น จากตัวอย่างถ้าใช้ Central composite design จะมี 5 ระดับ (-1.68, -1, 0, 1, 1.68) แต่ถ้าวางแผนแบบ Face-Centered composite design จะลดเหลือ 3 ระดับ (-1, 0, 1) ซึ่งจะช่วยลดจำนวนตัวอย่างลงเป็นอย่างมากทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการ

#### ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 Face-Centered central composite design ใน 3 ปัจจัย

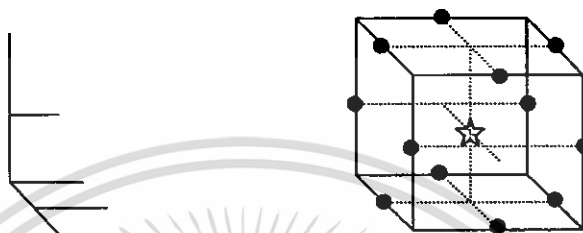
ตารางที่ 2.4 ค่าของ code level ใน Central composite design (3 ปัจจัย)

| Run no. | Code level |          |          |
|---------|------------|----------|----------|
|         | ปัจจัย A   | ปัจจัย B | ปัจจัย C |
| 1       | -1         | -1       | -1       |
| 2       | -1         | -1       | +1       |
| 3       | -1         | +1       | -1       |
| 4       | -1         | +1       | +1       |
| 5       | +1         | -1       | -1       |
| 6       | +1         | -1       | +1       |
| 7       | +1         | +1       | -1       |
| 8       | +1         | +1       | +1       |
| 9       | -1.68      | 0        | 0        |
| 10      | +1.68      | 0        | 0        |
| 11      | 0          | -1.68    | 0        |
| 12      | 0          | +1.68    | 0        |
| 13      | 0          | 0        | -1.68    |
| 14      | 0          | 0        | +1.68    |
| 15      | 0          | 0        | 0        |
| 16      | 0          | 0        | 0        |
| 17      | 0          | 0        | 0        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.7.5 Box-Behnken Design

เป็นอีกแผนการทดลองที่เป็นทางเลือกหนึ่งของ  $3k$  factorial การออกแบบการทดลองดังกล่าวได้มาจาก  $2k$  factorial และ BIB ผลก็คือทำให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อควรระวังของ Box-Behnken Design ก็คือว่าไม่มีการทดลองที่จะทดสอบที่ระดับสูงสุดหรือต่ำสุดของปัจจัย (ที่มุมของรูปลูกบาศก์) แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design สามารถหาได้จากหนังสือการวางแผนการทดลองทางสถิติทั่วไป



รูปที่ 2.14 Three factor Box-Behnken design (code factor levels)

ตารางที่ 2.5 Box-Behnken Design 3 ปัจจัย

| Run no. | Code level |    |    |
|---------|------------|----|----|
|         | A          | B  | C  |
| 1       | -1         | -1 | 0  |
| 2       | -1         | +1 | 0  |
| 3       | +1         | -1 | 0  |
| 4       | +1         | +1 | 0  |
| 5       | -1         | 0  | -1 |
| 6       | -1         | 0  | +1 |
| 7       | +1         | 0  | -1 |
| 8       | +1         | 0  | +1 |
| 9       | 0          | -1 | -1 |
| 10      | 0          | -1 | +1 |
| 11      | 0          | +1 | -1 |
| 12      | 0          | +1 | +1 |
| 13      | 0          | 0  | 0  |
| 14      | 0          | 0  | 0  |
| 15      | 0          | 0  | 0  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

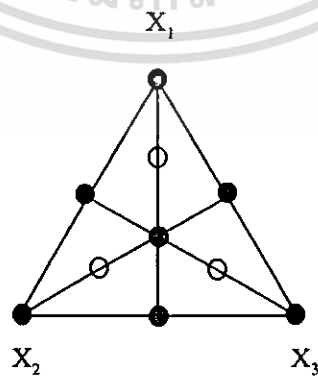
ตารางที่ 2.6 Box-Behnken Design 4 ปัจจัย

| Run no. | Code level |         |         |         |
|---------|------------|---------|---------|---------|
| 1 – 4   | $\pm 1$    | $\pm 1$ | 0       | 0       |
| 5 – 8   | $\pm 1$    | 0       | $\pm 1$ | 0       |
| 9 – 12  | $\pm 1$    | 0       | 0       | $\pm 1$ |
| 13 – 16 | 0          | $\pm 1$ | $\pm 1$ | 0       |
| 17 – 20 | 0          | $\pm 1$ | 0       | $\pm 1$ |
| 21 – 24 | 0          | 0       | $\pm 1$ | $\pm 1$ |
| 25 – 27 | 0          | 0       | 0       | 0       |

เป็นแผนการทดลองตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลองที่มี 3 ปัจจัย

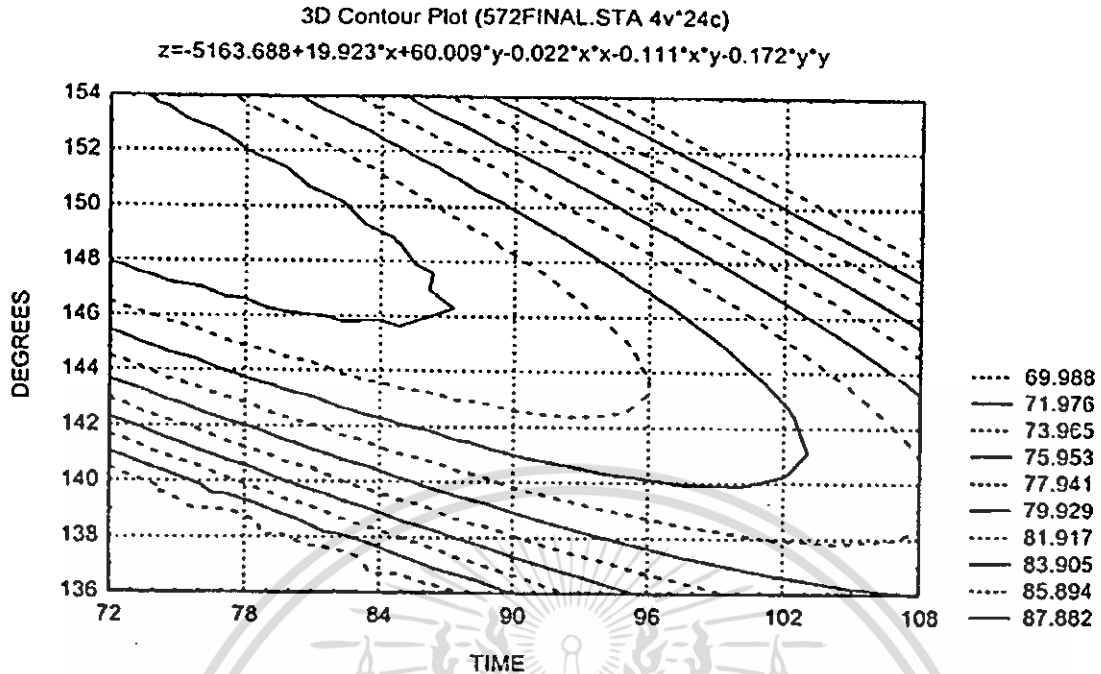


รูปที่ 2.15 Trilinear coordinate system ที่ใช้ใน Mixture design



รูปที่ 2.16 Simplex design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 Contour plot ที่ได้จากโปรแกรม STATISTICA

### 2.8.8 การใช้โปรแกรม STATISTICA 5.0 ในการสร้าง Contour Plot ใน RSM

เปิดโปรแกรมโดยการ double click ที่ icon ของ **STATISTICA** →  
 เลือก **multiple regression** → click **switch to** → จะเห็น windows ของ multiple regression และ โปรแกรมจะเรียกข้อมูลล่าสุดมาโดย default →  
 ให้เปิด file ที่ต้องการ โดย click **open data** ถ้าต้องการวิเคราะห์ regression ถ้าไม่ต้องการให้ click **cancel** → regression click **graph** ที่ main menu ของโปรแกรม →  
 Click **Status 3DXYZ Graphs** → click **Contour Plots** → จะได้นหน้าต่างของ **3D contour plots**  
 เลือกตัวแปร โดยการ click **variable** แล้วเลือกตัวแปรของแกน X Y Z โดยการ click ที่ตัวแปรนั้น  
 นิยามให้ z เป็นค่า response → click **OK** →  
 ตรง FIT ให้เลือกชนิดของสมการที่ต้องการ ได้แก่ **Linear Smooth** สำหรับเส้นตรง (หรือ first order)  
**Quadr. Smooth** สำหรับสมการอันดับที่สอง (second order)- **Least Squares** สำหรับ polynomial ตรง  
**contour style** ให้ เลือก Lines และถ้าต้องการให้แสดงข้อมูลดิบให้ click ตรง **show Raw Data point**  
 → click **OK** → จะ ได้ contour plot พร้อมกับสมการที่ต้องการ  
 ในกรณีที่ต้องการสร้าง contour plot จากสมการที่ดีที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ ให้เลือก **custom**  
**function** แล้วใส่สมการที่ต้องการลงไปตามรูปแบบที่แสดงไว้ในหน้าต่างของ menu นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของ model ที่ใช้ใน RSM

| Source of variance | df                       | SS | MS | F |
|--------------------|--------------------------|----|----|---|
| <b>Model</b>       |                          |    |    |   |
| Linear             |                          |    |    |   |
| Quadratic          |                          |    |    |   |
| Cross product      |                          |    |    |   |
| <b>Residual</b>    | <b>Run regression</b>    |    |    |   |
| Lack of fit        | By difference            |    |    |   |
| Pure error         | Run glm เลือก option LOF |    |    |   |

$$Y = b_0 + b_1 * \text{linear term} + b_2 * \text{quadratic term} + b_3 * \text{cross product term}$$

$$H_0: b_0 = b_1 = b_2 = b_3 = 0$$

Ha: อย่างน้อย 1 เทอม ไม่เท่ากับ 0

Ho: ไม่มี Lack of fit

ถ้า model significant แสดงว่า model ที่สร้างไว้เหมาะสมดีแล้ว (ให้ดูว่า significant ที่ linear หรือ quadratic )

ถ้า lack of fit significant แสดงว่านอกจาก model ที่สร้างขึ้นแล้วยังมี model อื่นอาจจะเหมาะสมกว่า (เช่น อาจต้องใช้ third order model หรือ มีการแปลงข้อมูล data transformation)

### 2.8.9 การทดสอบ Lack of fit ของ RSM ใน SPSS ต้องทำโดยอ้อม คือ

1. run regression เพื่อหา residual SS (df1)
2. run proc glm เลือก option LOF เพื่อหาค่า pure error SS (df2)
3. LOF SS (df3) = residual ค่า df – pure error โดยที่ df3 = df1 – df2
4. นัยสำคัญของ LOF ทดสอบ โดย

$$F = \text{LOF MS} / \text{pure error ms} \text{ เทียบกับ F table ที่ df3 และ df2}$$

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีต่อการทำแช่ร้อนว่านหางจระเข้ โดยวิธีออสโมติก

##### 3.1.1 ศึกษาผลของการใช้สภาวะความดันบรรยากาศและความเข้มข้นของซูโครสไซรัป

การศึกษาประกอบด้วยการทำแช่ร้อนว่านหางจระเข้ในซูโครสไซรัปภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ กับภายใต้สภาวะความดันสูญญากาศ 400 และ 800 มิลลิบาร์ โดยมีความเข้มข้นของซูโครสไซรัปเริ่มต้นเข้มข้น 10, 37.5 และ 65 องศาบริกซ์ ที่เวลา 5, 10 และ 15 นาที ได้วัดลักษณะสำคัญที่มีผลกระทบต่อการทำว่านหางจระเข้แช่ร้อน คือ ค่าปริมาณการสูญเสียน้ำหลังการแช่ (Water loss, WL), ค่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งหลังการแช่ (Solid gain, SG), ค่าความสว่าง ( $L^*$ ), เปอร์เซ็นต์การหดตัว และการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture)

##### 3.1.2 ศึกษาผลของการใช้สภาวะความดันบรรยากาศและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

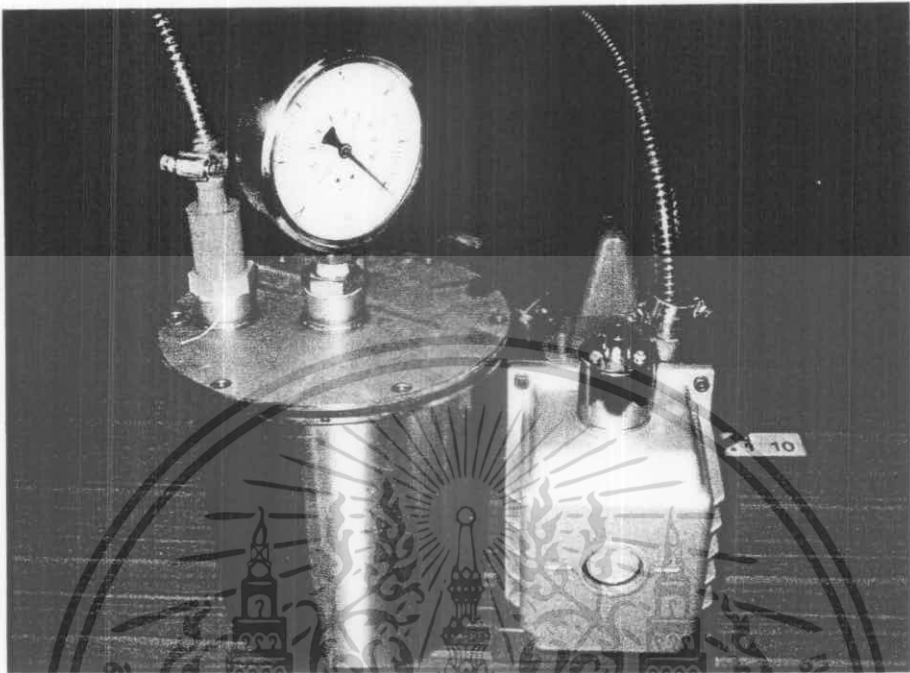
ด้วยการศึกษาที่การแช่ในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ กับภายใต้สภาวะความดันสูญญากาศ 400 และ 800 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ เริ่มต้นเข้มข้น 0.1, 1.55 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำ ที่เวลา 1, 5.5 และ 10 นาที โดยทำการตรวจสอบลักษณะสำคัญที่มีผลต่อการทำแช่ร้อนว่านหางจระเข้ เช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น

#### 3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

- 1) ว่านหางจระเข้พันธุ์บาร์บาเดนซิส ได้รับการสนับสนุนจาก หจก.บางกอก อโกล
- 2) น้ำตาลทรายขาว
- 3) แคลเซียมคลอไรด์
- 4) น้ำรีเวิร์ทออสโมซิส หรือ น้ำ RO

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 1) ชุดเครื่องควบคุมความดัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดควบคุมความดัน

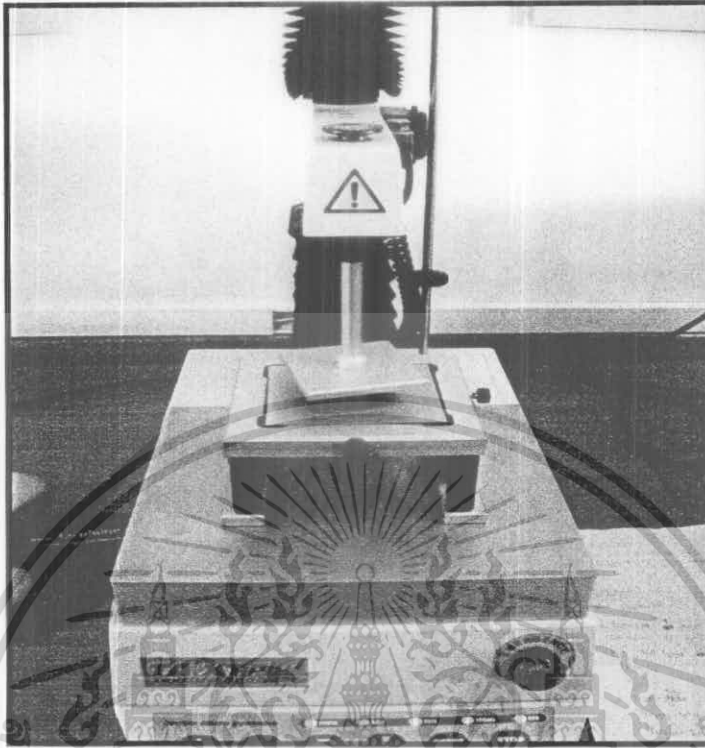
#### 2) Hot air oven (Memmert, Germany) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Hot air oven

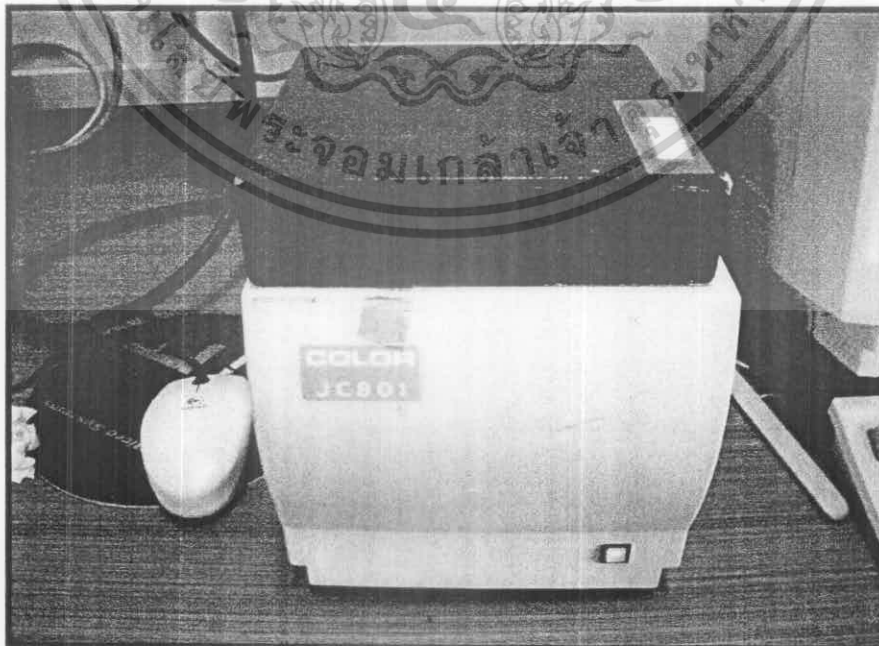
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Texture analyzer (TA.XT.plus, Stable Micro System, UK) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Texture Analysis.

4) เครื่อง Colorimeter Colorimeter (TRI-STIMULUS model Color J.C. 801, Japan) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) Digital Refractometer ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Digital Refractometer

## 6) Pycnometer ขนาด 25ml



รูปที่ 3.6 Pycnometer ขนาด 25 ml

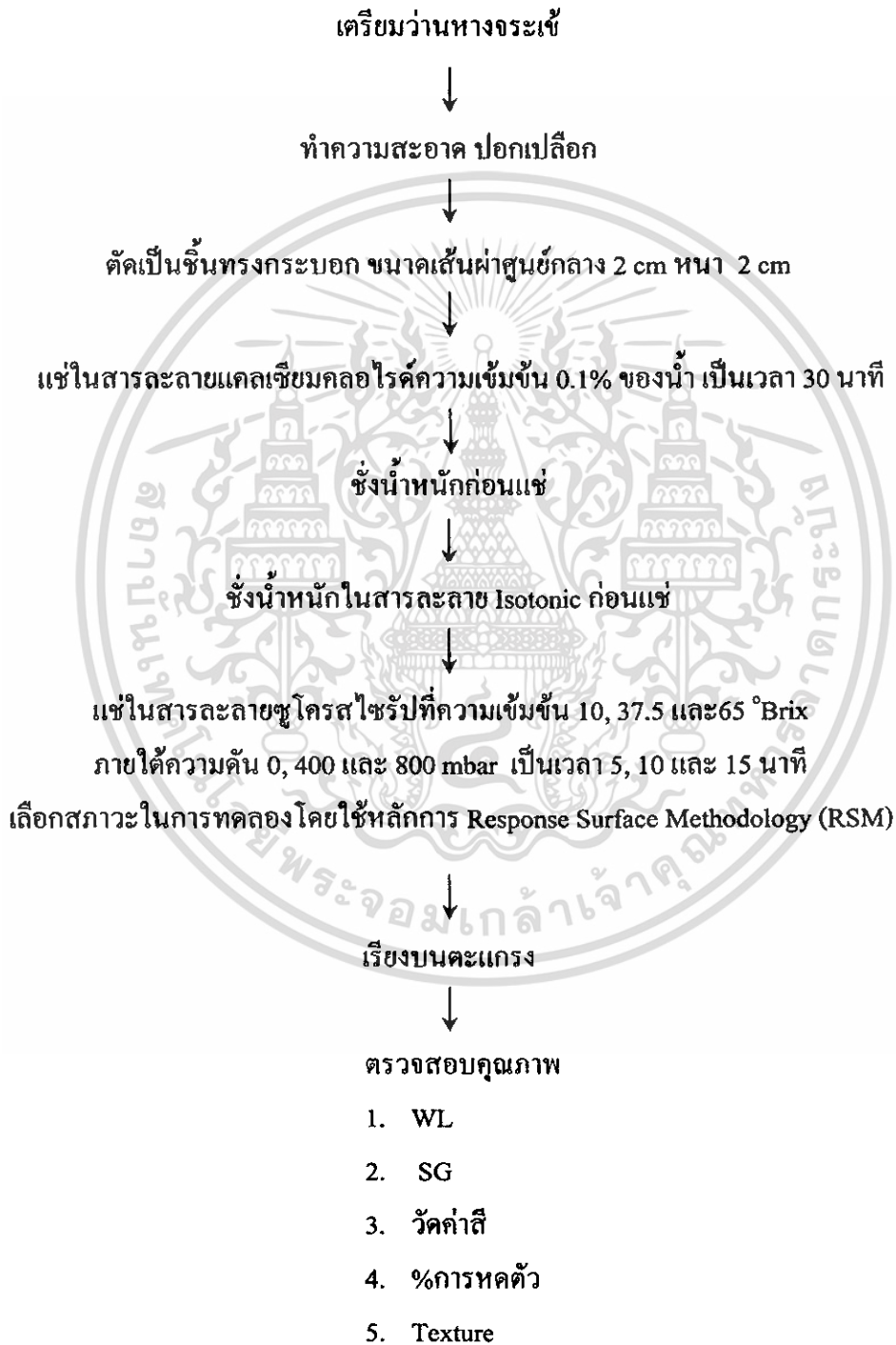
- 7) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์
- 8) บีกเกอร์ ขนาด 2000 ml 2 ใบ ขนาด 1000 ml 4 ใบ
- 9) Plate สำหรับใส่ชิ้นตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการและวิธีการทดลอง

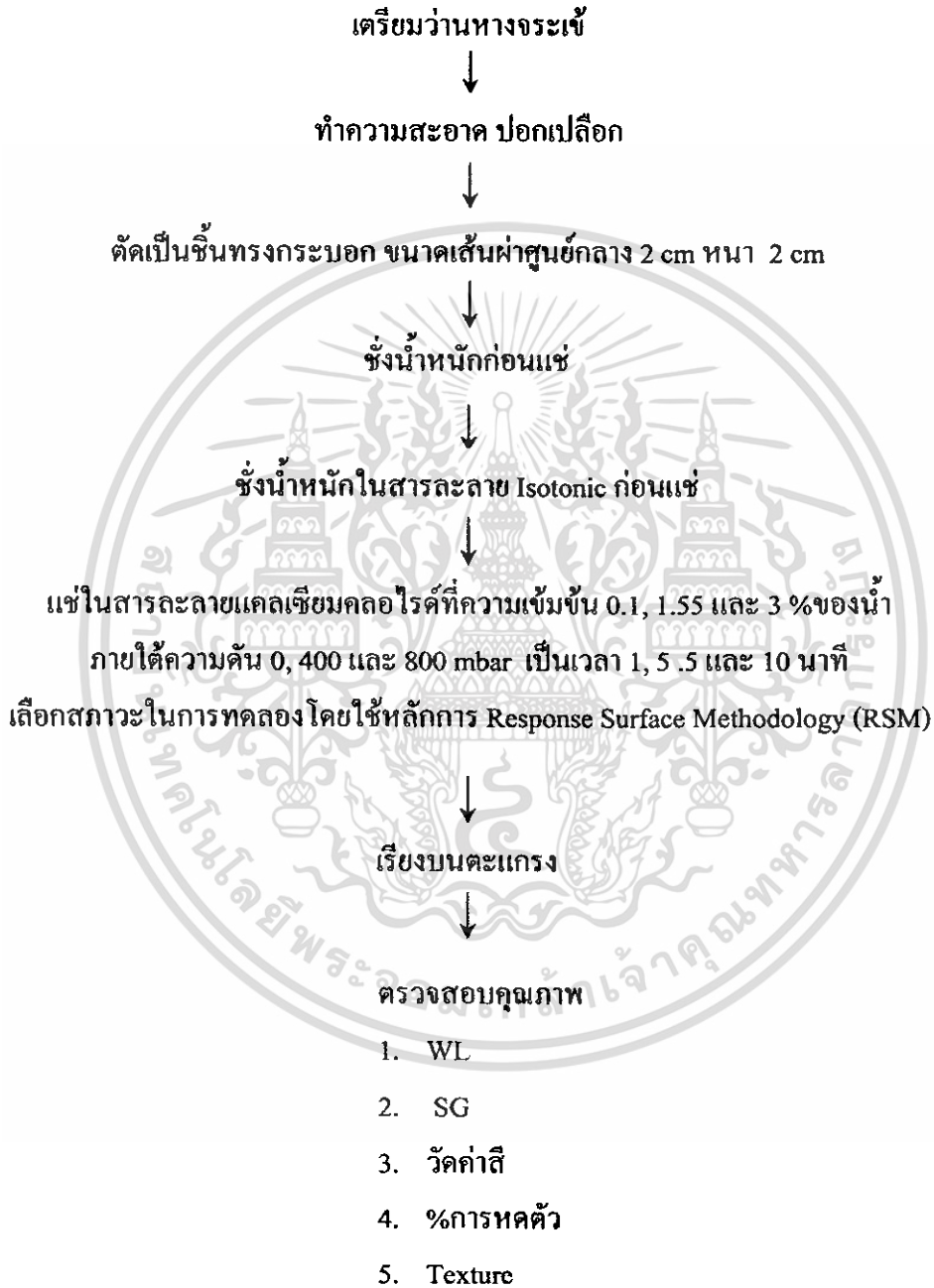
#### 3.4.1 ศึกษาผลของการใช้สุญญากาศในการเชื่อมวุ้นหางจรเข้

ตอนที่ 1 ผลของสภาวะความดันบรรยากาศและความเข้มข้นของซูโครสไซรัปที่ใช้ในการเชื่อมด้วยวิธีออสโมติก โดยมีขั้นตอนการดำเนินการและวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลองการทำแช่เชื่อมโดยวิธีใช้สุญญากาศก่อนการแช่เชื่อมโดยใช้ซูโครสไซรัป  
เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 ผลของสภาวะความดันบรรยากาศและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ก่อนการแช่หุ้มด้วยวิธีออสโมติก โดยมีขั้นตอนการดำเนินการและวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดลองการใช้สภาวะการแช่หุ้มร่วมกับการใช้แคลเซียมคลอไรด์ก่อนการแช่หุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การเตรียมชิ้นวุ้นทางจระเข้

เลือกวุ้นทางจระเข้พันธุ์บาร์บาเคนซิส ปอกเปลือก ผ่าและหั่นเป็นชิ้นเท่า ๆ กัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 เซนติเมตร สูง 2.00 เซนติเมตร

### 3.4.3 การเตรียมซูโครสไซรัป และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

เตรียมน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 10, 37.5 และ 65 °Brix (ปริมาณน้ำตาลและน้ำที่ใช้ แสดงไว้ในภาคผนวก) โดยการตั้งหม้อสำหรับต้วยวุ้นเตา เดมน้ำและน้ำตาลในส่วนที่เตรียมไว้ส่วน หนึ่งแล้วเชื่อมด้วยไฟปานกลางจนกระทั่งน้ำตาลละลายแล้วจึงค่อย ๆ เดมน้ำและน้ำตาลในส่วนที่ เหลือโดยคอยตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำเชื่อมหรือซูโครสไซรัปด้วย Digital refractometer เป็น ระยะ ๆ จนกระทั่งได้ความเข้มข้นตามต้องการ

เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1, 1.55 และ 3 % ของน้ำ โดยการละลายสารแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำตามความเข้มข้นที่ต้องการ

### 3.4.4 การแช่ในซูโครสไซรัป

นำชิ้นวุ้นทางจระเข้ที่เตรียมไว้ แช่ในซูโครสไซรัป โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามี ดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของซูโครสไซรัป 3 ระดับ คือ ที่ความเข้มข้น 10, 37.5 และ 65 °Brix โดยทำการทดลองที่ 3 สภาวะ คือ สภาวะที่ 1 และ 2 ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ความดัน 400 และ 800 มิลลิบาร์) สภาวะที่ 3 ที่ความดันบรรยากาศปกติ
- 2) ที่สภาวะที่ 1 และ 2 ทำการแช่วุ้นทางจระเข้ ภายใต้สภาวะความดัน 400 และ 800 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยสุ่มชิ้นตัวอย่างมาวัดค่าตัวแปรเป้าหมาย
- 3) ที่สภาวะที่ 3 ทำการแช่ชิ้นวุ้นทางจระเข้ที่สภาวะบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยสุ่มชิ้นตัวอย่างมาวัดค่าตัวแปรเป้าหมาย
- 4) ตัวแปรเป้าหมายที่ทำการวัดค่ามีดังนี้ ปริมาณการสูญเสียน้ำและปริมาณของแข็งที่ เพิ่มขึ้น (WL / SG) วัดค่าสี (Colrimeter) เปอร์เซ็นต์การหดตัว และเนื้อสัมผัส (Texture)

### 3.4.5 การแช่ในแคลเซียมคลอไรด์

นำชิ้นวุ้นทางที่เตรียมไว้ มาทำการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดย กำหนดตัวแปรดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มี 3 ระดับ คือ ที่ 0.1, 1.55 และ 3% ของน้ำ โดยทำการทดลองที่ 3 สภาวะเช่นเดียวกันคือ สภาวะสุญญากาศ (ความดัน 400 และ 800 mbar) และที่ความดันปกติ
- 2) ที่สภาวะที่ 1 และ 2 ทำการแช่วุ้นทางจระเข้ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ภายใต้ สภาวะความดัน 400 และ 800 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 1, 5.5 และ 10 นาที โดยสุ่มชิ้นตัวอย่างมาวัดค่าตัวแปรเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ที่สภาวะที่ 3 ทำการแช่ขึ้นวุ้นทางจระเข้ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สภาวะบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 1, 5.5 และ 15 นาที โดยสุ่มขึ้นตัวอย่างมาวัดค่าตัวแปรเป้าหมาย
- 4) ตัวแปรเป้าหมายที่ทำการวัดค่าเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น

### 3.5 การเลือกใช้หลักการ Response Surface Methodology (RSM)

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่ขึ้น สำหรับ ชูโครส ไซรป์

| Run no. | Code level                                 |                |                        |
|---------|--|----------------|------------------------|
|         | ความเข้มข้นของ<br>สารละลาย<br>(องศาบริกซ์) | เวลา<br>(นาที) | ความดัน<br>(มิลลิบาร์) |
| 1       | 10   | 5              | 400                    |
| 2       | 10   | 15             | 400                    |
| 3       | 65   | 5              | 400                    |
| 4       | 65   | 15             | 400                    |
| 5       | 10   | 10             | 0                      |
| 6       | 10   | 10             | 800                    |
| 7       | 65   | 10             | 0                      |
| 8       | 65   | 10             | 800                    |
| 9       | 37.5                                       | 5              | 0                      |
| 10      | 37.5                                       | 5              | 800                    |
| 11      | 37.5                                       | 15             | 0                      |
| 12      | 37.5                                       | 15             | 800                    |
| 13      | 37.5                                       | 10             | 400                    |
| 14      | 37.5                                       | 10             | 400                    |
| 15      | 37.5                                       | 10             | 400                    |

ในการวางแผนการทดลองได้เลือกใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design จากตารางที่ 2.5 ซึ่งแผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 โดย A คือ ความเข้มข้นของสารละลาย B คือ เวลาที่ใช้ C คือ ความดันที่ใช้ สำหรับการใส่ชูโครสไซรป์ +1 คือ ค่าสูงสุด ให้  $A=65^{\circ}\text{Brix}$ ,  $B = 15$  นาที และ  $C = 800$  mbar 0 คือ ค่ากลาง ให้  $A=37.5^{\circ}\text{Brix}$ ,  $B = 10$  นาที และ  $C = 400$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mbar และ -1 คือ ค่าต่ำสุด ให้  $A=10^{\circ}\text{Brix}$ ,  $B = 5$  นาที และ  $C = 0$  mbar และสำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ +1 คือ ค่าสูงสุด ให้  $A=3\%$  ของน้ำ,  $B = 10$  นาที และ  $C = 800$  mbar 0 คือ ค่ากลาง  $A=1.55\%$  ของน้ำ,  $B = 5$  นาทีครึ่ง และ  $C = 400$  mbar -1 คือ ค่าต่ำสุด  $A=0.1\%$  น้ำ,  $B = 1$  นาที และ  $C = 0$  mbar

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองการหาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้สูญญากาศก่อนการแช่แข็ง สำหรับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

| Run no. | Code level                       |             |                     |
|---------|----------------------------------|-------------|---------------------|
|         | ความเข้มข้นของสารละลาย (%ของน้ำ) | เวลา (นาที) | ความดัน (มิลลิบาร์) |
| 1       | 0.1                              | 1           | 400                 |
| 2       | 0.1                              | 10          | 400                 |
| 3       | 3                                | 1           | 400                 |
| 4       | 3                                | 10          | 400                 |
| 5       | 0.1                              | 5.30        | 0                   |
| 6       | 0.1                              | 5.30        | 800                 |
| 7       | 3                                | 5.30        | 0                   |
| 8       | 3                                | 5.30        | 800                 |
| 9       | 1.55                             | 1           | 0                   |
| 10      | 1.55                             | 1           | 800                 |
| 11      | 1.55                             | 10          | 0                   |
| 12      | 1.55                             | 10          | 800                 |
| 13      | 1.55                             | 5.30        | 400                 |
| 14      | 1.55                             | 5.30        | 400                 |
| 15      | 1.55                             | 5.30        | 400                 |

ดังนั้นจะมีหน่วยทดลอง คือ 15 หน่วย และทำการทดลอง 2 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมดคือ 30 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างได้ทำการใส่ชิ้นวานหางกระเซ้ 10 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่างแช่ในซูโครสไซรัป และแคลเซียมคลอไรด์ แล้วนำไปวัดค่า WL และ SG 4 ชั้น ค่าสี 2 ชั้น เปอร์เซ็นต์การหดตัว 2 ชั้น และ ค่าเนื้อสัมผัส 2 ชั้น

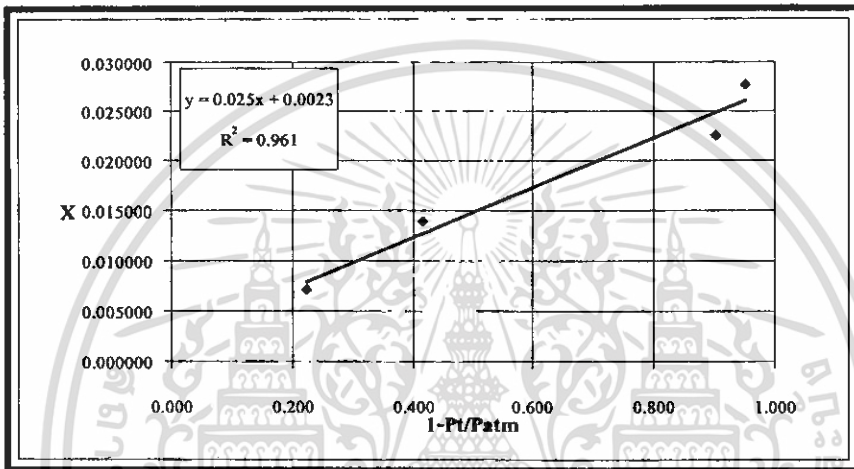
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวุ้นหางจรเข้

##### 4.1.1 การหาความเป็นรูพรุนวุ้นหางจรเข้ (Porosity) คูตารางบันทึกผลที่ภาคผนวก



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของปริมาณของสารละลาย(X) กับ 1-Pi/Patm

จากสมการที่ 2.12  $X = \frac{M_i - M_o}{\rho \cdot V_o} = D \cdot \left(1 - \frac{P_i}{P_{atm}}\right) + X_o$  เราจะได้ค่า  $D$  และ  $X_o$  จาก

สมการ ในรูปที่ 4.1  $y = 0.025x + 0.0023$  ซึ่ง  $D = 0.025$  และ  $X_o = 0.0023$  แทนค่า  $D$  และ  $X_o$  ลง

ในสมการที่ 2.14  $\epsilon_o = D + X_o \cdot \frac{P_{atm}}{(P_{atm} - P_i)}$  เพื่อหาค่าความเป็นรูพรุน จากการคำนวณจะได้ค่า

ความเป็นรูพรุนอยู่ในช่วง 2.74-3.53 %

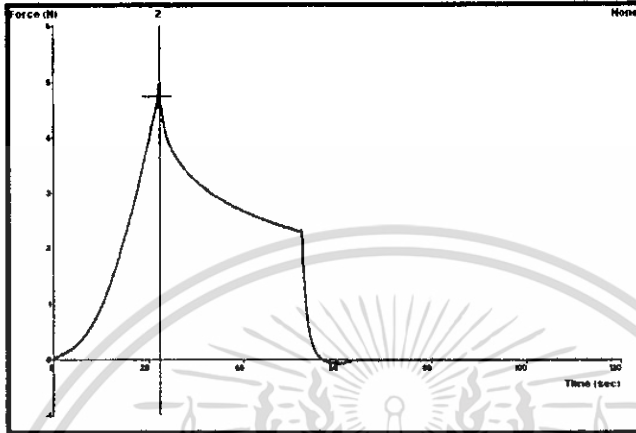
##### 4.1.2 ความหนาแน่นเนื้อ (Solid density)

จากสมการที่ 2.16 มวลชิ้นวุ้นหางจรเข้ = 3.69 g ปริมาตรของชิ้นวุ้นหางจรเข้ = 3.63 cm<sup>3</sup> (ได้จากการทดลอง) เพราะฉะนั้น ความหนาแน่นเนื้อวุ้นหางจรเข้มีค่าเท่ากับ 1.017 g/cm<sup>3</sup>

##### 4.1.3 ค่าความสว่าง (Translucent, L\*)

ค่าความสว่างสามารถทำการวัดและอ่านค่าได้จากเครื่องวัดสี ซึ่งชิ้นวุ้นหางจรเข้สดมีค่าเท่ากับ 33.90 แสดงว่าวุ้นหางจรเข้มีความขุ่นมัวเนื่องจากมีค่าแวน โนม์ ไกลด์ 0 มากกว่า

4.1.4 เนื้อสัมผัส (Texture, Average firmness) ค่า Average Firmness เป็นค่าความชันของกราฟในช่วง 1-2 ของกราฟ สามารถหาได้จากการนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง Texture Analysis มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Texture Exponent 32 ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะมีค่า Average firmness เฉลี่ย เท่ากับ 1.143 N/mm



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสเมื่อถูกกด โดยเครื่อง Texture Analysis

#### 4.1.5 ค่าความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.17 เมื่อทำการคำนวณค่าเราจะได้ค่าความชื้นเท่ากับ 99.12%

### 4.2 ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายซูโครสการทำแช่หมักน้ำตาลจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่หมัก

#### 4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชิ้นน้ำตาลจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่หมัก

พิจารณากราฟคอนทัวร์ที่ได้ทั้ง 3 กราฟจะเห็นว่ารูปที่ 4.3 ก. จะมีปริมาณการสูญเสียน้ำในชิ้นน้ำตาลจระเข้มากที่สุดที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 30 °Brix เป็นต้นไป รูปที่ 4.3 ข. มีปริมาณการสูญเสียน้ำน้อยที่สุดประมาณช่วง 10-15 นาที ที่ความเข้มข้นช่วง 10-30 °Brix และรูปที่ 4.3 ค. พบว่ามีปริมาณการสูญเสียน้ำน้อยสุดในช่วง 4-10 นาที ที่ความเข้มข้นประมาณช่วง 30 °Brix ดังนั้นผลที่ได้จากกราฟคอนทัวร์ช่วงที่ดีที่สุดคือช่วงที่มีปริมาณการสูญเสียน้ำน้อยสุดควรจะเป็นช่วง 10 นาที ที่ความเข้มข้นประมาณ 30 °Brix

#### 4.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชิ้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่ อื่น

พิจารณากราฟคอนทัวร์ที่ได้ทั้ง 3 กราฟจะเห็นว่ารูปที่ 4.4 ก. จะมีปริมาณความแข็งที่เพิ่มขึ้นในชิ้นว่านหางจระเข้มากที่ความเข้มข้นประมาณ 0-10 และ 30-70 °Brix ในทุกๆช่วงความดัน รูปที่ 4.4 ข. พบว่ามีปริมาณความแข็งที่เพิ่มขึ้นในชิ้นว่านหางจระเข้มากที่สุดที่ช่วง 10-15 นาที ที่ความเข้มข้นประมาณช่วง 60-70 °Brix และรูปที่ 4.4 ค. มีปริมาณความแข็งที่เพิ่มขึ้นในชิ้นว่านหางจระเข้มากที่สุดประมาณช่วง 4-6 และ 10-15 นาที ที่ทุกๆช่วงความดัน ดังนั้นผลที่ได้จากกราฟคอนทัวร์น่าจะสรุปได้ว่า ช่วงที่ดีที่สุดคือช่วงที่มีปริมาณความแข็งที่เพิ่มขึ้นมากสุดในชิ้นว่านหางจระเข้ น่าจะเป็นช่วงเวลา 10-15 นาที ที่ความเข้มข้นประมาณ 30-70 °Brix

#### 4.2.3 เฟอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่ อื่น

พิจารณากราฟคอนทัวร์ที่ได้ทั้ง 3 กราฟจะเห็นว่ารูปที่ 4.5 ก. จะมีปริมาณการหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-30 °Brix ในช่วงความดัน 300 mbar ขึ้นไป รูปที่ 4.5 ข. พบว่ามีปริมาณการหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ที่ช่วงสั้นๆประมาณช่วง 4-8 นาที ที่ความเข้มข้นช่วง 10 °Brix และรูปที่ 4.5 ค. พบว่ามีปริมาณการหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ใน ช่วง 4 นาที ที่ความดันประมาณทุกๆช่วง ดังนั้นผลที่ได้จากกราฟคอนทัวร์น่าจะสรุปได้ว่า ช่วงที่ดีที่สุดคือช่วงที่มีปริมาณการหดตัวน้อยสุดในชิ้นว่านหางจระเข้ น่าจะเป็นช่วง 4-5 นาที ที่ความเข้มข้นประมาณ 10 °Brix

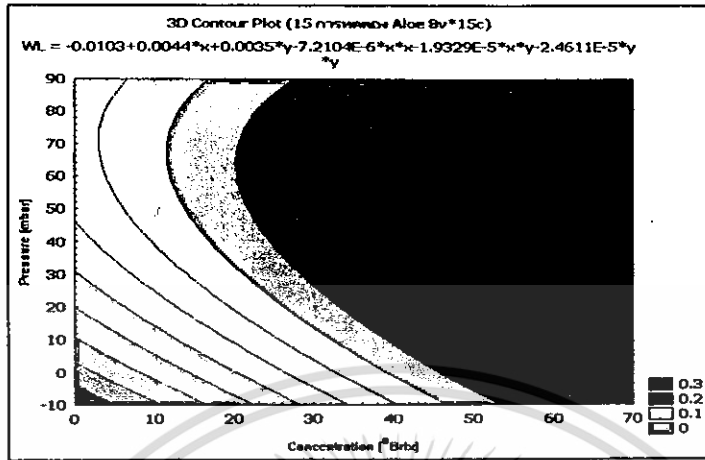
#### 4.2.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของชิ้นว่านหางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศก่อนการแช่ อื่น

พิจารณากราฟคอนทัวร์ที่ได้ทั้ง 3 กราฟจะเห็นว่ารูปที่ 4.6 ก. จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีในชิ้นว่านหางจระเข้มากที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-60 °Brix แต่พบว่า ณ ที่ 2 ช่วงความดันคือ ที่ 0-100 mbar และช่วง 700-900 mbar จากรูปที่ 4.6 ข. จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีในชิ้นว่านหางจระเข้มากในทุกๆช่วง นาที ที่ความดันช่วง 100-300 และ 600-900 mbar และรูปที่ 4.6 ค. พบว่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงสีในชิ้นว่านหางจระเข้มากในทุกช่วง ความเข้มข้นและทุกช่วงเวลา ดังนั้นผลที่ได้จากกราฟคอนทัวร์จึงยังคงไม่สามารถสรุปได้ว่าช่วงใดน่าจะเป็นช่วงที่ดีที่สุดที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุด

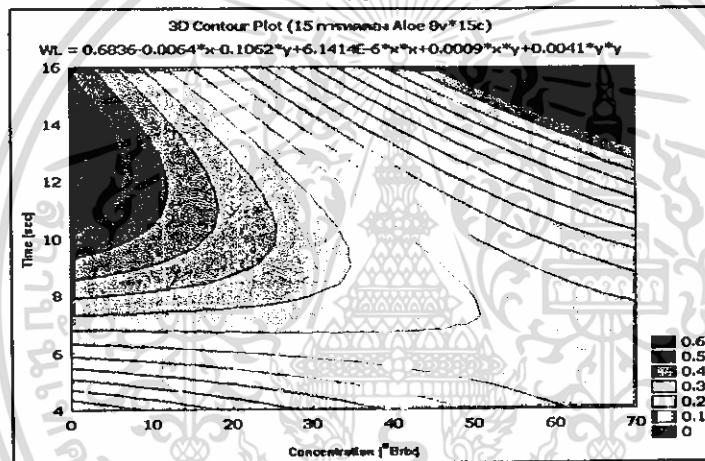
#### 4.2.5 การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส (Texture, Average Firmness) หลังการใช้สุญญากาศ ก่อนการแช่

พิจารณากราฟคอนทัวร์ที่ได้ทั้ง 3 กราฟจะเห็นว่ารูปที่ 4.7 ก. จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสหรือความแข็งในชิ้นว่านหางจระเข้มาก ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 30 °Brix เป็นต้นไป รูปที่ 4.7 ข. พบว่ามีค่าความแข็งมากในทุกช่วงเวลา ที่ความเข้มข้นประมาณช่วง 30-70 °Brix และรูปที่ 4.7 ค. มีค่าความแข็งมากในทุกช่วงเวลา ที่ความดันช่วง 0-200 mbar ดังนั้นผลที่ได้จากกราฟคอนทัวร์น่าจะสรุปได้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

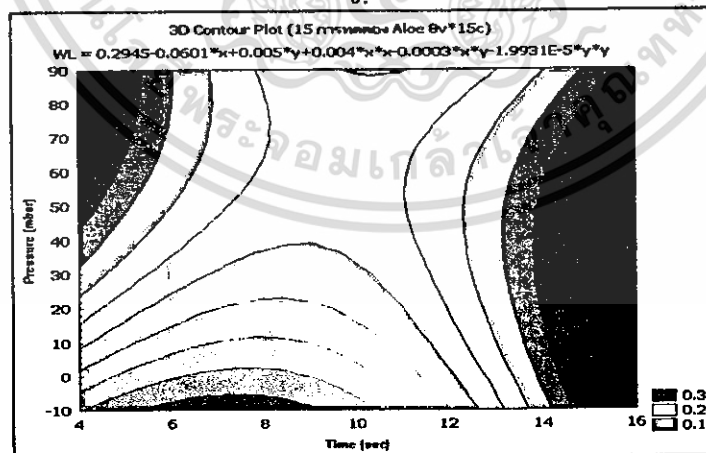
สรุปได้ว่า ช่วงที่คิดที่สุดคือช่วงที่มีค่าความเข้มมากที่สุด น่าจะเป็นช่วง 200 mbar ที่ความเข้มข้นประมาณ 30 °Brix



ก.



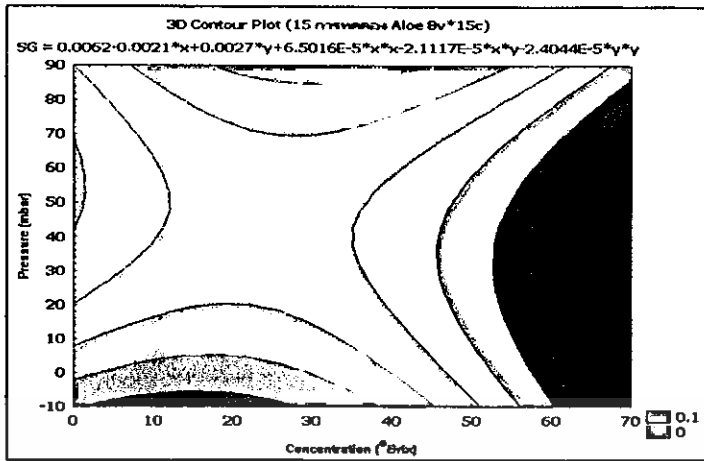
ข.



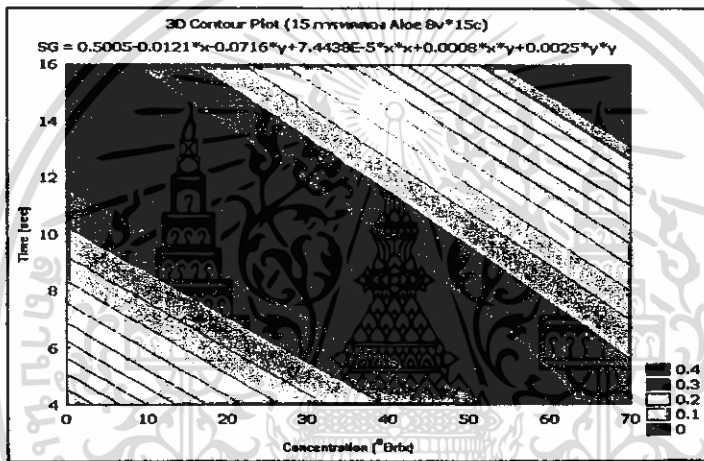
ค.

รูปที่ 4.3 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชิ้นว่านทางจระเข้หลังการใช้สุญญากาศเปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา

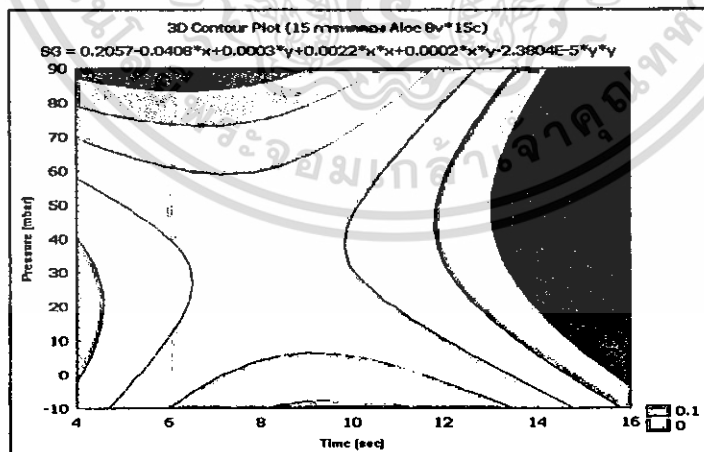
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.

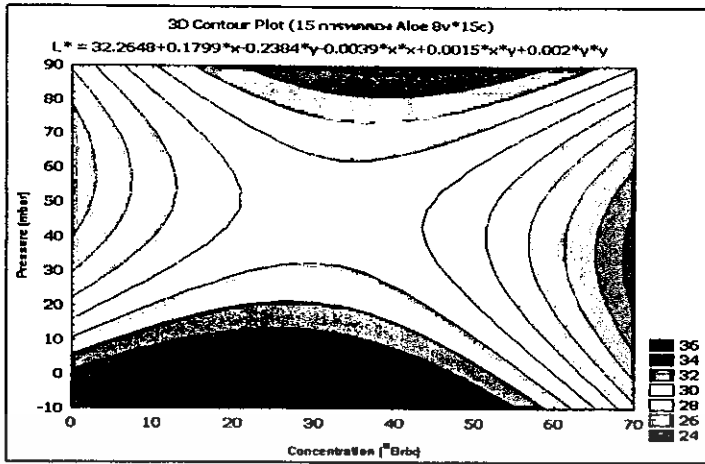


ค.

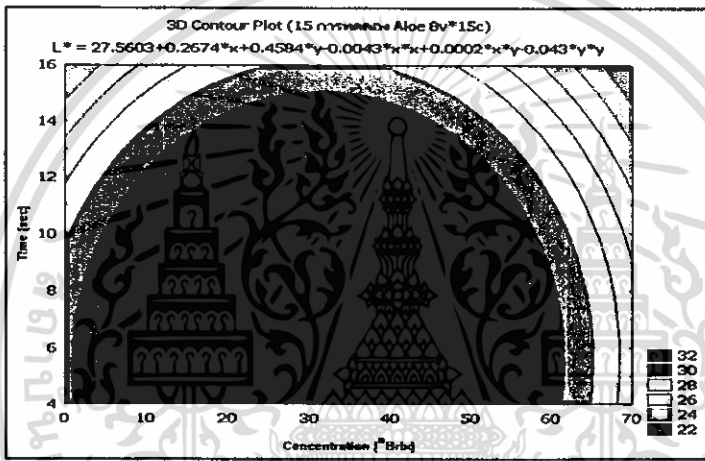
รูปที่ 4.4 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชีวน้ำทางจระเข้หลังการใช้  
 สูญญากาศเปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความ  
 ดันกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

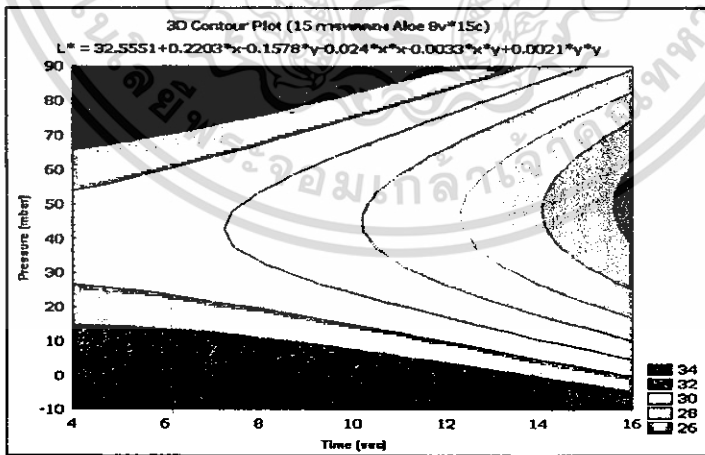




ก.



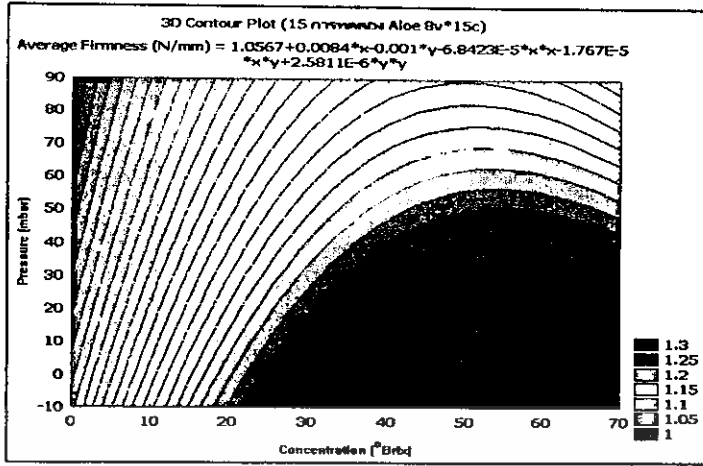
ข.



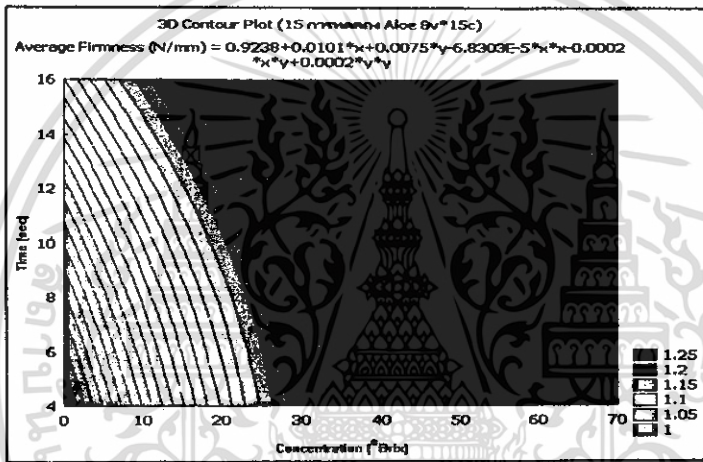
ค.

รูปที่ 4.6 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของชิ้นว่านทางระเข้หลังการใช้  
 สูญญากาศเปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความ  
 ดันกับเวลา

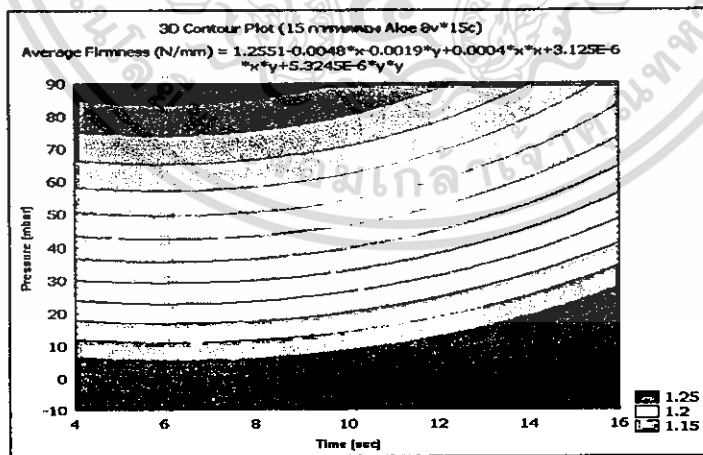
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 4.7 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส ของชิ้นว่านทางจระเข้หลังการใช้  
 สูญญากาศเปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความ  
 ดันกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้ สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

#### 4.3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ(Water Loss,WL)ของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในชิ้นว่านหางจระเข้ หลังการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สุญญากาศ ที่ อุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ จากรูปที่ 4.8 ก., ข. และ ค. เป็นแผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในชิ้นว่านหางจระเข้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความดันสูง (600 mbar ขึ้นไป) ความเข้มข้นของสารละลายสูง (1.5%ของน้ำ ขึ้นไป) และใช้เวลานาน (6 นาที ขึ้นไป) มีการสูญเสียน้ำมาก และที่ช่วงความดัน 300-700 mbar ความเข้มข้นสามารถเลือกได้ทุกช่วงความเข้มข้น และเวลาที่ใช้อยู่ในช่วง 1-6 นาที เป็นช่วงที่มีการสูญเสียน้ำน้อย ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ดีที่มีการสูญเสียน้ำน้อยที่สุด

#### 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

จากรูปที่ 4.9 ก., ข. และ ค. เป็นแผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งในชิ้นว่านหางจระเข้ หลังแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สุญญากาศ ที่ อุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างความดันกับความเข้มข้น, เวลากับความเข้มข้น และความดันกับเวลา ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ช่วงความดัน 0-800 mbar ความเข้มข้นช่วง 0.1- 2.0%ของน้ำ และช่วงเวลา 1-4 นาที และที่ 7 – 10 นาที ปริมาณของแข็งจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ดี ที่ปริมาณของแข็งเพิ่มมากที่สุด

#### 4.3.3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

เปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ หลังการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สุญญากาศ จากรูปที่ 4.10 ก., ข. และ ค. จะได้ว่า ที่ความดันช่วง 0- 600 mbar ความเข้มข้น ช่วง 0.1- 2.0 %ของน้ำ เวลาที่ใช้ช่วง 2-10 นาที เป็นช่วงที่มีการหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ น้อย ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ดีที่สุดที่มีการหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้ น้อยที่สุด

#### 4.3.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง(L\*) ของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

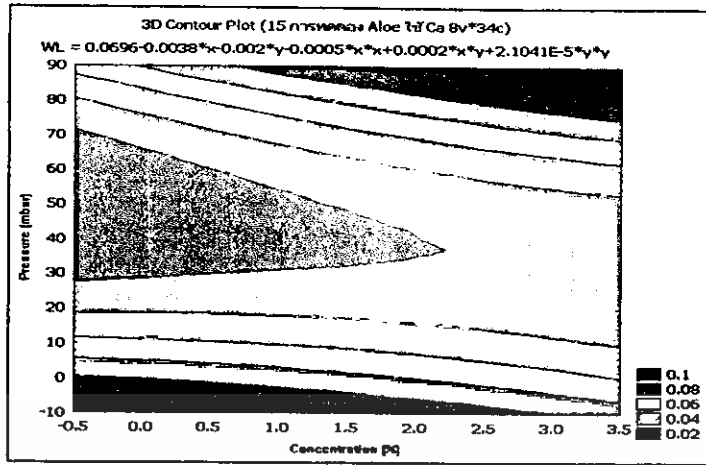
จากรูปที่ 4.11 ก., ข. และ ค. เป็นแผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของชิ้นว่านหางจระเข้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ช่วงความดัน 0- 600 mbar ใช้เวลาอยู่ในช่วง 1- 5 นาที ความเข้มข้นในช่วง 0.1- 3.0 %ของน้ำ เป็นช่วงที่มีค่าความสว่างมากที่สุด นั่นก็คือมีความใสมากในช่วงนี้ ดังนั้นช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่มีความสว่างหรือใสมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

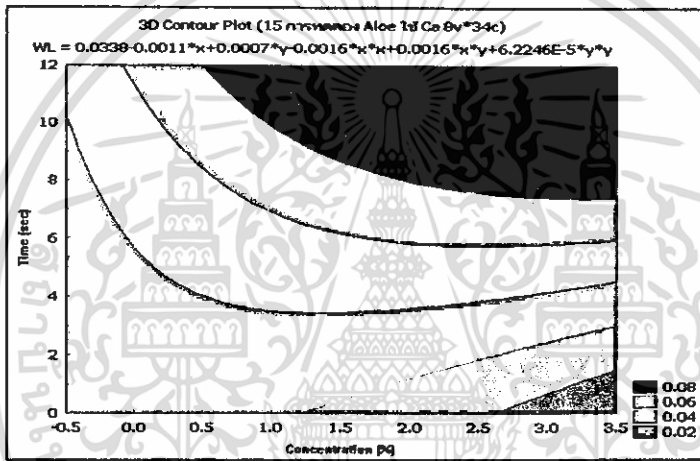
#### 4.3.5 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture, Average Firmness) สำหรับการใส่สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่แข็ง

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส โดยเน้นในเรื่อง Average Firmness หรือค่าความแข็ง หลังจากแช่ในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สุญญากาศ จากรูปที่ 4.12 ก., ข. และ ค. เป็นแผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลง Average Firmness ของชิ้นว่านหางจระเข้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความดัน 0- 800 mbar ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1- 1.0 % ของน้ำ และเวลาที่ใช้อู่ในช่วง 5- 10 นาที เป็นช่วงที่ทำให้ชิ้นว่านหางจระเข้มีความแข็งมากที่สุด และที่ช่วงความดัน 0-800 mbar ความเข้มข้นในช่วง 1.0 – 3.0 % ของน้ำ และเวลาที่ใช้อู่ในช่วง 1- 5 นาที จะทำให้ชิ้นว่านหางจระเข้มีความอ่อนตัวลงตัวอย่างชิ้นว่านหางจระเข้ที่ดี และเหมาะสมในการนำไปทำแช่แข็งว่านหางจระเข้ควรมีลักษณะที่แข็ง เพื่อที่จะสามารถคงตัวอยู่ในลักษณะที่ดี

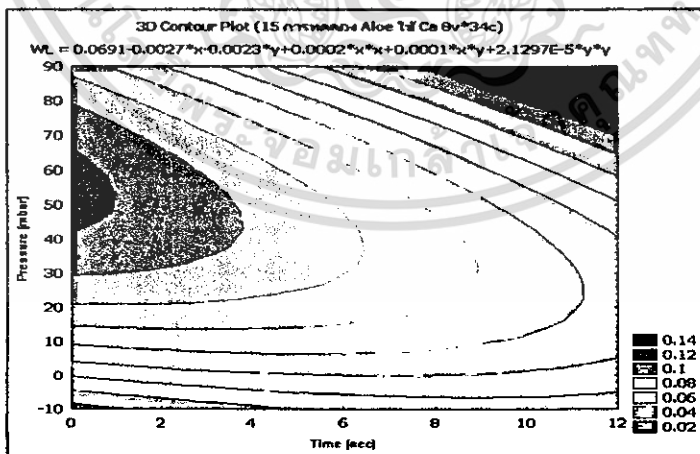




ก.



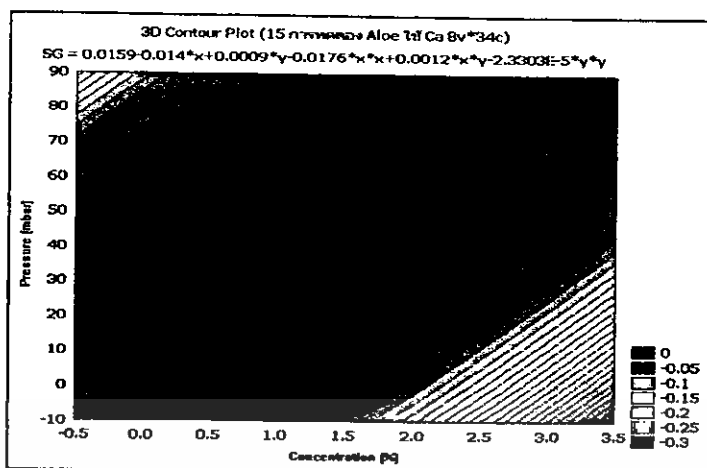
ข.



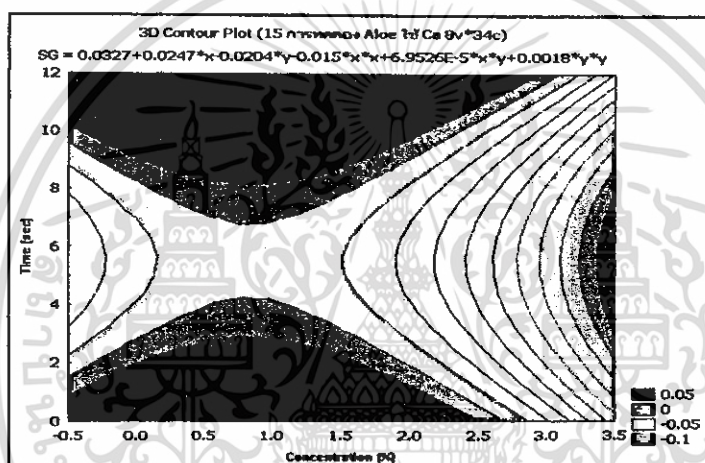
ค.

รูปที่ 4.8 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชิ้นว่านทางจระเข้สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่อิม เปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา

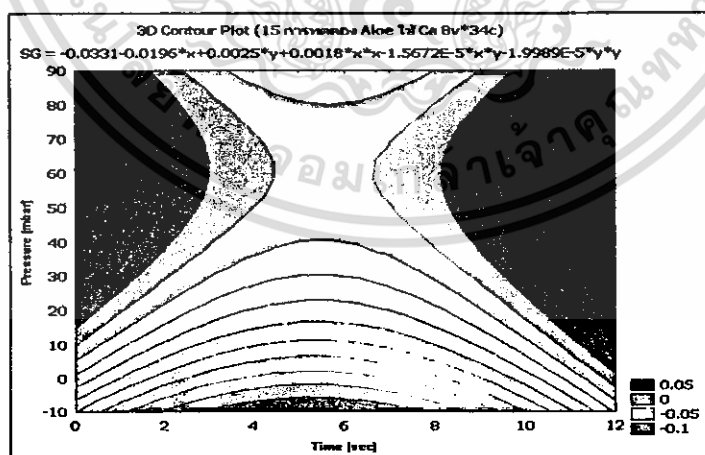
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.

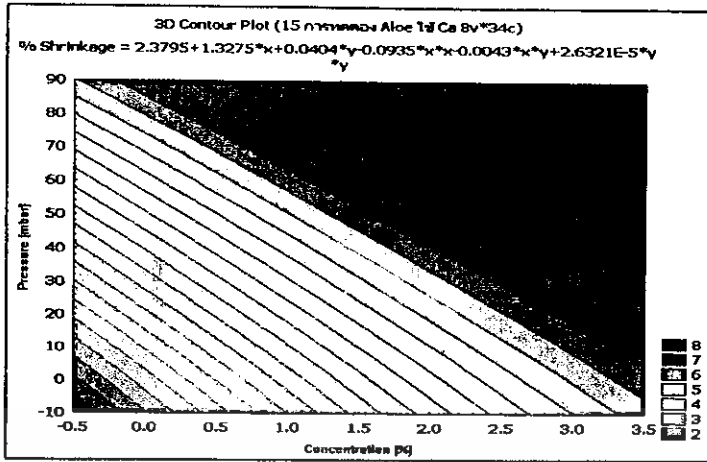


ข.

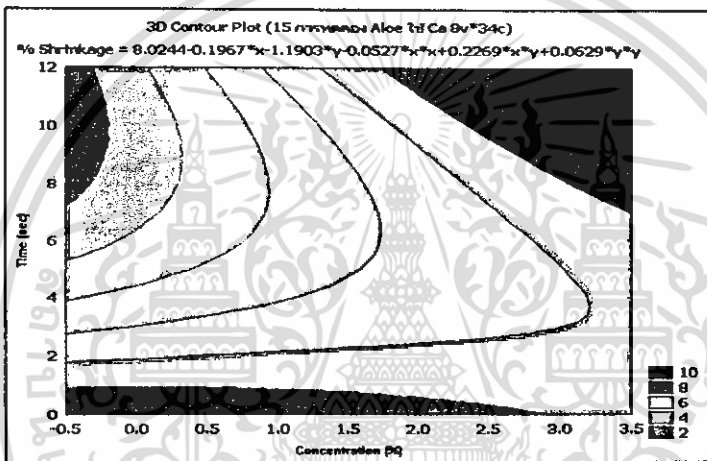


ค.

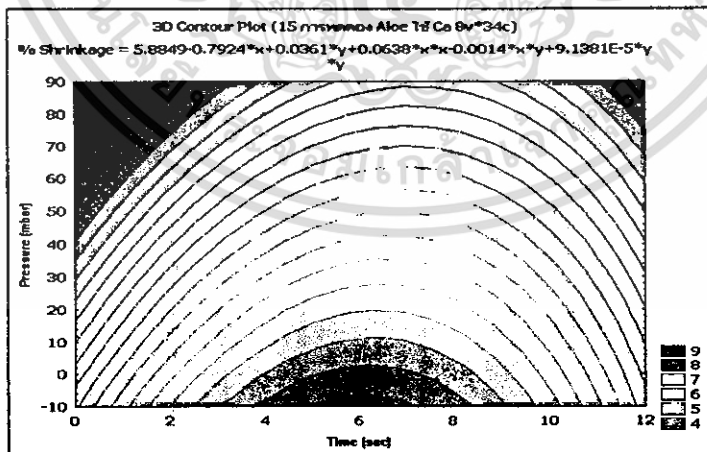
รูปที่ 4.9 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งของรีนัวร์ทางกระเซ้สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สูญญากาศก่อนการทำเซอิม เปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.

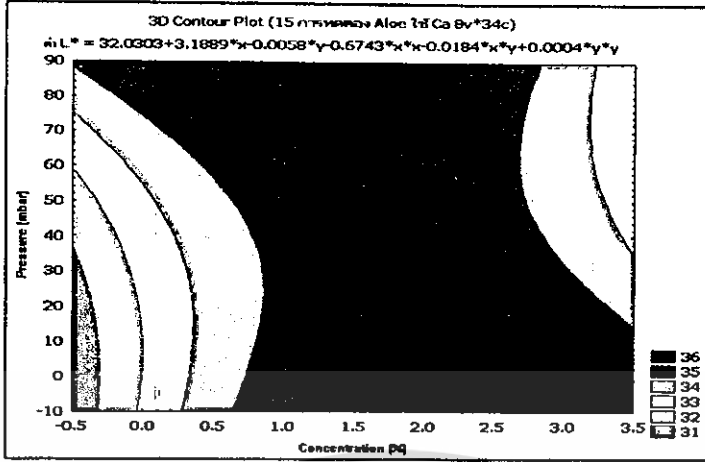


ข.

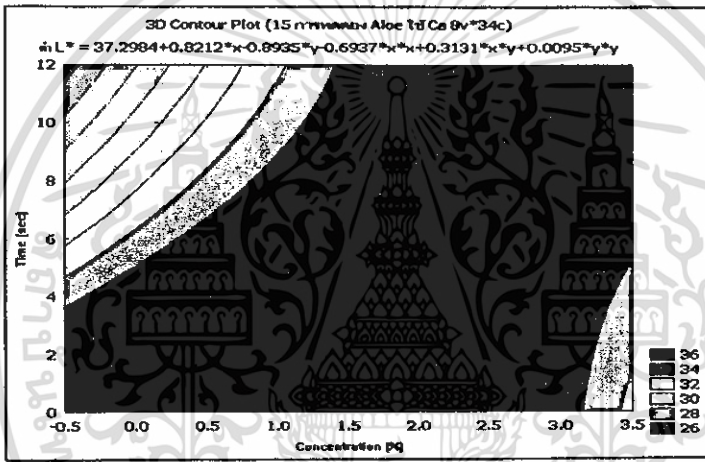


ค.

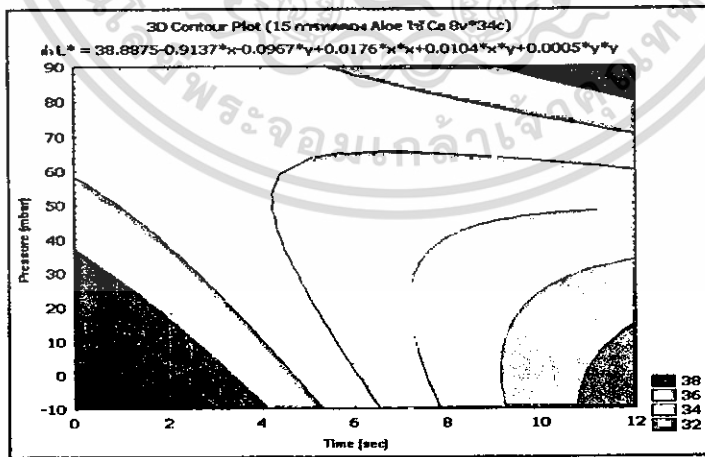
รูปที่ 4.10 แผนภาพคอนทัวร์แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่อิม เปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



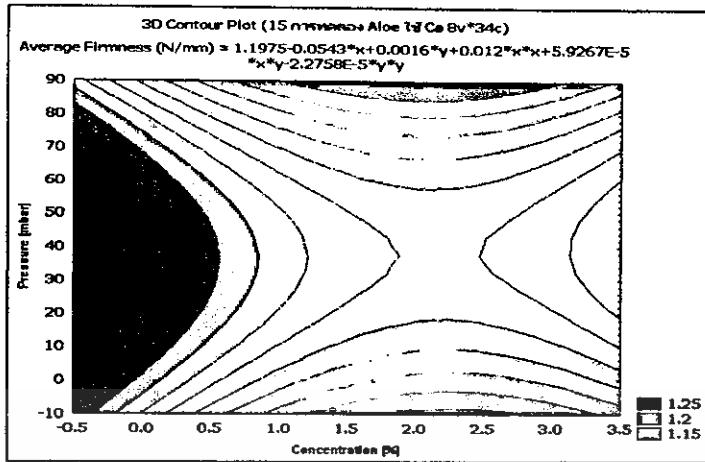
ข.



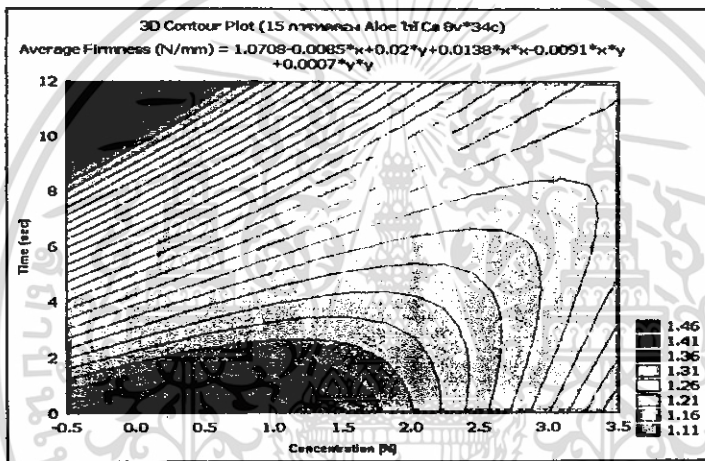
ค.

รูปที่ 4.11 แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของชิ้นว่านหางจระเข้สำหรับการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำแช่อิม เปรียบเทียบกับระหว่าง ก. ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา

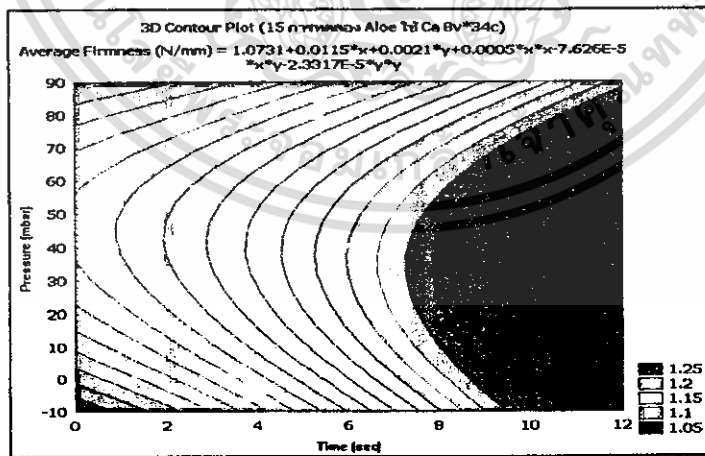
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 4.12 แผนภาพคอนทัวร์แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Average Firmness) สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หลังการใช้สุญญากาศก่อนการทำเซอิมเปริชกับที่ขบกับระหว่าง ก.

ความดันกับความเข้มข้น ข. เวลากับความเข้มข้น และ ค. ความดันกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการเชื่อมว่านทางจระเข้และประเมินความ เป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง

### 5.1 แนวคิดในการออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการเชื่อมว่านทางจระเข้

แนวคิดดังกล่าวนี้เป็นแนวคิดที่คิดขึ้นมาเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ทุกอย่างในระบบสุญญากาศ  
ในระหว่างที่ทำการเชื่อมว่านทางจระเข้เพื่อที่จะสามารถทำให้ระบบของการใช้สุญญากาศหรือ มี  
ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับการดำเนินการในอุตสาหกรรมขนาดกลางในปัจจุบันนี้และ  
อนาคตต่อไป สำหรับในอุตสาหกรรมขนาดกลางในขณะนี้จะเห็นได้ว่าได้มีการพัฒนาเครื่องมือ  
และเทคโนโลยีต่างๆขึ้นมาอย่างมากมาทั้งนี้เพราะมีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้อุปกรณ์ที่มี  
คุณภาพออกสู่ท้องตลาดเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคได้อย่างหลากหลาย และก็เป็นแนวคิดที่จะลด  
ต้นทุนในการปฏิบัติงานของแต่ละขั้นตอนลง อาทิ เช่น เวลา, พื้นที่ในการทำงาน, อัตราค่าแรงของ  
คนงาน, การให้เครื่องจักรทำงานแทนคน และมีประสิทธิภาพดีมากกว่า ดังนั้น ผู้ทำการทดลองจึงได้  
มีแนวคิดที่จะพัฒนาและออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศระหว่างการทำเชื่อมว่านทางจระเข้เพื่อ  
นำไปสู่การมีผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเป็นที่นิยมนยอมรับของผู้บริโภค

### 5.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศก่อนการเชื่อมว่านทางจระเข้

#### 5.2.1 ปัจจัยและเงื่อนไขในการออกแบบ

##### 1. Function ของอุปกรณ์

- สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำเชื่อมให้คงที่
- มีเทอร์โมมิเตอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิของน้ำเชื่อมในถึงความดัน
- สามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำเชื่อมได้
- ปรับค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อมได้โดยใช้วิธีเติมเป็นช่วง

##### 2. ความสามารถของอุปกรณ์

- ถึงความดันออกแบบให้สามารถรองรับปริมาณว่านทางจระเข้ได้ 100 กิโลกรัม
- ถึงน้ำเชื่อมสามารถรองรับปริมาณน้ำเชื่อมได้ปริมาณ 3 เท่าของน้ำหนักว่าน  
ทางจระเข้
- ถึงเป็นวัสดุที่สามารถทนแรงดันและความร้อนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.2 การออกแบบถังสูญญากาศ

### 1. ขนาดถัง

ได้ทำการออกแบบถังน้ำเชื่อมและถังความดันให้มีความสามารถที่จะรองรับน้ำหนักของวุ้นหางจระเข้ได้ประมาณ 100 กิโลกรัม รวมถึงน้ำหนักของน้ำเชื่อมเป็นปริมาณ 3 เท่าของน้ำหนักวุ้นหางจระเข้เข้าด้วย ทั้งนี้ถังที่ออกแบบจะต้องสามารถรองรับปริมาตรของชั้นวุ้นหางจระเข้และปริมาตรของน้ำเชื่อมที่จะใช้ในระบบ ดังนั้นถังที่ได้ออกมาจึงเป็นถังที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ไม่สามารถหาซื้อได้ตามทั่วไปจึงต้องทำการสั่งทำเป็นพิเศษ ในการคำนวณขนาดของถังมีตัวอย่างในการคำนวณดังนี้

#### ตัวอย่าง

เมื่อต้องการให้ถังมีความสามารถรองรับปริมาตรของวุ้นหางจระเข้และปริมาตรน้ำเชื่อมได้จึงหมายความว่าถังจะต้องสามารถรองรับทั้ง ปริมาตรวุ้นหางจระเข้ และปริมาตรน้ำเชื่อมสำหรับปริมาตรของวุ้นหางจระเข้หาได้จากสมการ

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (5.1)$$

$m =$  น้ำหนักของวุ้นหางจระเข้  $= 100 \text{ kg}$   $\rho =$  ความหนาแน่นของวุ้นหางจระเข้  $= 1017 \text{ kg/m}^3$

แทนค่า

$$V = \frac{100}{1017} = 0.098 \text{ m}^3$$

ปริมาตรของน้ำเชื่อมหาได้จากสมการเดียวกัน

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$m =$  น้ำหนักของน้ำเชื่อม  $= 300 \text{ kg}$   $\rho =$  ความหนาแน่นของวุ้นหางจระเข้  $= 1155 \text{ kg/m}^3$

แทนค่า

$$V = \frac{300}{1155} = 0.26 \text{ m}^3$$

ดังนั้นปริมาตรรวมจึงเท่ากับ  $0.098 + 0.26 = 0.358 \text{ m}^3$  จึงกำหนดให้ปริมาตรถังโดยรวมเท่ากับ  $0.5 \text{ m}^3$  หรือ  $500000 \text{ cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ

$$V = \frac{\pi}{4} d^3 \quad (5.2)$$

$V =$  ปริมาตรของถัง =  $500000 \text{ cm}^3$   $d =$  ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง  
ตั้งนั้นเมื่อแทนค่าจะได้

$$500000 = \frac{\pi}{4} d^3$$

$d = 86 \text{ cm}$  จึงกำหนดให้ถังมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง =  $90 \text{ cm}$

## 2. การคำนวณหาความหนาของถัง [19]

จากสมการ

$$\sigma_{II} = \frac{Pr_i}{2t} \quad (5.3)$$

ค่า Yield strength ( $\sigma_y$ ) ของ stainless steel AISI 304 =  $205 \text{ MPa}$  หรือ  $205 \text{ N/mm}^2$   
กำหนดค่าความปลอดภัย ( $N$ ) =  $5$

ตั้งนั้น

$$\sigma_{II} = \frac{\sigma_y}{N} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{II} = \frac{205}{5} = 41 \text{ N/mm}^2$$

ความดัน ( $P$ ) คือผลต่างของความดันภายในและภายนอกถังซึ่งความดันภายในถัง  
สูญญากาศเท่ากับ  $0$  ความดันภายนอกถังประมาณเท่ากับ  $1 \text{ bar}$  หรือ  $0.1 \text{ N/mm}^2$

รัศมีถัง ( $r_i$ ) =  $45 \text{ cm}$ 

ตั้งนั้น แทนค่าได้

$$t = \frac{(0.1)(450)}{(41)(2)}$$

$$= 0.54 \text{ mm}$$

## 3. การหุ้มฉนวนถัง

การเลือกฉนวน (Type of Insulator) เนื่องจากในถังน้ำเชื่อมนั้นจะต้องมีการให้ความร้อนแก่น้ำเชื่อมอยู่ตลอดเวลาเพื่อที่จะทำให้ค่า  $30\% \text{ Brix}$  ไม่เปลี่ยนแปลงและคงที่เสมอหรือเป็นเวลานานที่สุดดังนั้นเราจึงต้องการที่จะควบคุมให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ให้มีค่าน้อยที่สุด ตั้งนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในถังและท่อมีค่ามากที่สุดไม่เกิน  $60^\circ \text{C}$  จึงได้เลือกใช้ฉนวนใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หิน (Rock-wool) [รูปที่5.1] มาเป็นอุปกรณ์ป้องกันความร้อนให้กับถังเพราะมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้ดีมากและทนความร้อนได้ในอุณหภูมิที่สูงแม้ว่าจะมีราคาแพงกว่าฉนวนใยแก้วเล็กน้อยแต่มีคุณภาพดีกว่าและสามารถใช้งานได้ระยะยาว ดังนั้นจึงเลือกใช้ Rock-wool มาเป็นฉนวนกันความร้อนของถังเพราะเป็นวัสดุที่จะทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อย จากนั้นจึงต้องคำนวณหาความหนาฉนวน Rock-wool ที่มีขนาดเหมาะสม ที่ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากถังน้ำเชื่อมน้อยที่สุด จากการใช้ทฤษฎี Heat transfer อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุทรงกระบอกกลวงจะสามารถคำนวณได้จากสมการ [20]

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \left[ \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]}{2\pi k H} \quad \text{W/m} \quad (5.5)$$

โดยที่  $T_1$  = อุณหภูมิภายในถัง  $60^\circ\text{C}$

$T_2$  = อุณหภูมิภายนอกถัง  $27^\circ\text{C}$

$a$  = รัศมีของถัง  $45\text{ cm}$

$b$  = รัศมีของถังเมื่อหุ้มฉนวน

$k$  = thermal conductivity ของ ฉนวน rock-wool =  $0.04\text{ W/m}^\circ\text{C}$  [20]

สำหรับความหนาของ rock-wool โดยทั่วไปตามท้องตลาดจากการสอบถามไปยังตัวแทนขายฉนวน Rock-wool พบว่าอยู่ในช่วง  $20\text{ mm}$  ถึง  $300\text{ mm}$  ซึ่งค่าความหนาจะเป็นความหนาโดยมาตรฐาน จึงต้องทำการทดสอบแทนค่าความหนาของฉนวนลงในสมการเพื่อที่จะเลือกความหนาที่ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนของถังน้ำเชื่อมน้อยที่สุด

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ความหนา  $20\text{ mm}$

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \left[ \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]}{2\pi k H}$$

$$Q = \frac{[60 - 27] \times \left[ \ln\left(\frac{47}{45}\right) \right]}{2\pi(0.04)} \quad \text{W/m}$$

$$= 275\text{ W/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่ความหนา 30 mm

จาก

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi kH}$$

$$Q = \frac{[60 - 27] \times \ln\left(\frac{48}{45}\right)}{2\pi(0.04)} \text{ W/m}$$

$$= 137.5 \text{ W/m}$$

เมื่อทำการแทนค่าและเปรียบเทียบกัน 2 ค่า แล้วจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ฉนวนที่หนามากกว่าก็จะทำให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าการใช้ฉนวนที่มีความหนาน้อยในระบบนี้จึงเลือกใช้ฉนวน Rock-wool ที่ความหนา 30 mm ทั้งนี้เพราะได้พิจารณาว่าในระบบนี้มีอุณหภูมิไม่สูงมาก (60 °C) จึงไม่จำเป็นต้องเลือกขนาดของฉนวนกันความร้อนที่มีความหนามากกว่านี้เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นโดยไม่จำเป็น

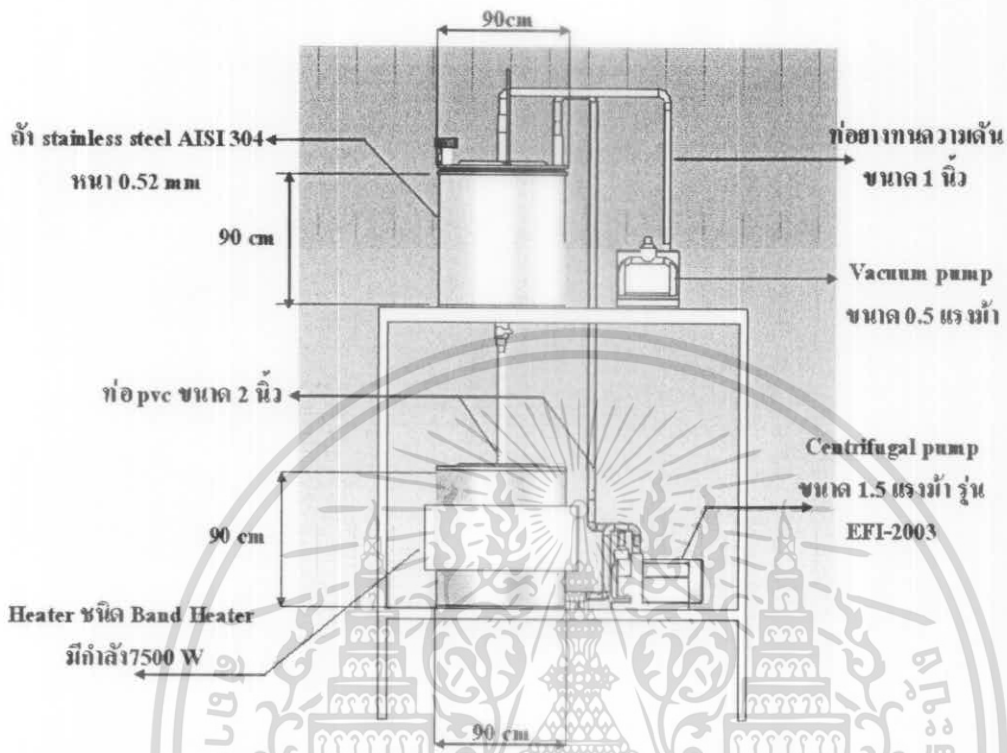


รูปที่ 5.1 ฉนวนกันความร้อน Rock-wool ในห้องคลาดทั่วไ

#### 4. การติดตั้งถัง

ในที่นี้ได้ทำการติดตั้งถังไว้ต่างระดับกันก็คือ ถังที่ใช้ทำการ Vacuum จะอยู่ด้านบน ส่วนถังที่บรรจุเฉพาะน้ำเชื่อมจะอยู่ด้านล่าง โดยได้จัดตั้งโต๊ะที่มีความสูงประมาณ 130 cm ไว้รองรับถังทั้งสองโดยที่ถังน้ำเชื่อมที่อยู่ด้านล่างจะสูงจากพื้นประมาณ 30 cm โดยวางคู่กับปั้มน้ำเชื่อมและถังด้านบนก็จะวางไว้บนโต๊ะคู่กับปั้มน้ำเชื่อมทุกถัง ทั้งนี้เพื่อออกแบบให้มีการสูญเสียค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสดของระบบให้น้อยที่สุดเพื่อจะได้ประหยัดค่าใช้จ่าย โดยเฉพาะกับค่าของปั้มพ์ และค่าใช้จ่ายของท่อส่งด้วย



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ในการเชื่อมรณทางระเซ่ที่สุญญากาศ

### 5. เครื่องมือวัด

ในระบบนี้จะใช้เครื่องมือวัด 2 ชนิด คือ เทอร์โมมิเตอร์ จะใช้เพื่อวัดค่าอุณหภูมิของน้ำเชื่อมในถัง vacuum ถ้าอุณหภูมิถึงเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการควบคุมสึดเตอร์เพื่อให้ความร้อนที่เหมาะสมต่อไป และเครื่อง Refractometer เพื่อใช้วัดค่า %Brix ถ้าหากค่า %Brix เปลี่ยนไปก็จะต้องเติมน้ำตาลให้กับระบบ

หลักการในการเลือกสึดเตอร์นั้นจะต้องทราบค่าความร้อนในระบบก่อนแล้วจึงนำค่าความร้อนที่ได้มาเลือกสึดเตอร์ที่มีกำลังวัตต์ที่เหมาะสม โดยมีหลักการคำนวณค่าความร้อน จากสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad (5.6)$$

โดยที่

$Q$  = ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ [kJ]

$m$  = น้ำหนักของน้ำเชื่อม [kg]

$c$  = ค่า specific heat capacity ของน้ำเชื่อม [kJ/kg<sup>o</sup>C]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta T = \text{ผลต่างของอุณหภูมิภายในระบบ } [^{\circ}\text{C}]$$

แทนค่า

$$m = 300 \text{ kg}$$

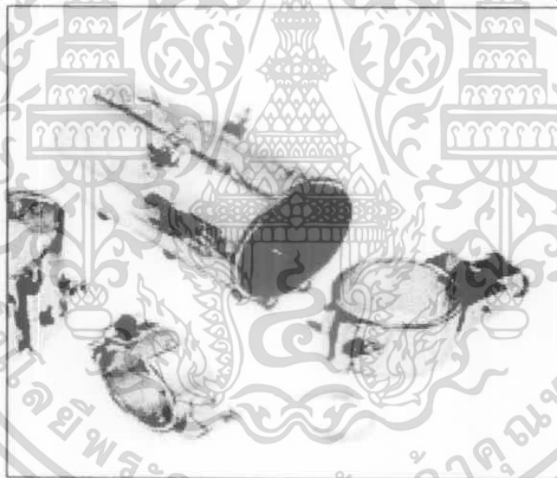
$$c = \text{ค่า specific heat capacity ของน้ำเชื่อม} = 0.76 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \quad [21]$$

$$\Delta T = [60-27] = 33^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้น

$$Q = 300 \times 0.76 \times 33 = 7,524 \text{ kJ}$$

เมื่อต้องการทราบว่ากำลังวัตต์ (W) ในระบบ จึงกำหนดให้ใช้เวลาในการให้ความร้อนที่จะทำให้อุณหภูมิมีค่าจาก  $27^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น  $60^{\circ}\text{C}$  เป็น 10 นาที ดังนั้น ค่ากำลังวัตต์ที่ต้องการจาก 7,524 kJ จึงมีค่าเท่ากับ  $(7,524)/60 \times 10 = 12.54 \text{ kW}$  จากการสอบถามข้อมูลจากทางบริษัท สมบัติ บุญฮีดเดอร์ และบอกค่าการทำความร้อนที่ต้องการใช้ เท่ากับ 12.54 kW และลักษณะที่ต้องการใช้เป็นถังทรงกระบอก ได้ทราบว่ามียี่ห้อ ฮีดเดอร์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวให้เลือกใช้อยู่หลายแบบแต่ที่เลือกใช้จะเป็นแบบ Band Heater เพราะเป็นฮีตเตอร์ ที่เหมาะกับทรงกระบอก



รูปที่ 5.3 ประเภท Band Heater

### 5.2.3 การออกแบบระบบไหลวนของน้ำเชื่อม

#### 1. ปั๊มพ่น้ำเชื่อม

การออกแบบและเลือกปั๊มพ่น้ำเชื่อม นั้น มีความสำคัญต่อระบบนี้ต้องคำนวณขนาดแรงม้า (HP) และอัตราการไหลของปั๊มที่เหมาะสมกับระบบ จึงสามารถนำข้อมูลไปทำการเลือกชนิดของปั๊มที่ได้ ดังนั้นขั้นแรกจึงทำการคำนวณหาค่าประมาณของอัตราการไหลของน้ำเชื่อมในระบบ โดยคิดปริมาณจากน้ำที่สูญเสียออกมาจากชั้นเนื้อว่านหางจระเข้หรือค่า WL ที่มีค่ามากสุดในช่วงของการทำการทดลอง ดังนั้นจากการทดลองที่ผ่านมาค่า WL ที่มากที่สุดคือค่า  $0.56 \text{ g}/100\text{g}$  ในเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าอัตราการที่สูญเสียออกมาจากชั้นเนื้อว่านหางจระเข้ คือ  $0.56 \text{ g}/100\text{g}/5 \text{ min}$  ถ้า  $100 \text{ kg}$  จะมีน้ำที่สูญเสียออกมา  $(0.56 \times 100000)/100 = 560 \text{ g}/5\text{min}$  ดังนั้น ใน 1 นาทีจะมีอัตราการสูญเสียในชั้นว่านหาง  $= 560/5 = 112 \text{ cm}^3/\text{min}$  จากนั้นทำการแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วย gpm โดย  $1 \text{ cm}^3/\text{min} = 0.00022 \text{ gal}/\text{min}$  ดังนั้น จะมีค่าอัตราการไหลเท่ากับ  $112 \times 0.00022 = 0.024 \text{ gpm}/\text{min}$  เพราะฉะนั้นอัตราการไหลของน้ำเชื่อมในระบบจะเท่ากับ  $112 \text{ cm}^3/\text{min}$  หรือ  $0.024 \text{ gpm}/\text{min}$  จึงนำค่าที่ได้ในหน่วย gpm ไปคิดคำนวณหาค่า V ของระบบ โดย

$$Q = AV \quad (5.7)$$

โดยที่

A = พื้นที่ในการไหลภายในท่อ [ $\text{m}^2$ ]

V = อัตราการไหล [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$$A = \pi r^2$$

r = รัศมีของท่อเท่ากับ  $0.025 \text{ m}$

แทนค่า

$$\begin{aligned} A &= \pi (0.025)^2 \\ &= 0.0019 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ  $Q = AV$ 

$$Q = 0.024 \text{ gpm}$$

$$A = 0.0019 \text{ m}^2$$

แทนค่า

$$0.024 = 0.0019V$$

$$V = 12.63 \text{ m}/\text{s}$$

จากนั้นแปลงรูปให้อยู่ในหน่วย ft/s โดย

$$1 \text{ m}/\text{s} = 3.28 \text{ ft}/\text{min}$$

$$\text{ได้ } V = 41.3 \text{ ft}/\text{min}$$

ดังนั้นแปลงหน่วยให้เป็น ft/s โดย

$$= \frac{41.3}{60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.68 \text{ ft/s}$$

ดังนั้นจึงนำค่า  $V$  ของระบบนี้ไปคิดค่าอัตราการสูญเสียของเสดในระบบนี้ต่อไปเพื่อหาขนาดของปั๊ม (pump) น้ำเชื่อม

## 2. การคำนวณหาเสดการสูญเสียของระบบ (Total Head) [22]

ในการเลือกขนาดของปั๊ม (pump) ของระบบที่จะทำการดูดเอาน้ำเชื่อมจากถังขึ้นไปยังถึงความดันได้นั้นจำเป็นต้องรู้ค่าเสดการสูญเสียของระบบที่เกิดขึ้นเพื่อจะพิจารณาเลือกใช้ปั๊มที่มีขนาดของแรงม้า (BHP) ที่เหมาะสมแก่การทำงาน ดังนั้น เสดการสูญเสียของระบบทั้งหมด (Total Head) จะประกอบไปด้วย

### ก) เสดความเสียด (Friction head, $S$ ) [22]

สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hazen-Williams โดย

$$V = 1.318CR^{0.67}S^{0.54} \quad (5.8)$$

$V$  = ความเร็วของของเหลว (ft/s)

$C$  = สัมประสิทธิ์ความเรียบของท่อ [ภาคผนวก ง]

$R$  = Hydraulic Radius (ft)

แทนค่า

$$V = 0.68 \text{ ft/s}$$

$$C = 145$$

$$D = 2 \text{ in}$$

$$R = D/4 \text{ in} = 1/2 \text{ in} = 0.16 \text{ ft}$$

แทนค่า

$$0.68 = 1.318(145)(0.16)^{0.67}(S)^{0.54}$$

$$S = 0.00085 \text{ ft}$$

### ข) เสดการสูญเสียที่ปากทางเข้าท่อ (Entrance loss, $h_e$ ) [22]

คำนวณได้จากสมการ

$$h_e = \frac{k}{2g} \quad (5.9)$$

$$k = 0.5 \text{ (ภาคผนวก ง)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g = 32.2 \text{ lb}$$

แทนค่า

$$h_c = \frac{0.5}{64.4} = 0.0035 \text{ ft}$$

ค) การสูญเสียที่ข้อต่อต่างๆ (Fitting loss,  $h_f$ ) [22]

คำนวณได้จากสมการ

$$h_f = \frac{kV^2}{2g} \quad (5.10)$$

ในระบบประกอบด้วยข้อต่อ 90° 8 ตัว

ค่า  $k = 1$  (ภาคผนวก ง)

แทนค่า

$$h_f = \frac{(1)(0.68)^2}{64.4} = 0.15 \text{ ft} \text{ และข้อต่อมี 8 ตัว จึงได้ } 8 \times 0.15 = 1.2 \text{ ft}$$

ค่าความยาวสมมูลของข้อต่อ 90° = 5 in และเมื่อมีข้อต่อ 8 ตัวจึงได้  $8 \times 5 = 40 \text{ in}$  ดังนั้น [22]

$$= 3.33 \text{ ft}$$

ในระบบประกอบด้วย Gate valve ใช้ปิดเปิด จำนวน 3 ตัว

ค่า  $k = 0.2$  (ภาคผนวก ง)

แทนค่า

$$h_f = \frac{(0.2)(0.68)^2}{64.4} \approx 0.0014 \text{ ft}$$

และ Gate valve มี 3 ตัว จึงได้  $3 \times 0.0014 = 0.0042 \text{ ft}$

ค่าความยาวสมมูลของ Gate valve = 2.3 ft [1] และ Gate valve 3 ตัวจึงได้  $3 \times 2.3 = 6.9 \text{ ft}$

ง) การสูญเสียจากความยาวท่อ (Loss in pipe length) [22]

ในระบบความยาวท่อทั้งหมด โดยรวมจะเท่ากับ 300 cm หรือเท่ากับ 10 ft

จ) อุปกรณ์ต่างๆ (Equipment loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) เสดการสูญเสียที่ปากทางออก (Exit loss,  $h_{ex}$ ) [22]

โดยสมการ

$$h_{ex} = \frac{V^2}{2g} \quad (5.11)$$

$$V = 0.68 \text{ ft/s}$$

$$2g = 64.4 \text{ lb}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} h_{ex} &= \frac{0.68}{64.4} \\ &= 0.01 \text{ ft} \end{aligned}$$

ข) เสดการสูญเสียของระบบ (Total Static head) [22]

ในระบบจะมี Total static head ประมาณ 200 cm หรือ 6.6 ft ดังนั้นเมื่อนำค่าเสดการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Total head, H) มารวมกันจึงได้

$$H = 0.00085 + 0.0035 + 1.2 + 3.33 + 0.0042 + 6.9 + 10 + 0.01 + 6.6$$

$$H = 28.04 \text{ ft}$$

การคำนวณหาขนาดแรงม้าของเครื่องสูบ (BHP) [22] คำนวณได้จากสมการ

$$\text{BHP} = \frac{Q \times (\text{static head}) \times \rho \times g}{1000} \quad (5.12)$$

Q = อัตราการไหลของน้ำเชื่อม [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำเชื่อม [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

แทนค่า

$$Q = 112 \text{ cm}^3/\text{min}$$

$$\rho = 1.15 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$$

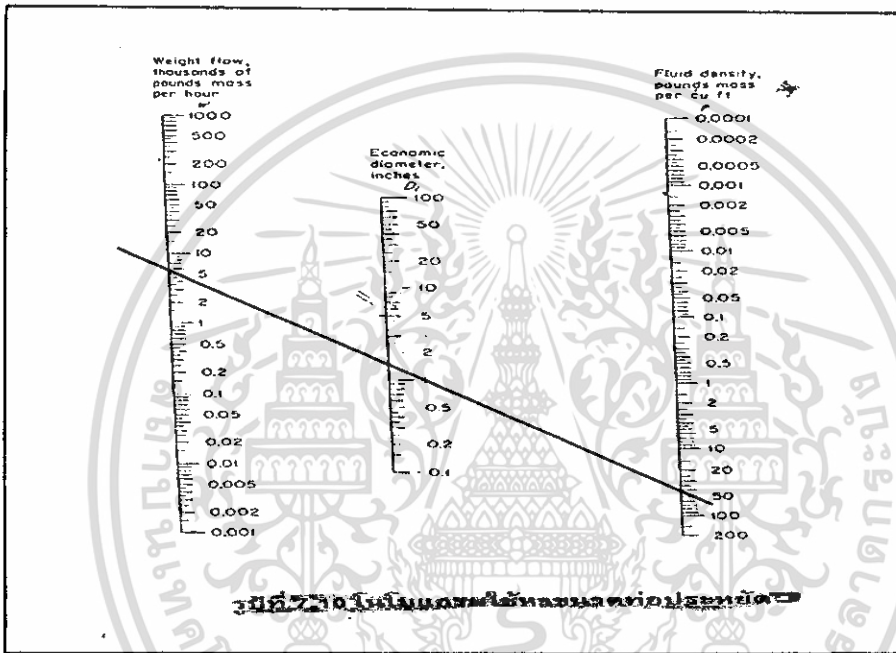
$$\begin{aligned} \text{ได้ BHP} &= \frac{(112)(0.2)(1.15)(9.81)}{1000} \\ &= 0.26 \text{ HP} \end{aligned}$$

เมื่อทราบขนาดของแรงม้าและอัตราการไหลของน้ำเชื่อมรวมถึงค่า Total static head ของระบบนี้แล้วเราจึงได้ทำการเลือกขนาดและรุ่นของปั๊มที่ได้จากการสอบถามตัวแทนขายปั๊ม ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตรงจาก บริษัท พัฒน์กล จำกัด จึงสามารถเลือกเครื่องสูบลที่มีคุณสมบัติอย่างทีกล่าวไปได้อย่างคร่าวๆว่า เป็นปั๊มพีชนิด centrifugal pump ที่มีขนาด 0.5 HP รุ่น EFI 2003 ซึ่งเป็นปั๊มพีที่จัดได้ว่าเป็นขนาดเล็กและมีราคาอยู่ในช่วง 30,000 บาท

3. ระบบท่อและวาล์ว

ในการเลือกใช้ท่อในระบบนั้นควรเลือกท่อประเภท Stainless steel เพราะเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้กับการไหลของของเหลวในระบบต่างๆ ในการเลือกขนาดท่อเลือกใช้โดยการประมาณจากการใช้ โมโนแกรมหาขนาดท่อดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 โมโนแกรมใช้หาขนาดของท่อประหยัด

ค่าทางด้านซ้ายเป็นค่าของ Weight flow thousands ในหน่วย lb/hr ระบบนี้มีค่าอัตราการไหลเท่ากับ 112 cm<sup>3</sup>/min ต้องเปลี่ยนหน่วย cm<sup>3</sup>/min เป็น lb/hr โดย

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = 1.15 \text{ g/cm}^3 = 0.00115 \text{ kg/cm}^3$$

$$V = 112 \text{ cm}^3/\text{min}$$

แทนค่า

$$m = (0.00115)(112) = 0.128 \text{ kg/min}$$

ทำให้เป็นหน่วย lb โดยคูณด้วย 2.2 = 0.128 x 2.2 = 0.257 lb/min แปลงหน่วยเป็น lb/hr

โดยหารด้วย 60 = 0.257/60 = 0.00429 lb/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad 0.00429 \times 1000 = 4.3 \text{ lb/hr}$$

ค่าทางด้านขวาจะเป็นค่า fluid density มีหน่วยเป็น lb/ft<sup>3</sup> ระบบมีค่าความหนาแน่นของน้ำเชื่อมเท่ากับ 1.15 g/cm<sup>3</sup> ดังนั้นต้องทำการแปลงหน่วย g/cm<sup>3</sup> ให้เป็น lb/ft<sup>3</sup> โดย

$$1.15 \text{ g/cm}^3 = 0.00115 \text{ kg/cm}^3$$

ทำการแปลงหน่วยให้เป็น lb/cm<sup>3</sup> โดย คูณด้วย 2.2 ได้

$$0.00115 \times 2.2 = 0.00253 \text{ lb/cm}^3$$

แปลงหน่วยให้อยู่ในรูป lb/ft<sup>3</sup> โดยคูณด้วย 28316.61 เท่ากับ

$$0.00253 \times 28316.61 = 71.6 \text{ lb/ft}^3$$

จากนั้นนำค่าที่ได้จากด้านซ้ายคือ 4.3 lb/ft<sup>3</sup> และค่าที่ได้จากด้านขวาคือ 71.6 lb/ft<sup>3</sup> มาทำการพล็อตกราฟหาจุดตัดตามรูป จะได้ขนาดท่อโดยประมาณเท่ากับ 1.5 in เพื่อให้ง่ายต่อการใช้ท่อในระบบและการเลือกซื้อจึงเลือกใช้ท่อขนาด 2 in

สำหรับในการเลือกใช้วาล์วนั้นในระบบนี้ได้เลือกใช้ Gate valve ขนาดเท่ากับท่อคือ 2 in มาเพื่อเป็นตัวเปิดปิดของเหลว โดยได้ทำการติดตั้งไว้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือที่ข้างใต้ถึงความดันเพื่อเปิดปิดน้ำเชื่อมให้ไหลลงสู่ถังน้ำเชื่อมที่ท่อต่อออกมาจากถังน้ำเชื่อมมายังปั๊ม และที่ตำแหน่งท่อด้านบนที่ต่อเข้ากับถังความดันและปั๊มความดัน

#### 4. การหุ้มฉนวนท่อ

ในระบบแม้ว่าจะมีอุณหภูมิของน้ำเชื่อมที่ไม่สูงมากนักที่ระดับ 60°C แต่ก็ได้ทำการออกแบบในการหุ้มฉนวนให้กับท่อด้วยเช่นกันเพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่มากที่สุดของทั้งระบบ โดยก็ยังคงใช้ฉนวนประเภท Rock-wool ซึ่งเป็นวัสดุเดียวกันกับที่ใช้หุ้มถังน้ำเชื่อม ทั้งนี้ในการคำนวณหาขนาดของฉนวนนั้นก็จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหุ้มฉนวนของถังน้ำเชื่อม นั่นคือต้องการให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบน้อยที่สุด โดย [20]

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]}{2\pi kH} \quad \text{W/m}$$

โดยที่

$$T_1 = \text{อุณหภูมิภายในท่อ } 60^\circ\text{C}$$

$$T_2 = \text{อุณหภูมิภายนอกท่อ } 27^\circ\text{C}$$

$$a = \text{รัศมีของท่อ } 1 \text{ in เท่ากับ } 2.5 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b$  = รัศมีของท่อเมื่อหุ้มฉนวน

$k$  = thermal conductivity ของ ฉนวน rock-wool =  $0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  [20]

โดยที่ขนาดความหนาของ rock-wool ก็ยังคงใช้ขนาดมาตรฐานตามที่ตลาดทั่วไปคือที่ความหนา 20 mm ถึง 200 mm ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบความหนาแค่ 2 ค่าเท่านั้นเพราะความหนาของฉนวนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับขนาดของท่อ จึงเลือกที่ความหนา 20 mm และ 30 mm มาให้คำนวณเพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อน

### ตัวอย่าง

ที่ความหนา 20 mm

จาก

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \left[ \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]}{2\pi k H}$$

$$Q = \frac{[60 - 27] \times \left[ \ln\left(\frac{4.5}{2.5}\right) \right]}{2\pi(0.04)}$$

$$= 104.28 \text{ W/m}$$

ที่ความหนา 30 mm

จาก

$$Q = \frac{[T_1 - T_2] \times \left[ \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]}{2\pi k H} \quad \text{W/m}$$

$$Q = \frac{[60 - 27] \times \left[ \ln\left(\frac{5.5}{2.5}\right) \right]}{2\pi(0.04)}$$

$$= 77.88 \text{ W/m}$$

จะเห็นได้ว่า ที่ความหนา 20 mm มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ความหนา 30 mm ดังนั้นจึงเลือกใช้ฉนวน Rock-wool ที่ความหนา 30 mm

## 5.2.4 การออกแบบปั๊มสุญญากาศ

### 1. การเลือกปั๊มสุญญากาศ

ในการเลือกปั๊มสำหรับใช้กับถังความดันนี้ได้เลือกขนาดปั๊ม 1.5 HP และมีค่าอัตราการไหลเท่ากับ  $4.5 \text{ m}^3/\text{hr}$  ซึ่งเป็นปั๊มที่มีอยู่แล้วสำหรับการทดลองนี้ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอย่างคร่าวๆ เพื่อพิสูจน์ว่าปั๊มนี้อาจสามารถทำงานให้กับระบบได้โดย ปริมาตรอากาศในถังความดัน  $= 0.212 \text{ m}^3$  ต้องการดูดอากาศให้ออกไปภายในเวลา 3 นาที ดังนั้น

$$\begin{aligned}\text{อัตราการไหล} &= \frac{0.212}{3} \\ &= 0.07 \text{ m}^3/\text{min} \\ &= 0.00118 \text{ m}^3/\text{hr}\end{aligned}$$

ดังนั้น ปั๊มที่มีอยู่จึงมีความสามารถที่จะใช้งานได้ เพราะมีอัตราการไหลอยู่ที่  $4.5 \text{ m}^3/\text{hr}$

## 5.3 ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม [23]

เมื่อเราได้ทำการทดลองทั้งหมด ในการทดลองนี้รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ที่จะใช้ในการเชื่อมว่่านทางจระเข้ ในระบบสุญญากาศแล้วเราจึงได้มาทำการวิเคราะห์และทำการประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์เพื่อที่จะต้องผลิตชิ้นว่่านทางเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากเท่าไรถึงจะมีความคุ้มทุนซึ่งเราเรียกว่า “จุดคุ้มทุน”

### 5.3.1 การประเมินราคาต้นทุน

#### 1. ราคาต้นทุนคงที่ ประกอบด้วย

|                                  |        |     |
|----------------------------------|--------|-----|
| ก) Vacuum pump                   | 2,500  | บาท |
| ข) ปั๊มน้ำเชื่อม                 | 35,000 | บาท |
| ค) ฉนวน rock-wool                | 4,900  | บาท |
| ง) ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว 1 เส้น    | 120    | บาท |
| จ) ซ็อก 90° 8 ตัว                | 96     | บาท |
| ฉ) Gate valve ขนาด 2 นิ้ว 3 ตัว  | 450    | บาท |
| ช) Heater ชนิด Band Heater 2 ตัว | 18,000 | บาท |
| ซ) ถังความดัน + ถังน้ำเชื่อม     | 25,400 | บาท |
| ณ) thermometer                   | 2,000  | บาท |
| รวม                              | 88,466 | บาท |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ราคาต้นทุนแปรผัน ประกอบด้วย

|                             |       |     |
|-----------------------------|-------|-----|
| ก) วานหางจรเข้ 100 กิโลกรัม | 1,500 | บาท |
| ข) น้ำตาลทราย               | 1,620 | บาท |
| รวม                         | 3,120 | บาท |

การวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนในโครงการต่างๆ ต้องการทราบว่าจำนวนผลผลิตที่ผลิตแล้วคุ้มทุนควรเป็นเท่าไร เพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจ จุดคุ้มทุน (break- even point) คือจุดที่รายได้เท่ากับรายจ่าย นั่นคือกำไรเป็นศูนย์ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่างๆ

### การคำนวณหาจุดคุ้มทุนโครงการเดียว

กำหนดให้  $C$  = ต้นทุนรวมในการผลิต

$F$  = ต้นทุนคงที่

$V$  = ต้นทุนแปรผัน

$N^*$  = จำนวนที่ผลิตที่จุดคุ้มทุน

$N$  = จำนวนการผลิตที่จุดใดๆ

$v$  = ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

$R$  = รายได้

$P$  = กำไร

$p$  = ราคาขายต่อหน่วย

$$\text{ต้นทุนรวมในการผลิต} \quad (C) = F + V \quad (5.13)$$

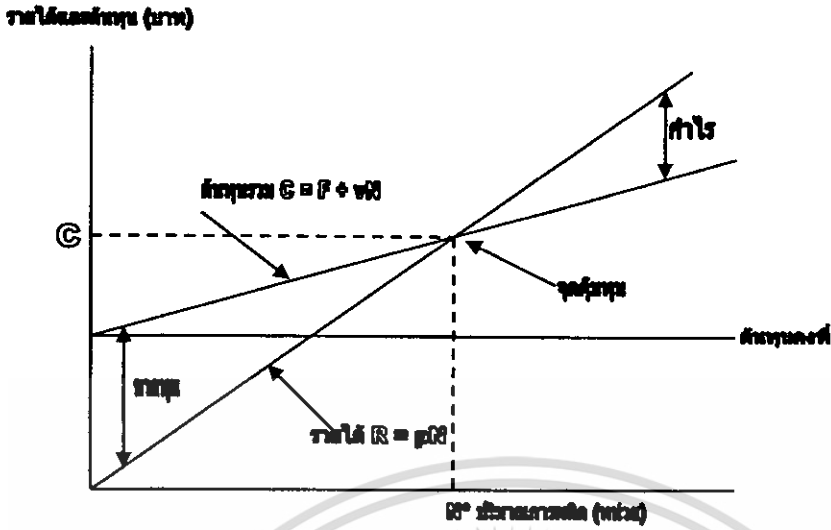
$$V = vN \quad (5.14)$$

$$\text{จึงได้ว่า} \quad C = F + vN \quad (5.15)$$

$$\text{รายได้} \quad R = pN \quad (5.16)$$

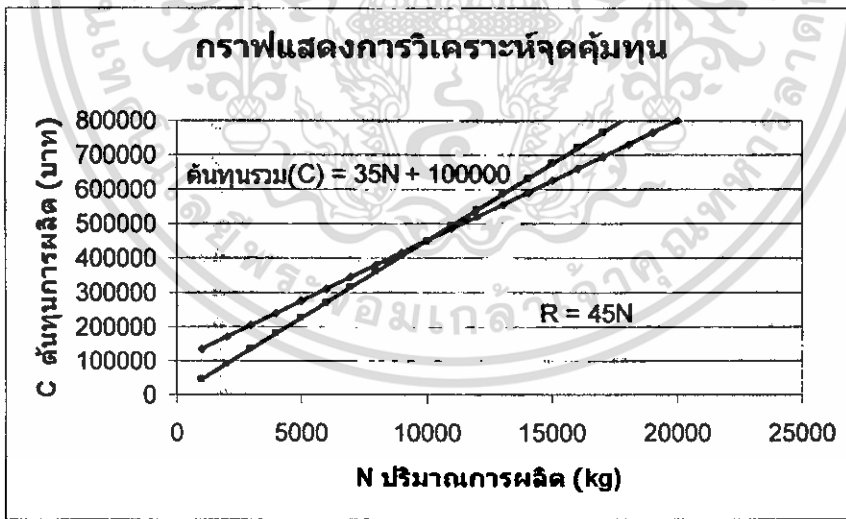
$$\text{และ} \quad N^* = F / (p - v) \quad (5.17)$$

เมื่อ  $N^*$  เป็นปริมาณที่จุดผลิตคุ้มทุนพอดี สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิ



**แผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน**  
รูปที่ 5.5 การหาค่าต่างๆ จากแผนภูมิการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

เมื่อนำสมการ  $C = F + vN$  และสมการ  $R = pN$  มาพล็อตกราฟเพื่อหาจุดตัดซึ่งเป็นจุดคุ้มทุน จะได้จุดตัดดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

พิจารณาจุดตัดที่ได้จากการพล็อตกราฟ ของสมการ  $C = F + vN$  และ สมการ  $R = pN$  จะได้จุดตัดกันตรงที่บริเวณที่มีปริมาณการผลิตประมาณ 10,000 kg ซึ่งเรียกว่าจุดคุ้มทุน ดังนั้นจุดคุ้มทุนจึงเป็นจุดที่ต้องทำการผลิตเท่ากับ 10,000 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผล

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

##### 6.1.1 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สูญญากาศระหว่างการเชื่อมวุ้นหางจระเข้ โดยใช้ซูโครสไชร็ป

จากผลการทดลองดังที่ได้แสดงเป็นแผนภาพคอนทัวร์ ทำให้เราสามารถเลือกสภาวะที่ดีที่สุดโดยการใช้สูญญากาศในการทำเชื่อม จากค่าต่างๆ ที่ได้สรุปจากค่า ปริมาณการสูญเสีย น้ำ (Water loss), ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid gain), เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage), ค่าความสว่าง (Translucent,  $L^*$ ) และ (Texture) ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณา จากค่า ค่าเนื้อสัมผัส, ปริมาณการสูญเสีย น้ำ, ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น, เปอร์เซ็นต์การหดตัว เป็นหลัก เพราะต้องการให้วุ้นวุ้นหางจระเข้ในกระบวนการสุดท้ายแล้ว ยังคงสภาพที่ใกล้เคียงกับวุ้นวุ้นหางจระเข้สดมากที่สุด

จากการพิจารณา พบว่าที่ความดันสูญญากาศสูง ความเข้มข้นสูง และใช้เวลานาน มีผลทำให้ปริมาณการสูญเสีย น้ำ และเกิดการหดตัวมาก แต่ปริมาณของแข็งในวุ้นวุ้นหางจระเข้เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งนั้นที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 30 °Brix ขึ้นไป โดยความดันและเวลาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง จะมีค่าความแข็งมากที่สุด ส่วนค่าความสว่างหรือความใสในช่วงความดัน 100-200 mbar เป็นช่วงที่มีความใสมากที่สุด โดยความความเข้มข้นและเวลาไม่มีผล ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการทำเชื่อมวุ้นวุ้นหางจระเข้ที่ดีที่สุดจึงควรอยู่ในช่วงความดัน 100-200 mbar เวลาประมาณ 5-6 นาที และความเข้มข้นของสารละลายอยู่ ระหว่าง 30-40 °Brix ที่เป็นเช่นนี้เพราะในช่วงนี้จะมีการสูญเสีย น้ำ และการหดตัวน้อย ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อย ค่าความแข็งมีค่ามาก และค่าความสว่างหรือใสมาก เป็นลักษณะสำคัญที่ต้องการ

##### 6.1.2 การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สูญญากาศก่อนการเชื่อมวุ้นหางจระเข้โดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

การพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้แคลเซียมคลอไรด์ เพื่อเป็นการช่วยลดกระบวนการการเตรียมวุ้นวุ้นหางจระเข้สำหรับทำเชื่อมวุ้นวุ้นหางจระเข้ จากแผนภาพคอนทัวร์ ทั้ง 15 ภาพ เราจะทำการเลือกสภาวะที่เหมาะสมโดยยึดหลักการเลือกเช่นเดียวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำเชื่อมวุ้นวุ้นหางจระเข้ ซึ่งจะสามารถพิจารณาช่วงสภาวะที่เหมาะสมได้ว่า ที่ช่วงความดัน 100-200 mbar เวลาที่ใช้ประมาณ 8-10 นาที และความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1-0.5 % ของน้ำ เป็นช่วงที่ดีที่สุด และเหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 สรุปเกี่ยวกับชุดอุปกรณ์การทำแช่ฮีมน้ำหวานทางจระเข้และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง

### 6.2.1 ชุดอุปกรณ์การทำแช่ฮีมน้ำหวานทางจระเข้

สำหรับการออกแบบชุดอุปกรณ์โดยใช้สุญญากาศก่อนการแช่ฮีมน้ำหวานทางจระเข้ 100 kg อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประกอบด้วย 1) ถังความดัน (Vacuum tank) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 cm และสูง 90 cm 2) Vacuum pump ขนาด 0.5 แรงม้า อัตราการไหล 4.5 m<sup>3</sup>/hr 3) ถังสำหรับใส่สารละลายออสโมติก มีขนาดเท่ากับถังความดัน 4) ปั๊มสำหรับดูดสารละลายเข้าสู่ถังความดัน ขนาด 1.5 Hp 5) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ขนาด 7500 watt 6) เทอร์โมมิเตอร์ (0-100 °C) และ 7) ท่อ PVC ขนาด 1 1/2"

### 6.2.2 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรมขนาดกลาง

จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ทำให้ทราบต้นทุนในการผลิตรวมเท่ากับ 100,000 บาท และจุดคุ้มทุนสามารถหาได้จากการพล็อตกราฟสมการเส้นตรงระหว่างสมการต้นทุนการผลิตรวม และ สมการรายได้ ทำให้เกิดจุดตัดระหว่างกราฟ 1 จุด จุดนั้นคือจุดที่ปริมาณการผลิตคุ้มทุนพอดี โดยปริมาณการผลิตเท่ากับ 10,000 kg และ ต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 450,000 บาท จากผลการวิเคราะห์นี้สามารถนำมาเป็นตัวตัดสินใจในการลงทุนผลิตน้ำหวานจระเข้แช่ฮีมน้ำหวานโดยใช้ชุดอุปกรณ์ทำแช่ฮีมน้ำหวานภายใต้สุญญากาศได้เป็นอย่างดีว่า ผลิตเท่าไรจึงจะคุ้มทุน และใช้เวลานานเท่าใด

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากน้ำหวานจระเข้มีความเป็นรุกรุนน้อย มีเนื้อและน้ำอยู่มากจึงทำให้ผลในขั้นสุดท้ายในการทำแช่ฮีมน้ำหวานไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อที่จะให้ได้ผลที่ดีควรเลือกใช้ผลไม้ชนิดที่มีความเป็นรุกรุนมาก จึงจะสามารถแลกเปลี่ยนน้ำตาลได้มากและรวดเร็วยิ่งขึ้น

แบบอุปกรณ์ที่ออกแบบสามารถนำมาสร้างและนำไปทดสอบได้จริงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำแช่ฮีมน้ำหวานอีกทั้งยังสามารถนำไปใช้กับผลไม้ชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลองปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water Loss) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain) โดยใช้ซูโครสไซรป์

| สถานะ<br>ที่ | ครั้งที่ | ปริมาณ<br>น้ำก่อน<br>vac<br>(g) | ปริมาณ<br>น้ำหลัง<br>vac<br>(g) | หน.ว่น<br>ทางกระเช้<br>สดเริ่มต้น<br>(g) | ปริมาณ<br>ของแข็ง<br>ก่อนvac<br>(g) | ปริมาณ<br>ของแข็ง<br>หลังvac<br>(g) | WL<br>(g) | SG<br>(g) | WLav<br>(%) | SGav<br>(%) |
|--------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 1            | 1        | 7.97                            | 7.19                            | 8.04                                     | 0.07                                | 0.11                                | 0.09701   | 0.00498   | 9.90062     | 0.68517     |
|              | 2        | 7.96                            | 7.15                            | 8.02                                     | 0.06                                | 0.13                                | 0.10100   | 0.00873   |             |             |
| 2            | 1        | 7.36                            | 6.49                            | 7.39                                     | 0.03                                | 0.10                                | 0.11773   | 0.00947   | 12.44711    | 1.09516     |
|              | 2        | 7.18                            | 6.23                            | 7.24                                     | 0.06                                | 0.15                                | 0.13122   | 0.01243   |             |             |
| 3            | 1        | 6.79                            | 5.50                            | 6.86                                     | 0.07                                | 0.16                                | 0.18805   | 0.01312   | 14.14307    | 1.84116     |
|              | 2        | 6.71                            | 6.07                            | 6.75                                     | 0.04                                | 0.20                                | 0.09481   | 0.02370   |             |             |
| 4            | 1        | 7.05                            | 5.62                            | 7.09                                     | 0.04                                | 0.24                                | 0.20169   | 0.02821   | 22.49339    | 4.76810     |
|              | 2        | 6.80                            | 5.10                            | 6.85                                     | 0.05                                | 0.51                                | 0.24818   | 0.06715   |             |             |
| 5            | 1        | 7.16                            | 7.12                            | 7.23                                     | 0.07                                | 0.12                                | 0.00553   | 0.00692   | 4.06553     | 0.75174     |
|              | 2        | 7.34                            | 6.78                            | 7.39                                     | 0.05                                | 0.11                                | 0.07578   | 0.00812   |             |             |
| 6            | 1        | 6.35                            | 5.20                            | 6.38                                     | 0.03                                | 1.28                                | 0.18025   | 0.19592   | 16.40204    | 10.07248    |
|              | 2        | 7.19                            | 6.12                            | 7.24                                     | 0.05                                | 0.09                                | 0.14779   | 0.00552   |             |             |
| 7            | 1        | 7.05                            | 6.47                            | 7.12                                     | 0.07                                | 0.26                                | 0.08146   | 0.02669   | 12.98724    | 2.13856     |
|              | 2        | 7.41                            | 6.08                            | 7.46                                     | 0.05                                | 0.17                                | 0.17828   | 0.01609   |             |             |
| 8            | 1        | 6.82                            | 5.74                            | 6.85                                     | 0.03                                | 0.21                                | 0.15766   | 0.02628   | 16.81882    | 2.16801     |
|              | 2        | 7.54                            | 6.18                            | 7.61                                     | 0.07                                | 0.20                                | 0.17871   | 0.01708   |             |             |
| 9            | 1        | 7.18                            | 7.05                            | 7.24                                     | 0.06                                | 0.17                                | 0.01796   | 0.01519   | 6.81790     | 0.75967     |
|              | 2        | 6.86                            | 6.03                            | 7.01                                     | 0.15                                | 0.15                                | 0.11840   | 0.00000   |             |             |
| 10           | 1        | 7.56                            | 3.26                            | 7.64                                     | 0.08                                | 0.19                                | 0.56283   | 0.01440   | 34.52989    | 1.04584     |
|              | 2        | 7.60                            | 6.62                            | 7.67                                     | 0.07                                | 0.12                                | 0.12777   | 0.00652   |             |             |
| 11           | 1        | 7.94                            | 6.05                            | 8.01                                     | 0.07                                | 0.17                                | 0.23596   | 0.01248   | 20.31248    | 1.26442     |
|              | 2        | 7.75                            | 6.42                            | 7.81                                     | 0.06                                | 0.16                                | 0.17029   | 0.01280   |             |             |
| 12           | 1        | 7.76                            | 6.54                            | 7.83                                     | 0.07                                | 0.23                                | 0.15581   | 0.02043   | 15.33513    | 1.84476     |
|              | 2        | 7.22                            | 6.12                            | 7.29                                     | 0.07                                | 0.19                                | 0.15089   | 0.01646   |             |             |
| 13           | 1        | 7.16                            | 6.15                            | 7.26                                     | 0.10                                | 0.18                                | 0.13912   | 0.01102   | 18.75795    | 1.18548     |
|              | 2        | 7.84                            | 5.98                            | 7.88                                     | 0.04                                | 0.14                                | 0.23604   | 0.01269   |             |             |
| 14           | 1        | 7.72                            | 6.31                            | 7.80                                     | 0.08                                | 0.23                                | 0.18077   | 0.01923   | 11.40013    | 2.78340     |
|              | 2        | 7.32                            | 6.97                            | 7.41                                     | 0.09                                | 0.36                                | 0.04723   | 0.03644   |             |             |
| 15           | 1        | 7.39                            | 6.27                            | 7.47                                     | 0.08                                | 0.19                                | 0.14993   | 0.01473   | 16.40167    | 1.46187     |
|              | 2        | 7.47                            | 6.12                            | 7.58                                     | 0.11                                | 0.22                                | 0.17810   | 0.01451   |             |             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยใช้ซูโครสไซรัป

| สถานะ<br>ที่ | ปริมาตรของวุ้นทางกระเป๋ (cm <sup>3</sup> ) |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | Shrinkage<br>(%) |
|--------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
|              | ก่อน vac                                   |            |            |            |            |            |            |            | หลัง vac   |            |            |            |            |            |            |            |                  |
|              | จันทันที่1                                 | จันทันที่2 | จันทันที่3 | จันทันที่4 | จันทันที่1 | จันทันที่2 | จันทันที่3 | จันทันที่4 | จันทันที่1 | จันทันที่2 | จันทันที่3 | จันทันที่4 | จันทันที่1 | จันทันที่2 | จันทันที่3 | จันทันที่4 |                  |
| 1            | 0.0040                                     | 0.0038     | 0.0040     | 0.0041     | 0.0036     | 0.0037     | 0.0037     | 0.0038     | 8.52       | 2.84       | 7.74       | 7.34       | 6.61       |            |            |            |                  |
| 2            | 0.0036                                     | 0.0036     | 0.0035     | 0.0034     | 0.0031     | 0.0031     | 0.0031     | 0.0029     | 13.77      | 14.44      | 13.31      | 13.59      | 13.78      |            |            |            |                  |
| 3            | 0.0036                                     | 0.0034     | 0.0034     | 0.0034     | 0.0028     | 0.0027     | 0.0028     | 0.0027     | 20.98      | 21.85      | 18.22      | 19.34      | 20.10      |            |            |            |                  |
| 4            | 0.0037                                     | 0.0036     | 0.0037     | 0.0045     | 0.0029     | 0.0028     | 0.0037     | 0.0037     | 21.98      | 20.81      | -2.11      | 18.54      | 14.80      |            |            |            |                  |
| 5            | 0.0038                                     | 0.0038     | 0.0039     | 0.0039     | 0.0034     | 0.0035     | 0.0034     | 0.0036     | 9.81       | 9.20       | 12.53      | 9.77       | 10.33      |            |            |            |                  |
| 6            | 0.0033                                     | 0.0034     | 0.0038     | 0.0031     | 0.0030     | 0.0031     | 0.0036     | 0.0027     | 9.98       | 9.40       | 5.82       | 11.86      | 9.26       |            |            |            |                  |
| 7            | 0.0036                                     | 0.0038     | 0.0038     | 0.0036     | 0.0029     | 0.0031     | 0.0031     | 0.0027     | 19.05      | 18.82      | 20.49      | 24.63      | 20.75      |            |            |            |                  |
| 8            | 0.0036                                     | 0.0037     | 0.0038     | 0.0038     | 0.0026     | 0.0029     | 0.0029     | 0.0030     | 26.43      | 22.76      | 22.89      | 21.68      | 23.44      |            |            |            |                  |
| 9            | 0.0040                                     | 0.0037     | 0.0037     | 0.0036     | 0.0035     | 0.0031     | 0.0033     | 0.0031     | 11.78      | 15.45      | 12.02      | 13.74      | 13.25      |            |            |            |                  |
| 10           | 0.0037                                     | 0.0035     | 0.0037     | 0.0039     | 0.0033     | 0.0030     | 0.0034     | 0.0034     | 12.41      | 13.75      | 8.42       | 12.76      | 11.83      |            |            |            |                  |
| 11           | 0.0039                                     | 0.0039     | 0.0038     | 0.0039     | 0.0032     | 0.0033     | 0.0031     | 0.0031     | 16.26      | 15.77      | 16.90      | 20.91      | 17.46      |            |            |            |                  |
| 12           | 0.0041                                     | 0.0038     | 0.0039     | 0.0039     | 0.0033     | 0.0031     | 0.0032     | 0.0032     | 19.04      | 18.39      | 17.25      | 17.76      | 18.11      |            |            |            |                  |
| 13           | 0.0039                                     | 0.0037     | 0.0037     | 0.0038     | 0.0033     | 0.0030     | 0.0032     | 0.0033     | 14.91      | 17.51      | 15.64      | 15.21      | 15.82      |            |            |            |                  |
| 14           | 0.0033                                     | 0.0037     | 0.0041     | 0.0040     | 0.0029     | 0.0032     | 0.0033     | 0.0033     | 12.09      | 15.26      | 17.75      | 17.68      | 15.69      |            |            |            |                  |
| 15           | 0.0041                                     | 0.0036     | 0.0039     | 0.0047     | 0.0034     | 0.0032     | 0.0032     | 0.0041     | 16.29      | 12.78      | 18.06      | 11.58      | 14.68      |            |            |            |                  |

ตารางที่ ก.3 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความสว่าง ( $L^*$ ) โดยใช้ชุดโครสไซร์ป

| สถานะที่ | ค่า $L^*$ |          |          | $L^*_{av}$ |
|----------|-----------|----------|----------|------------|
|          | ซ้ำที่ 1  | ซ้ำที่ 2 | ซ้ำที่ 3 |            |
| 1        | 33.08     | 33.08    | 33.09    | 33.08      |
| 2        | 28.14     | 28.15    | 28.14    | 28.14      |
| 3        | 24.05     | 24.06    | 24.03    | 24.05      |
| 4        | 19.25     | 19.24    | 19.25    | 19.25      |
| 5        | 31.51     | 31.51    | 31.51    | 31.51      |
| 6        | 25.58     | 25.59    | 25.57    | 25.58      |
| 7        | 31.40     | 31.40    | 31.39    | 31.40      |
| 8        | 32.02     | 32.02    | 32.01    | 32.02      |
| 9        | 33.49     | 33.49    | 33.49    | 33.49      |
| 10       | 34.09     | 34.09    | 34.08    | 34.09      |
| 11       | 31.84     | 31.85    | 31.84    | 31.84      |
| 12       | 29.80     | 29.79    | 29.81    | 29.80      |
| 13       | 28.48     | 28.47    | 28.48    | 28.48      |
| 14       | 28.34     | 28.34    | 28.34    | 28.34      |
| 15       | 33.09     | 33.09    | 33.09    | 33.09      |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าเนื้อสัมผัส (Texture)

| สภาวะ<br>ที่ | Test ID | Average<br>Firmness<br>N/mm | Average<br>Firmness <sub>av</sub><br>N/mm | สภาวะ<br>ที่ | Test ID | Average<br>Firmness<br>N/mm | Average<br>Firmness <sub>av</sub><br>N/mm |
|--------------|---------|-----------------------------|---|--------------|---------|-----------------------------|---|
| 1            | c011    | 1.152                       | 1.086                                     | 9            | c091    | 1.121                       | 1.228                                     |
|              | c012    | 1.175                       |   |              | c092    | 1.327                       |   |
|              | c013    | 1.028                       |   |              | c093    | 1.352                       |   |
|              | c014    | 0.988                       |   |              | c094    | 1.111                       |   |
| 2            | c021    | 1.000                       | 1.109                                     | 10           | c101    | 1.119                       | 1.112                                     |
|              | c022    | 0.917                       |   |              | c102    | 1.110                       |   |
|              | c023    | 1.182                       |   |              | c103    | 1.232                       |   |
|              | c024    | 1.337                       |   |              | c104    | 0.988                       |   |
| 3            | c031    | 1.507                       | 1.286                                     | 11           | c111    | 1.263                       | 1.329                                     |
|              | c032    | 1.295                       |   |              | c112    | 1.275                       |   |
|              | c033    | 1.151                       |   |              | c113    | 1.475                       |   |
|              | c034    | 1.192                       |   |              | c114    | 1.303                       |   |
| 4            | c041    | 1.132                       | 1.181                                     | 12           | c121    | 1.180                       | 1.216                                     |
|              | c042    | 1.321                       |   |              | c122    | 1.210                       |   |
|              | c043    | 1.175                       |   |              | c123    | 1.136                       |   |
|              | c044    | 1.094                       |   |              | c124    | 1.338                       |   |
| 5            | c051    | 1.182                       | 1.129                                     | 13           | c131    | 1.389                       | 1.257                                     |
|              | c052    | 1.075                       |   |              | c132    | 1.143                       |   |
|              | c053    | 1.004                       |   |              | c133    | 1.270                       |   |
|              | c054    | 1.255                       |   |              | c134    | 1.225                       |   |
| 6            | c061    | 1.013                       | 1.051                                     | 14           | c141    | 1.466                       | 1.365                                     |
|              | c062    | 1.255                       |   |              | c142    | 1.502                       |   |
|              | c063    | 1.021                       |   |              | c143    | 1.202                       |   |
|              | c064    | 0.915                       |   |              | c144    | 1.291                       |   |
| 7            | c071    | 1.231                       | 1.316                                     | 15           | c151    | 1.017                       | 1.011                                     |
|              | c072    | 1.433                       |   |              | c152    | 0.876                       |   |
|              | c073    | 1.272                       |   |              | c153    | 1.233                       |   |
|              | c074    | 1.329                       |   |              | c154    | 0.917                       |   |
| 8            | c081    | 1.143                       | 1.161                                     |              |         |                             |   |
|              | c082    | 1.162                       |   |              |         |                             |   |
|              | c083    | 1.155                       |   |              |         |                             |   |
|              | c084    | 1.182                       |   |              |         |                             |   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ตารางบันทึกผลการทดลองปริมาณการสูญเสียน้ำ (Water Loss) และปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

| สถานะ<br>ที่ | ครั้งที่ | ปริมาณ<br>น้ำก่อน<br>vac<br>(g) | ปริมาณ<br>น้ำหลัง<br>vac<br>(g) | น.จ.น.วัน<br>ทางจระเข้<br>สดเริ่มต้น<br>(g) | ปริมาณ<br>ของแข็ง<br>ก่อนvac<br>(g) | ปริมาณ<br>ของแข็ง<br>หลังvac<br>(g) | WL<br>(g) | SG<br>(g) | WLav<br>(%) | SGav<br>(%) |
|--------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 1            | 1        | 6.80                            | 6.69                            | 6.87  | 0.07                                | 0.03                                | 0.01601   | -0.00582  | 4.90922     | -0.43040    |
|              | 2        | 7.13                            | 6.54                            | 7.18  | 0.05                                | 0.03                                | 0.08217   | -0.00279  |             |             |
| 2            | 1        | 7.87                            | 7.08                            | 7.91  | 0.04                                | 0.06                                | 0.09987   | 0.00253   | 4.37555     | 0.12642     |
|              | 2        | 7.21                            | 7.30                            | 7.28  | 0.07                                | 0.07                                | -0.01236  | 0.00000   |             |             |
| 3            | 1        | 7.12                            | 7.16                            | 7.19  | 0.07                                | 0.11                                | -0.00556  | 0.00556   | -0.63736    | 0.27816     |
|              | 2        | 6.91                            | 6.96                            | 6.96  | 0.05                                | 0.05                                | -0.00718  | 0.00000   |             |             |
| 4            | 1        | 7.06                            | 6.94                            | 7.13  | 0.07                                | 0.11                                | 0.01683   | 0.00561   | 3.30053     | 0.41712     |
|              | 2        | 7.25                            | 6.89                            | 7.32  | 0.07                                | 0.09                                | 0.04918   | 0.00273   |             |             |
| 5            | 1        | 7.17                            | 6.69                            | 7.23  | 0.06                                | 0.05                                | 0.06639   | -0.00138  | 4.27188     | -0.06916    |
|              | 2        | 7.29                            | 7.15                            | 7.35  | 0.06                                | 0.06                                | 0.01905   | 0.00000   |             |             |
| 6            | 1        | 6.64                            | 6.33                            | 6.71  | 0.07                                | 0.02                                | 0.04620   | -0.00745  | 2.82545     | -0.59349    |
|              | 2        | 6.73                            | 6.66                            | 6.79  | 0.06                                | 0.03                                | 0.01031   | -0.00442  |             |             |
| 7            | 1        | 8.60                            | 6.73                            | 8.65  | 0.05                                | 0.08                                | 0.21618   | 0.00347   | 11.98919    | -0.34281    |
|              | 2        | 6.65                            | 6.49                            | 6.78  | 0.13                                | 0.06                                | 0.02360   | -0.01032  |             |             |
| 8            | 1        | 7.42                            | 6.51                            | 7.53  | 0.11                                | 0.08                                | 0.12085   | -0.00398  | 9.93432     | 0.13061     |
|              | 2        | 7.53                            | 6.94                            | 7.58  | 0.05                                | 0.10                                | 0.07784   | 0.00660   |             |             |
| 9            | 1        | 7.47                            | 7.07                            | 7.51  | 0.04                                | 0.07                                | 0.05326   | 0.00399   | 6.29215     | 0.06533     |
|              | 2        | 7.34                            | 6.80                            | 7.44  | 0.10                                | 0.08                                | 0.07258   | -0.00269  |             |             |
| 10           | 1        | 7.30                            | 7.58                            | 7.38  | 0.08                                | 0.11                                | -0.03794  | 0.00407   | 1.38277     | 0.33712     |
|              | 2        | 7.42                            | 6.93                            | 7.47  | 0.05                                | 0.07                                | 0.06560   | 0.00268   |             |             |
| 11           | 1        | 7.18                            | 6.78                            | 7.25  | 0.07                                | 0.09                                | 0.05517   | 0.00276   | 7.49400     | 0.06829     |
|              | 2        | 7.11                            | 6.43                            | 7.18  | 0.07                                | 0.06                                | 0.09471   | -0.00139  |             |             |
| 12           | 1        | 7.55                            | 6.42                            | 7.64  | 0.09                                | 0.08                                | 0.14791   | -0.00131  | 10.66233    | -0.20749    |
|              | 2        | 6.97                            | 6.51                            | 7.04  | 0.07                                | 0.05                                | 0.06534   | -0.00284  |             |             |
| 13           | 1        | 6.96                            | 6.70                            | 7.02  | 0.06                                | 0.05                                | 0.03704   | -0.00142  | 1.85185     | -0.50164    |
|              | 2        | 6.82                            | 6.82                            | 6.97  | 0.15                                | 0.09                                | 0.00000   | -0.00861  |             |             |
| 14           | 1        | 6.84                            | 7.16                            | 6.88  | 0.04                                | 0.07                                | -0.04651  | 0.00436   | -0.61793    | 0.28633     |
|              | 2        | 7.27                            | 7.02                            | 7.32  | 0.05                                | 0.06                                | 0.03415   | 0.00137   |             |             |
| 15           | 1        | 6.77                            | 6.59                            | 6.83  | 0.06                                | 0.08                                | 0.02635   | 0.00293   | 6.53860     | 0.41415     |
|              | 2        | 7.41                            | 6.63                            | 7.47  | 0.06                                | 0.10                                | 0.10442   | 0.00535   |             |             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.2 ตารางบันทึกผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การหดตัวโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

| สถานะ<br>ที่ | ปริมาณของชิ้นวัณทางจระเข้ (cm <sup>3</sup> ) |          |          |          |          |          |          |          | % การหดตัวของชิ้นวัณทางจระเข้ |          |          |          | Shrinkage<br>(%) |
|--------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------------------|----------|----------|----------|------------------|
|              | ก่อน vac                                     |          |          |          | หลัง vac |          |          |          | ชิ้นที่1                      | ชิ้นที่2 | ชิ้นที่3 | ชิ้นที่4 |                  |
|              | ชิ้นที่1                                     | ชิ้นที่2 | ชิ้นที่3 | ชิ้นที่4 | ชิ้นที่1 | ชิ้นที่2 | ชิ้นที่3 | ชิ้นที่4 |                               |          |          |          |                  |
| 1            | 0.0031                                       | 0.0031   | 0.0031   | 0.0030   | 0.0029   | 0.0029   | 0.0029   | 0.0027   | 5.75                          | 6.41     | 7.30     | 8.64     | 7.02             |
| 2            | 0.0036                                       | 0.0035   | 0.0039   | 0.0037   | 0.0034   | 0.0034   | 0.0039   | 0.0035   | 4.58                          | 1.52     | 1.33     | 4.17     | 2.90             |
| 3            | 0.0031                                       | 0.0033   | 0.0036   | 0.0036   | 0.0029   | 0.0031   | 0.0034   | 0.0034   | 7.14                          | 6.68     | 5.42     | 5.09     | 6.08             |
| 4            | 0.0037                                       | 0.0037   | 0.0035   | 0.0031   | 0.0035   | 0.0034   | 0.0031   | 0.0028   | 5.94                          | 7.02     | 10.31    | 8.45     | 7.93             |
| 5            | 0.0036                                       | 0.0038   | 0.0034   | 0.0034   | 0.0036   | 0.0038   | 0.0032   | 0.0033   | -0.60                         | 0.49     | 4.39     | 2.65     | 1.73             |
| 6            | 0.0035                                       | 0.0036   | 0.0037   | 0.0035   | 0.0034   | 0.0034   | 0.0036   | 0.0033   | 4.44                          | 5.53     | 3.41     | 6.74     | 5.03             |
| 7            | 0.0033                                       | 0.0034   | 0.0033   | 0.0033   | 0.0031   | 0.0032   | 0.0033   | 0.0031   | 6.93                          | 4.99     | 2.07     | 6.85     | 5.21             |
| 8            | 0.0037                                       | 0.0036   | 0.0035   | 0.0037   | 0.0034   | 0.0033   | 0.0032   | 0.0034   | 6.18                          | 8.39     | 7.29     | 8.17     | 7.51             |
| 9            | 0.0036                                       | 0.0035   | 0.0039   | 0.0036   | 0.0034   | 0.0038   | 0.0032   | 0.0034   | 6.91                          | -10.4    | 18.41    | 6.13     | 5.25             |
| 10           | 0.0038                                       | 0.0035   | 0.0036   | 0.0035   | 0.0034   | 0.0033   | 0.0031   | 0.0032   | 8.53                          | 5.70     | 12.81    | 7.71     | 8.69             |
| 11           | 0.0034                                       | 0.0034   | 0.0033   | 0.0036   | 0.0033   | 0.0033   | 0.0031   | 0.0035   | 4.34                          | 3.18     | 4.85     | 4.69     | 4.26             |
| 12           | 0.0034                                       | 0.0036   | 0.0035   | 0.0034   | 0.0032   | 0.0032   | 0.0034   | 0.0031   | 7.59                          | 9.51     | 2.56     | 7.06     | 6.68             |
| 13           | 0.0036                                       | 0.0037   | 0.0037   | 0.0032   | 0.0033   | 0.0034   | 0.0035   | 0.0030   | 6.41                          | 6.76     | 5.32     | 6.17     | 6.16             |
| 14           | 0.0035                                       | 0.0036   | 0.0039   | 0.0034   | 0.0034   | 0.0035   | 0.0038   | 0.0033   | 3.95                          | 4.42     | 3.11     | 3.47     | 3.74             |
| 15           | 0.0035                                       | 0.0035   | 0.0032   | 0.0036   | 0.0033   | 0.0034   | 0.0030   | 0.0035   | 5.01                          | 3.52     | 6.11     | 3.73     | 4.59             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความสว่าง ( $L^*$ ) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

| สถานะที่ | ค่า $L^*$ |         |         | $L^*_{av}$ |
|----------|-----------|---------|---------|------------|
|          | ซ้ำที่1   | ซ้ำที่2 | ซ้ำที่3 |            |
| 1        | 35.55     | 35.49   | 35.49   | 35.510     |
| 2        | 27.83     | 27.83   | 27.83   | 27.830     |
| 3        | 34.87     | 34.88   | 34.90   | 34.883     |
| 4        | 35.18     | 35.17   | 35.18   | 35.177     |
| 5        | 35.07     | 35.01   | 34.97   | 35.017     |
| 6        | 34.01     | 34.02   | 34.00   | 34.010     |
| 7        | 35.89     | 35.89   | 35.89   | 35.890     |
| 8        | 30.56     | 30.63   | 30.63   | 30.607     |
| 9        | 36.58     | 36.50   | 36.50   | 36.527     |
| 10       | 36.20     | 36.20   | 36.16   | 36.187     |
| 11       | 31.18     | 31.15   | 31.10   | 31.143     |
| 12       | 38.00     | 38.00   | 38.08   | 38.027     |
| 13       | 35.64     | 35.64   | 35.64   | 35.640     |
| 14       | 35.45     | 35.45   | 35.45   | 35.450     |
| 15       | 32.61     | 32.61   | 32.61   | 32.610     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ตารางบันทึกผลการทดลองค่าเนื้อสัมผัส (Texture) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

| สภาวะที่ | Test ID | Average Firmness N/mm | Average Firmness <sub>av</sub> N/mm | สภาวะที่ | Test ID | Average Firmness N/mm | Average Firmness <sub>av</sub> N/mm |
|----------|---------|-----------------------|-------------------------------------|----------|---------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1        | c011    | 0.771                 | 1.04375                             | 9        | c091    | 1.089                 | 1.13575                             |
|          | c012    | 0.911                 |                                     |          | c092    | 1.165                 |                                     |
|          | c013    | 1.060                 |                                     |          | c093    | 1.091                 |                                     |
|          | c014    | 1.433                 |                                     |          | c094    | 1.198                 |                                     |
| 2        | c021    | 1.464                 | 1.411                               | 10       | c101    | 1.194                 | 1.15025                             |
|          | c022    | 1.764                 |                                     |          | c102    | 0.973                 |                                     |
|          | c023    | 1.212                 |                                     |          | c103    | 1.180                 |                                     |
|          | c024    | 1.204                 |                                     |          | c104    | 1.254                 |                                     |
| 3        | c031    | 1.040                 | 1.11825                             | 11       | c111    | 0.948                 | 1.1645                              |
|          | c032    | 1.172                 |                                     |          | c112    | 1.477                 |                                     |
|          | c033    | 1.094                 |                                     |          | c113    | 1.149                 |                                     |
|          | c034    | 1.167                 |                                     |          | c114    | 1.084                 |                                     |
| 4        | c041    | 1.257                 | 1.24825                             | 12       | c121    | 1.087                 | 1.12425                             |
|          | c042    | 1.181                 |                                     |          | c122    | 1.140                 |                                     |
|          | c043    | 1.190                 |                                     |          | c123    | 1.156                 |                                     |
|          | c044    | 1.365                 |                                     |          | c124    | 1.114                 |                                     |
| 5        | c051    | 1.065                 | 1.1835                              | 13       | c131    | 1.264                 | 1.192                               |
|          | c052    | 1.100                 |                                     |          | c132    | 1.062                 |                                     |
|          | c053    | 1.267                 |                                     |          | c133    | 1.330                 |                                     |
|          | c054    | 1.302                 |                                     |          | c134    | 1.112                 |                                     |
| 6        | c061    | 1.238                 | 1.1685                              | 14       | c141    | 0.967                 | 1.12025                             |
|          | c062    | 1.171                 |                                     |          | c142    | 1.093                 |                                     |
|          | c063    | 1.144                 |                                     |          | c143    | 1.256                 |                                     |
|          | c064    | 1.121                 |                                     |          | c144    | 1.165                 |                                     |
| 7        | c071    | 0.968                 | 1.13525                             | 15       | c151    | 1.284                 | 1.1805                              |
|          | c072    | 1.389                 |                                     |          | c152    | 1.208                 |                                     |
|          | c073    | 1.099                 |                                     |          | c153    | 1.065                 |                                     |
|          | c074    | 1.085                 |                                     |          | c154    | 1.165                 |                                     |
| 8        | c081    | 1.144                 | 1.134                               |          |         |                       |                                     |
|          | c082    | 1.092                 |                                     |          |         |                       |                                     |
|          | c083    | 1.143                 |                                     |          |         |                       |                                     |
|          | c084    | 1.157                 |                                     |          |         |                       |                                     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture) สำหรับการใส่ชูโครสไซร์ป โดยใช้โปรแกรม Texture Exponent 32

| Test ID | Initial firmness | Toughness | Average Firmness | Relaxation Ratio | Energy absorption | Adhesive force | Springiness | Adhesiveness |
|---------|------------------|-----------|------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------|--------------|
|         | N/mm             | Nmm       | N/mm             |                  | Nmm               | N              | mm          | Nmm          |
| c011    | 0.544            | 8.046     | 1.152            | 0.498            | 7.421             | -0.130         | 1.306       | -0.086       |
| c012    | 0.783            | 9.015     | 1.175            | 0.437            | 8.451             | -0.142         | 1.032       | -0.072       |
| c013    | 0.553            | 9.039     | 1.028            | 0.510            | 8.534             | -0.107         | 1.275       | -0.067       |
| c014    | 0.568            | 9.838     | 0.988            | 0.504            | 9.338             | -0.124         | 1.083       | -0.067       |
| c021    | 0.430            | 8.034     | 1.000            | 0.638            | 7.712             | -0.093         | 2.396       | -0.111       |
| c022    | 0.347            | 7.886     | 0.917            | 0.644            | 7.589             | -0.106         | 3.833       | -0.218       |
| c023    | 0.462            | 6.517     | 1.182            | 0.612            | 6.112             | -0.089         | 2.005       | -0.090       |
| c024    | 0.618            | 6.629     | 1.337            | 0.544            | 6.242             | -0.148         | 2.449       | -0.197       |
| c031    | 0.655            | 5.500     | 1.507            | 0.539            | 4.952             | -0.117         | 1.722       | -0.106       |
| c032    | 0.599            | 6.777     | 1.295            | 0.579            | 6.348             | -0.123         | 1.717       | -0.121       |
| c033    | 0.467            | 6.706     | 1.151            | 0.581            | 6.277             | -0.104         | 2.112       | -0.116       |
| c034    | 0.468            | 6.409     | 1.192            | 0.571            | 5.954             | -0.110         | 1.735       | -0.099       |
| c041    | 0.471            | 7.226     | 1.132            | 0.569            | 6.815             | -0.101         | 1.730       | -0.085       |
| c042    | 0.498            | 5.568     | 1.321            | 0.688            | 5.353             | -0.142         | 9.374       | -0.117       |
| c043    | 0.435            | 6.048     | 1.175            | 0.619            | 5.698             | -0.098         | 2.499       | -0.129       |
| c044    | 0.524            | 7.919     | 1.094            | 0.611            | 7.565             | -0.098         | 1.901       | -0.109       |
| c051    | 0.653            | 8.362     | 1.182            | 0.413            | 7.699             | -0.123         | 1.236       | -0.077       |
| c052    | 0.712            | 10.028    | 1.075            | 0.462            | 9.433             | -0.122         | 1.102       | -0.071       |
| c053    | 0.592            | 9.727     | 1.004            | 0.613            | 9.320             | -0.084         | 1.571       | -0.068       |
| c054    | 0.826            | 8.699     | 1.255            | 0.460            | 8.104             | -0.184         | 1.290       | -0.131       |
| c061    | 0.377            | 7.014     | 1.013            | 0.605            | 6.635             | -0.103         | 2.216       | -0.119       |
| c062    | 0.706            | 7.739     | 1.255            | 0.450            | 7.180             | -0.143         | 1.747       | -0.124       |
| c063    | 0.417            | 7.733     | 1.021            | 0.631            | 7.305             | -0.094         | 5.517       | -0.089       |
| c064    | 0.361            | 8.365     | 0.915            | 0.640            | 8.070             | -0.088         | 2.170       | -0.094       |
| c071    | 0.682            | 7.955     | 1.231            | 0.430            | 7.445             | -0.172         | 2.223       | -0.171       |
| c072    | 0.663            | 6.188     | 1.433            | 0.505            | 5.697             | -0.155         | 1.977       | -0.166       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวัสดุให้การช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |       |       |       |       |       |        |       |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| c073 | 0.707 | 7.754 | 1.272 | 0.437 | 7.259 | -0.150 | 1.236 | -0.109 |
| c074 | 0.789 | 7.912 | 1.329 | 0.486 | 7.384 | -0.209 | 1.417 | -0.159 |
| c081 | 0.553 | 8.060 | 1.143 | 0.475 | 7.571 | -0.143 | 1.133 | -0.089 |
| c082 | 0.555 | 7.651 | 1.162 | 0.485 | 7.159 | -0.181 | 2.184 | -0.222 |
| c083 | 0.562 | 7.910 | 1.155 | 0.511 | 7.480 | -0.159 | 4.316 | -0.241 |
| c084 | 0.444 | 6.147 | 1.182 | 0.647 | 5.810 | -0.109 | 1.948 | -0.086 |
| c091 | 0.585 | 8.297 | 1.121 | 0.513 | 7.809 | -0.097 | 1.448 | -0.076 |
| c092 | 0.953 | 8.321 | 1.327 | 0.418 | 7.719 | -0.149 | 2.526 | -0.137 |
| c093 | 0.675 | 7.055 | 1.352 | 0.473 | 6.451 | -0.106 | 1.337 | -0.074 |
| c094 | 0.589 | 9.155 | 1.111 | 0.477 | 8.500 | -0.096 | 1.171 | -0.057 |
| c101 | 0.643 | 8.885 | 1.119 | 0.498 | 8.387 | -0.136 | 1.522 | -0.104 |
| c102 | 0.563 | 8.419 | 1.110 | 0.468 | 7.909 | -0.146 | 1.288 | -0.102 |
| c103 | 0.776 | 8.383 | 1.232 | 0.429 | 7.860 | -0.186 | 1.401 | -0.149 |
| c104 | 0.358 | 7.084 | 0.988 | 0.435 | 6.545 | -0.225 | 2.893 | -0.227 |
| c111 | 0.536 | 6.735 | 1.263 | 0.543 | 6.278 | -0.148 | 1.628 | -0.118 |
| c112 | 0.624 | 7.219 | 1.275 | 0.505 | 6.766 | -0.115 | 1.227 | -0.073 |
| c113 | 0.662 | 6.021 | 1.475 | 0.597 | 5.611 | -0.113 | 1.162 | -0.063 |
| c114 | 0.697 | 7.523 | 1.303 | 0.469 | 7.031 | -0.126 | 1.408 | -0.103 |
| c121 | 0.454 | 6.305 | 1.180 | 0.590 | 5.846 | -0.108 | 1.733 | -0.086 |
| c122 | 0.709 | 8.290 | 1.210 | 0.495 | 7.827 | -0.155 | 1.806 | -0.139 |
| c123 | 0.510 | 7.829 | 1.136 | 0.493 | 7.364 | -0.157 | 1.891 | -0.154 |
| c124 | 0.535 | 6.010 | 1.338 | 0.646 | 5.736 | -0.118 | 1.770 | -0.108 |
| c131 | 0.843 | 7.552 | 1.389 | 0.510 | 7.017 | -0.108 | 0.938 | -0.052 |
| c132 | 0.548 | 7.980 | 1.143 | 0.577 | 7.523 | -0.116 | 1.560 | -0.095 |
| c133 | 0.463 | 5.748 | 1.270 | 0.579 | 5.273 | -0.074 | 1.520 | -0.053 |
| c134 | 0.527 | 6.828 | 1.225 | 0.568 | 6.391 | -0.112 | 2.719 | -0.134 |
| c141 | 0.686 | 6.132 | 1.466 | 0.528 | 5.623 | -0.097 | 1.135 | -0.050 |
| c142 | 0.798 | 6.366 | 1.502 | 0.486 | 5.894 | -0.125 | 1.088 | -0.072 |
| c143 | 0.655 | 8.156 | 1.202 | 0.578 | 7.785 | -0.099 | 1.609 | -0.081 |
| c144 | 0.576 | 6.587 | 1.291 | 0.559 | 6.206 | -0.109 | 1.669 | -0.095 |
| c151 | 0.539 | 9.131 | 1.017 | 0.488 | 8.661 | -0.107 | 1.496 | -0.083 |
| c152 | 0.341 | 8.348 | 0.876 | 0.519 | 7.961 | -0.116 | 4.005 | -0.219 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |       |       |       |       |       |        |       |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| c153 | 0.542 | 6.901 | 1.233 | 0.575 | 6.470 | -0.116 | 1.662 | -0.099 |
| c154 | 0.482 | 9.688 | 0.917 | 0.499 | 9.270 | -0.118 | 1.613 | -0.099 |

ตารางที่ ค.2 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (Texture) สำหรับการใส่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้โปรแกรม Texture Exponent 32

| Test ID | Initial firmness | Toughness | Average Firmness | Relaxation Ratio | Energy absorption | Adhesive force | Springiness | Adhesiveness |
|---------|------------------|-----------|------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------|--------------|
|         | N/mm             | N.mm      | N/mm             |                  | Nmm               | N              | mm          | N.mm         |
| c011    | 0.245            | 7.579     | 0.771            | 0.532            | 7.063             | -0.092         | 1.097       | -0.053       |
| c012    | 0.359            | 7.992     | 0.911            | 0.675            | 7.772             | -0.082         | 2.430       | -0.106       |
| c013    | 0.434            | 7.528     | 1.060            | 0.575            | 7.135             | -0.112         | 1.394       | -0.081       |
| c014    | 0.493            | 4.915     | 1.433            | 0.510            | 4.435             | -0.140         | 1.619       | -0.123       |
| c021    | 0.709            | 6.163     | 1.464            | 0.551            | 5.673             | -0.090         | 0.870       | -0.039       |
| c022    | 0.859            | 5.208     | 1.764            | 0.450            | 4.562             | -0.114         | 0.902       | -0.050       |
| c023    | 0.475            | 6.123     | 1.212            | 0.697            | 5.899             | -0.081         | 1.436       | -0.055       |
| c024    | 0.457            | 6.061     | 1.204            | 0.645            | 5.765             | -0.088         | 1.628       | -0.078       |
| c031    | 0.416            | 7.348     | 1.040            | 0.693            | 7.155             | -0.096         | 1.960       | -0.095       |
| c032    | 0.585            | 7.708     | 1.172            | 0.546            | 7.279             | -0.116         | 7.791       | -0.317       |
| c033    | 0.461            | 7.597     | 1.094            | 0.579            | 7.209             | -0.131         | 2.420       | -0.161       |
| c034    | 0.450            | 6.331     | 1.167            | 0.659            | 6.041             | -0.089         | 1.776       | -0.082       |
| c041    | 0.432            | 5.121     | 1.257            | 0.688            | 4.843             | -0.069         | 1.202       | -0.038       |
| c042    | 0.605            | 7.993     | 1.181            | 0.518            | 7.531             | -0.104         | 1.038       | -0.054       |
| c043    | 0.541            | 7.487     | 1.190            | 0.560            | 7.108             | -0.099         | 1.190       | -0.061       |
| c044    | 0.689            | 6.913     | 1.365            | 0.564            | 6.459             | -0.073         | 0.868       | -0.030       |
| c051    | 0.620            | 9.140     | 1.065            | 0.431            | 8.601             | -0.149         | 1.329       | -0.107       |
| c052    | 0.564            | 8.518     | 1.100            | 0.477            | 7.996             | -0.173         | 1.453       | -0.143       |
| c053    | 0.927            | 8.741     | 1.267            | 0.409            | 8.145             | -0.192         | 1.351       | -0.140       |
| c054    | 0.721            | 7.525     | 1.302            | 0.457            | 6.963             | -0.154         | 1.531       | -0.124       |
| c061    | 0.469            | 6.212     | 1.238            | 0.617            | 5.839             | -0.097         | 1.753       | -0.084       |
| c062    | 0.572            | 7.879     | 1.171            | 0.619            | 7.546             | -0.102         | 1.818       | -0.091       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |       |       |       |       |       |        |        |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| c063 | 0.416 | 6.217 | 1.144 | 0.594 | 5.774 | -0.090 | 2.009  | -0.086 |
| c064 | 0.584 | 8.278 | 1.121 | 0.464 | 7.752 | -0.135 | 2.419  | -0.165 |
| c071 | 0.396 | 7.999 | 0.968 | 0.690 | 7.789 | -0.083 | 1.882  | -0.076 |
| c072 | 0.570 | 5.715 | 1.389 | 0.637 | 5.283 | -0.070 | 1.105  | -0.036 |
| c073 | 0.470 | 7.618 | 1.099 | 0.665 | 7.375 | -0.071 | 1.966  | -0.074 |
| c074 | 0.626 | 9.007 | 1.085 | 0.538 | 8.590 | -0.112 | 1.388  | -0.080 |
| c081 | 0.547 | 7.957 | 1.144 | 0.617 | 7.591 | -0.081 | 0.992  | -0.034 |
| c082 | 0.551 | 8.291 | 1.092 | 0.580 | 7.924 | -0.087 | 1.055  | -0.043 |
| c083 | 0.471 | 6.887 | 1.143 | 0.654 | 6.590 | -0.085 | 1.581  | -0.072 |
| c084 | 0.576 | 7.862 | 1.157 | 0.581 | 7.496 | -0.101 | 1.230  | -0.052 |
| c091 | 0.504 | 7.980 | 1.089 | 0.619 | 7.675 | -0.093 | 1.642  | -0.082 |
| c092 | 0.574 | 7.711 | 1.165 | 0.516 | 7.268 | -0.116 | 1.502  | -0.106 |
| c093 | 0.525 | 8.264 | 1.091 | 0.522 | 7.794 | -0.143 | 1.613  | -0.126 |
| c094 | 0.623 | 7.938 | 1.198 | 0.621 | 7.634 | -0.126 | 2.133  | -0.143 |
| c101 | 0.521 | 7.141 | 1.194 | 0.653 | 6.878 | -0.097 | 2.377  | -0.126 |
| c102 | 0.343 | 6.921 | 0.973 | 0.726 | 6.693 | -0.074 | 1.957  | -0.070 |
| c103 | 0.560 | 7.561 | 1.180 | 0.584 | 7.216 | -0.109 | 1.610  | -0.085 |
| c104 | 0.623 | 7.500 | 1.254 | 0.619 | 7.163 | -0.099 | 1.354  | -0.064 |
| c111 | 0.338 | 7.171 | 0.948 | 0.742 | 6.966 | -0.070 | 2.066  | -0.067 |
| c112 | 0.672 | 5.956 | 1.477 | 0.584 | 5.622 | -0.106 | 1.369  | -0.068 |
| c113 | 0.444 | 6.492 | 1.149 | 0.781 | 6.359 | -0.071 | 1.886  | -0.073 |
| c114 | 0.454 | 7.526 | 1.084 | 0.693 | 7.246 | -0.073 | 1.590  | -0.054 |
| c121 | 0.412 | 6.903 | 1.087 | 0.571 | 6.385 | -0.305 | 10.368 | -0.096 |
| c122 | 0.487 | 7.130 | 1.140 | 0.531 | 6.683 | -0.112 | 1.468  | -0.088 |
| c123 | 0.521 | 7.529 | 1.156 | 0.542 | 7.097 | -0.119 | 1.266  | -0.078 |
| c124 | 0.607 | 8.327 | 1.114 | 0.498 | 7.856 | -0.114 | 1.254  | -0.068 |
| c131 | 0.565 | 6.719 | 1.264 | 0.663 | 6.464 | -0.097 | 1.821  | -0.091 |
| c132 | 0.681 | 9.659 | 1.062 | 0.486 | 9.131 | -0.109 | 1.161  | -0.063 |
| c133 | 0.503 | 5.615 | 1.330 | 0.621 | 5.187 | -0.060 | 1.069  | -0.029 |
| c134 | 0.409 | 6.529 | 1.112 | 0.627 | 6.266 | -0.101 | 2.401  | -0.128 |
| c141 | 0.450 | 9.102 | 0.967 | 0.585 | 8.730 | -0.081 | 1.356  | -0.050 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |       |       |       |       |       |        |       |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| c142 | 0.536 | 8.266 | 1.093 | 0.496 | 7.788 | -0.114 | 1.025 | -0.058 |
| c143 | 0.533 | 6.540 | 1.256 | 0.554 | 6.152 | -0.095 | 1.514 | -0.069 |
| c144 | 0.446 | 6.324 | 1.165 | 0.596 | 5.975 | -0.116 | 1.493 | -0.088 |
| c151 | 0.502 | 5.918 | 1.284 | 0.712 | 5.719 | -0.083 | 2.010 | -0.089 |
| c152 | 0.485 | 6.668 | 1.208 | 0.599 | 6.383 | -0.084 | 2.443 | -0.106 |
| c153 | 0.494 | 8.141 | 1.065 | 0.618 | 7.821 | -0.086 | 1.571 | -0.067 |
| c154 | 0.465 | 6.756 | 1.165 | 0.596 | 6.414 | -0.098 | 2.555 | -0.134 |

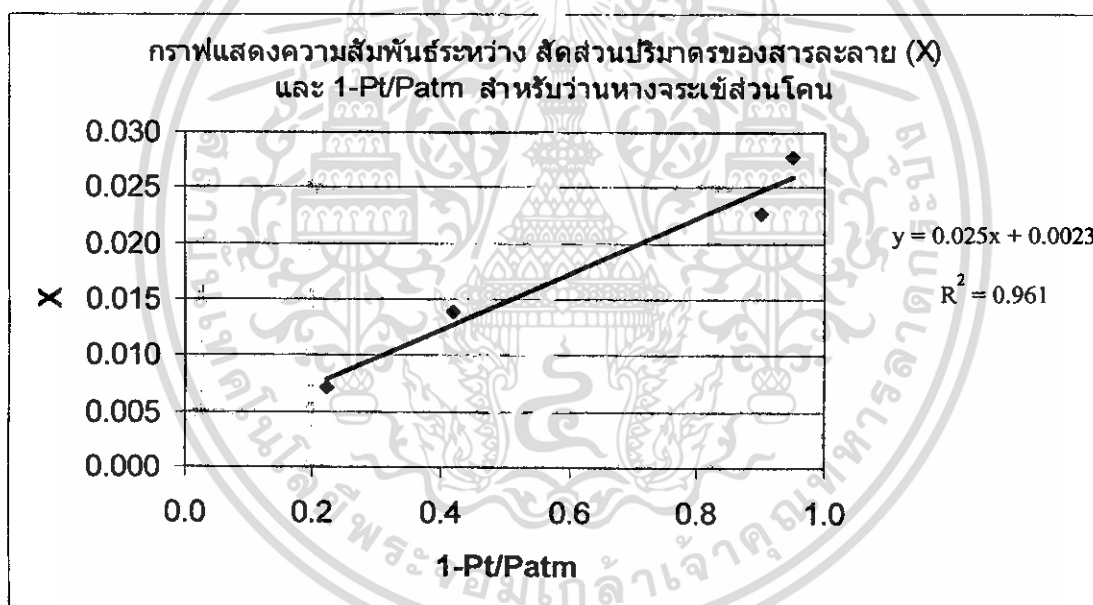


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

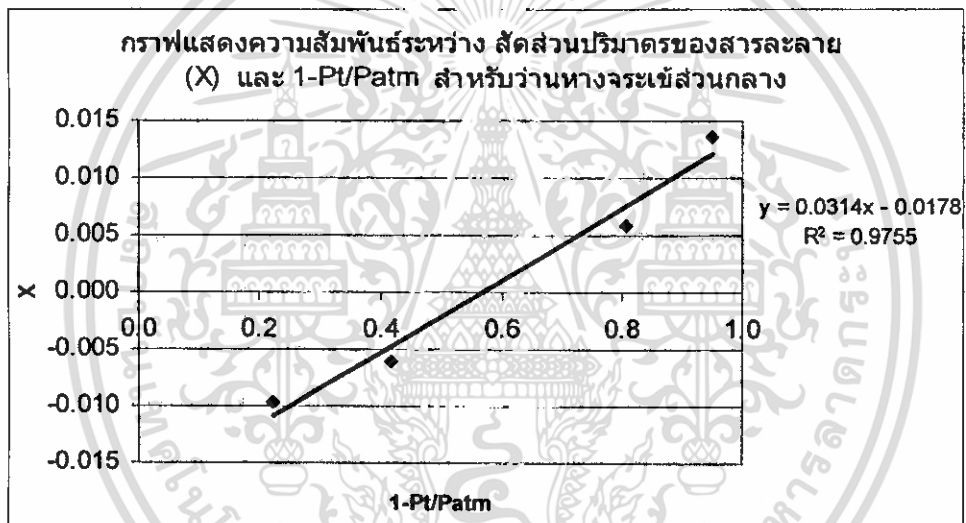
ตารางที่ ง.1 ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนโคน

| Condition | Vacuum<br>(mbar) | $\rho_{iso}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $M_o$<br>(kg) | $M_t$<br>(kg) | M<br>Isotonic<br>(kg) | $V_o$<br>(m <sup>3</sup> ) | X        | $(1-P_t/P_{atm})$ | porosity |
|-----------|------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|----------|-------------------|----------|
| 1         | 800              | 996.11                               | 0.0040        | 0.0040        | 0.0039                | 0.0000039                  | 0.007136 | 0.223301          | 3.530000 |
| 2         | 600              | 998.10                               | 0.0038        | 0.0039        | 0.0037                | 0.0000037                  | 0.013904 | 0.417476          | 3.050930 |
| 3         | 100              | 997.70                               | 0.0038        | 0.0039        | 0.0037                | 0.0000037                  | 0.022629 | 0.902913          | 2.754731 |
| 4         | 50               | 997.30                               | 0.0040        | 0.0041        | 0.0038                | 0.0000038                  | 0.027778 | 0.951456          | 2.741735 |

รูปที่ ง.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ  $1-P_t/P_{atm}$  สำหรับวุ้นหางจรเข้ส่วนโคน

ตารางที่ ง.2 ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนกลาง

| Condition | Pressure (mbar) | $\rho_{iso}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | M <sub>o</sub> (kg) | M <sub>t</sub> (kg) | M Isotonic (kg) | V <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> ) | X       | (1-Pt/Patm) | porosity |
|-----------|-----------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|---------|-------------|----------|
| 1         | 800             | 997.70                            | 0.0039              | 0.0038              | 0.0038          | 3.77E-06                         | -0.0096 | 0.223       | -4.8313  |
| 2         | 600             | 996.90                            | 0.0038              | 0.0037              | 0.0037          | 3.68E-06                         | -0.0060 | 0.417       | -1.1237  |
| 3         | 200             | 996.51                            | 0.0038              | 0.0039              | 0.0038          | 3.77E-06                         | 0.0059  | 0.806       | 0.9311   |
| 4         | 50              | 997.30                            | 0.0039              | 0.0039              | 0.0038          | 3.81E-06                         | 0.0137  | 0.951       | 1.2692   |

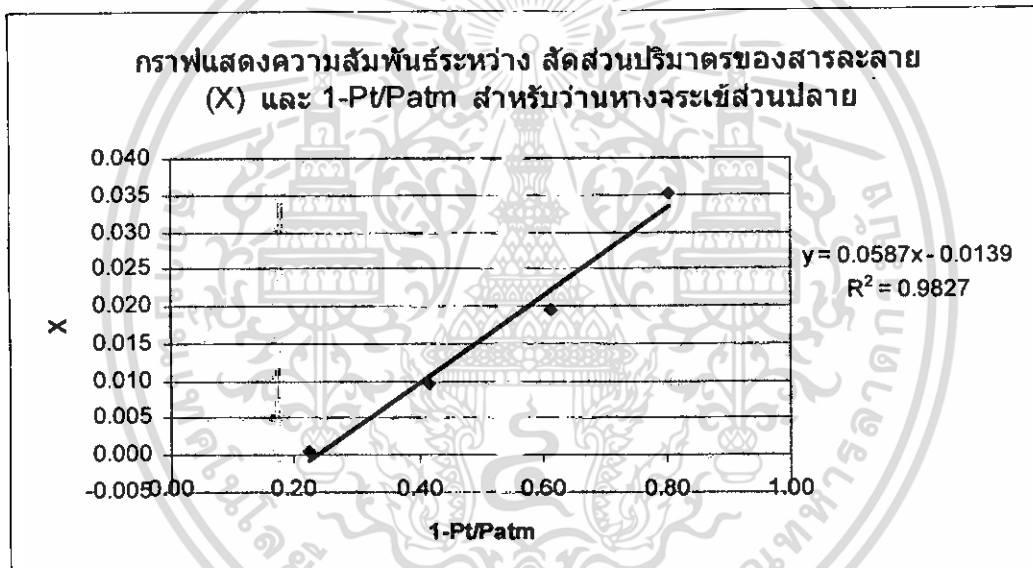


รูปที่ ง.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ 1-Pt/Patm สำหรับวานหางระเข้ส่วนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ตารางบันทึกผลการหาค่าความพรุน ส่วนปลาย

| Condition | Vacuum (mbar) | $\rho_{iso}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $M_o$ (kg) | $M_t$ (kg) | M Isotonic (kg) | $V_o$ (m <sup>3</sup> ) | X        | (1-Pt/Patm) | porosity |
|-----------|---------------|-----------------------------------|------------|------------|-----------------|-------------------------|----------|-------------|----------|
| 1         | 800           | 997.30                            | 0.0039     | 0.0039     | 0.0038          | 3.79E-06                | 0.000529 | 0.223       | -0.3548  |
| 2         | 600           | 996.90                            | 0.0038     | 0.0038     | 0.0037          | 3.69E-06                | 0.009788 | 0.417       | 2.5405   |
| 3         | 400           | 997.70                            | 0.0041     | 0.0041     | 0.0039          | 3.88E-06                | 0.019618 | 0.612       | 3.5975   |
| 4         | 200           | 997.70                            | 0.0040     | 0.0041     | 0.0038          | 3.81E-06                | 0.035226 | 0.806       | 4.1451   |



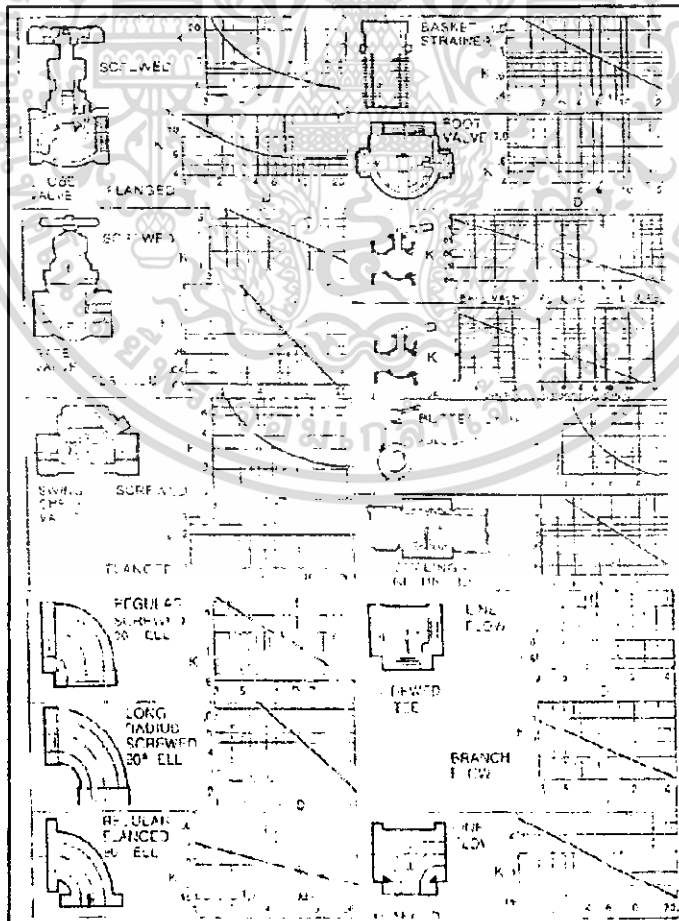
รูปที่ ๓.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนปริมาตรของสารละลาย (X) และ 1-Pt/Patm สำหรับวุ้นหางกระเซ้ส่วนปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

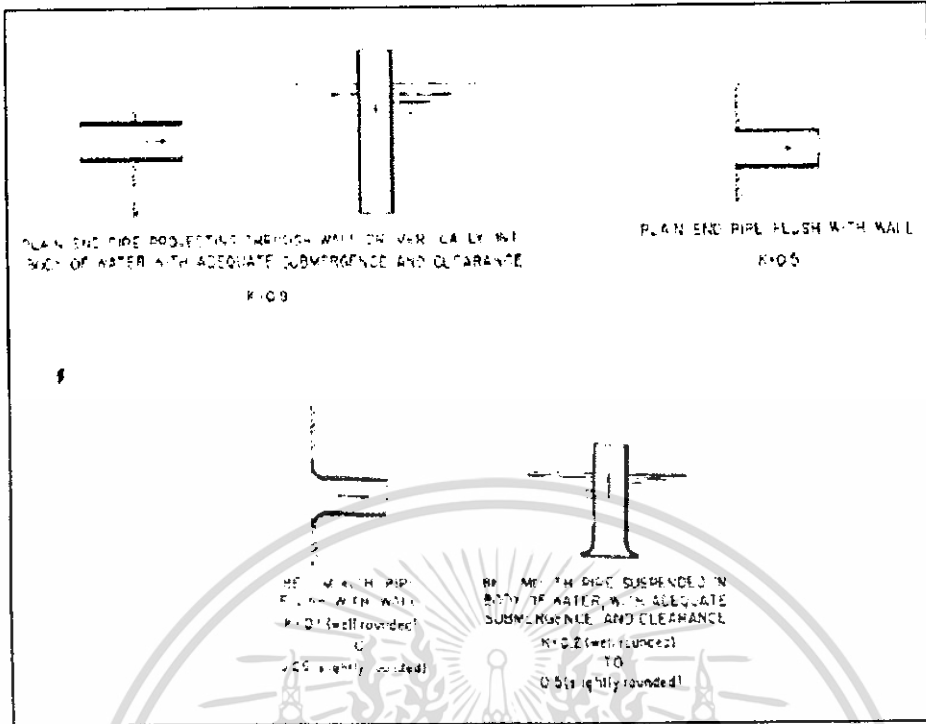
| ชนิดของอุปกรณ์                   | ค่าสัมประสิทธิ์ (K) |
|----------------------------------|---------------------|
| Globe Valve                      | 10.0                |
| Angle Valve                      | 5.0                 |
| Check Valve (swing-open type)    | 0.5-1.5             |
| Gate Valve (Fully Open)          | 0.2                 |
| Close Return Bend (ข้องอตัว)     | 2.2                 |
| Standard Tee (ข้อต่อสามทาง)      | 1.5                 |
| Standard Elbow (ข้องอ 90°)       | 0.9                 |
| Long Sweep Elbow (ข้องอโค้ง 90°) | 0.6                 |
| 45 Elbow (ข้องอ 45°)             | 0.2                 |

รูปที่ จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเรียบของผนังท่อ สำหรับท่อที่ทำด้วยวัสดุชนิดต่างๆ

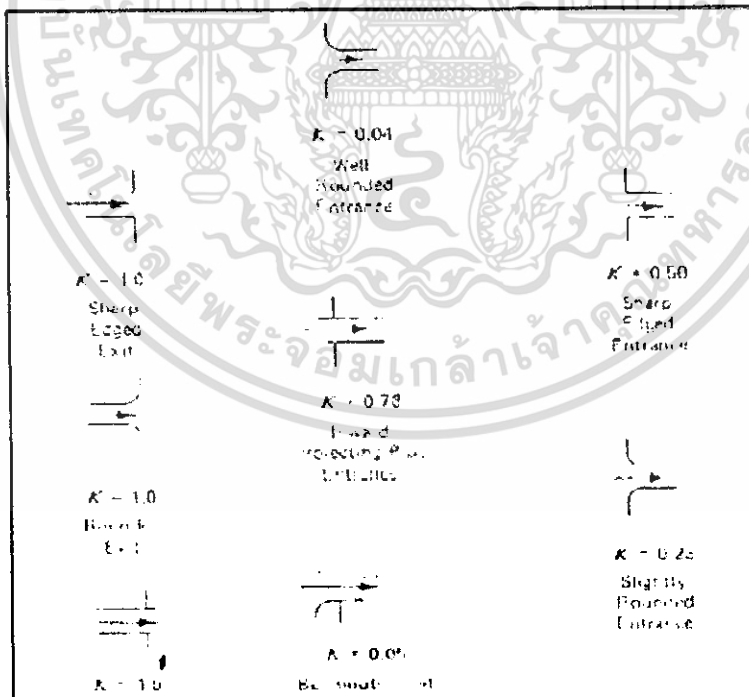


รูปที่ จ.2 ค่า k สำหรับอุปกรณ์ประกอบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.3 ค่า k สำหรับปากทางเข้าแบบต่างๆ



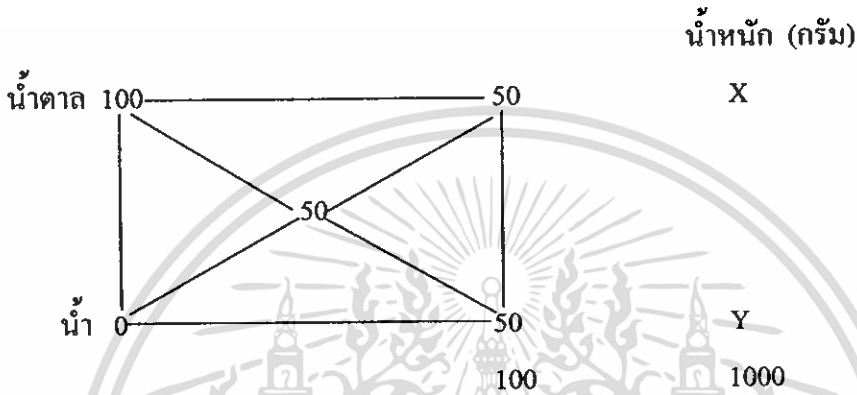
รูปที่ จ.4 ค่า k สำหรับปากทางเข้าและปากทางออกแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## การปรับความเข้มข้นของซูโครสไซรัปโดยวิธีของ Pearson Square

ยกตัวอย่างในการปรับความเข้มข้นของซูโครสไซรัป เช่น หากต้องการเตรียมซูโครสไซรัปเข้มข้น 50 องศาบริกซ์จำนวน 1000 กรัม มีวัตถุดิบ คือ น้ำตาลซูโครส (100 องศาบริกซ์) และน้ำสะอาด (0 องศาบริกซ์) จะคำนวณโดยวิธี Pearson Square ดังนี้



## วิธีคำนวณ

ที่มุมบนและล่างของด้านซ้ายของสี่เหลี่ยม จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด ของวัตถุดิบตรงกลางเป็นระดับความเข้มข้นของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ต้องการ ส่วนมุมบนและล่างด้านขวาของสี่เหลี่ยม จะเป็นผลจากการลบระหว่างค่าที่มุมบนและล่าง กับค่าตัวเลขตรงกลางสำหรับค่า X และ Y เป็นน้ำหนักของวัสดุที่ใช้แต่ละชนิด

|                  |        |   |        |      |
|------------------|--------|---|--------|------|
| น้ำตาลที่ใช้ (X) | 50/100 | = | X/100  |      |
|                  | X      | = | 500    | กรัม |
| น้ำที่ใช้ (Y)    | 50/100 | = | Y/1000 |      |
|                  | Y      | = | 500    | กรัม |

หากวัตถุดิบเริ่มต้นเป็นน้ำเชื่อม จะต้องปรับให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ให้ใช้วิธีเดียวกัน โดยต้องทราบค่าความเข้มข้นของน้ำเชื่อม แล้วใช้ Refractometer วัด