สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

CONCENTRATED COCONUT MILK MACHINE BY EVAPORATIVE VACUUM SYSTEM

นายปัญจพนธ์	นามวงศ์	รหัส	46015492
นายพรเทพ	เอี่ยมบำรุง	รหัส	46015497
นายมารัตน์	คชายุทธ	รหัส	46015502

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62655
วัน,เดือน,ปี 21 ส.ค. 2549

.b.....
.ส.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

CONCENTRATED COCONUT MILK MACHINE BY EVAPORATIVE VACUUM SYSTEM

โดย

นายปัญจพนธ์	นามวงศ์	รหัส	46015492
นายพรเทพ	เอี่ยมบำรุง	รหัส	46015497
นายมารัตน์	คชายุทธ	รหัส	46015502

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

Concentrated Coconut Milk Machine by Evaporative Vacuum System

ผู้จัดทำ

1. นายปัญจพนธ์ นามวงศ์ รหัส 46015492
2. นายพรเทพ เอี่ยมบำรุง รหัส 46015497
3. นายมารัตน์ ดชายุทธ รหัส 46015502

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. วิภา เจียระไนวชิระ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

นายปัญจพนธ์ นามวงศ์ 46015492
นายพรเทพ เอี่ยมบำรุง 46015497
นายมารัตน์ คชายุทธ 46015502
รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. วิภา เจียระไนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบ เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ตัวเครื่องประกอบด้วย 1) ถังสุญญากาศ 2) ใบกวนและมอเตอร์ขับ 3) ฮีตเตอร์ และระบบควบคุมอุณหภูมิ 4) ชุดคอนเดนเซอร์ 5) ปั๊มสุญญากาศ. รายละเอียดของตัวเครื่องมีดังนี้ ถังกวนสามารถบรรจุน้ำกะทิได้ 5 l ความเร็วรอบใบกวน 5, 10, 50rpm ฮีตเตอร์ขนาด 1000 watt ช่วงความดันสุญญากาศที่ทำได้คือ 760 – 40 mmHg ปั๊มสุญญากาศมีขนาด 4.5m^3/hr หรือ 2 ft^3/min ใช้มอเตอร์ขนาด ¼ HP ชุด Condenser มีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 5 l/min น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิ 1-3 $^{\circ}C$ มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 0.248 m^2 ได้ศึกษาคุณสมบัติของน้ำกะทิเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ 3สภาวะ คือ 1) ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 $^{\circ}C$ 2) ความดัน 50 mmHg อุณหภูมิ 30-35 $^{\circ}C$ 3) ความดัน 40 mmHg อุณหภูมิ 15-20 $^{\circ}C$ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการระเหย ได้ผลคือ สภาวะที่1 ค่า WICIE เปลี่ยนจาก 46.54 เป็น 8.29 ความหนืดของน้ำกะทิเพิ่มจาก 17.31 cp เป็น 183.45 cp ที่ 100 rpm (รอบของหัววัด) ค่า total soluble solids ของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นจาก 12.82 %Brix เป็น 36.73 %Brix สภาวะที่ 2 ค่า WICIE เปลี่ยนจาก 45.72 เป็น 14.60 ความหนืดเพิ่มจาก 17.98 cp เป็น 183.51 cp ที่ 100 rpm ค่า total soluble solids เพิ่มขึ้นจาก 13.24 %Brix ไปเป็น 31.57 %Brix สภาวะที่ 3 ค่า WICIE เปลี่ยนจาก 47.02 เป็น -58.22 ความหนืดเพิ่มจาก 18.04 cp เป็น 146.26 cp ที่ 100 rpm ค่า total soluble solids เพิ่มขึ้นจาก 13.50 %Brix ไปเป็น >53 %Brix จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า สภาวะการทดลองที่ 1 มีความเหมาะสมที่สุด จึงได้นำสภาวะนี้มาทำการทดลองเพื่อหา เปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไปและอัตราการระเหย ผลคือ 36.2 % โดยปริมาตร และ 0.91 l/hr ตามลำดับ โดยที่ค่า WICIE เปลี่ยนจาก 44.28 เป็น 14.27 ความหนืดเพิ่มจาก 18.96 cp ไปเป็น 92.99 cp ที่ 100 rpm ค่า total soluble solids เพิ่มขึ้นจาก 13.28 %Brix ไปเป็น 30.27 %Brix น้ำกะทิเริ่มต้นมีค่าค่า k = 0.0394 Pa s^n ค่า n = 0.7313 น้ำกะทิเป็นของเหลวชนิด Non-Newtonian ประเภท Pseudoplastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Concentrated Coconut Milk Machine by Evaporative Vacuum System

Phanjaphon Namwong 46015492

Pornthep Eimbumrung 46015497

Marat Kachayut 46015502

Assoc. Prof. Panmanas Sirisomboon Advisor

Assist. Prof. Vipa Jayranaiwachira Advisor

2005

Abstract

This project was aimed to investigate, design, fabricate and test the Concentrated Coconut Milk Machine by Evaporative Vacuum System. The machine composed of 1) chamber for coconut milk 2) stirring paddle with motor 3) heater and temperature control system 4) condenser and 5) vacuum pump. The chamber can contain 5 l coconut milk. The stirring paddle rotational speeds are 5, 10 and 50 rpm. Heater power is 1000 watt. Range of vacuum pressure is 760 – 40mmHg. The vacuum pump flow rate is 4.5 m^3/hr or 2 ft^3/min. The pump is driven by ¼ HP motor. Condenser cold water has 5 l/min flow rate, 1-3 °C temperature and 0.248m^2 heat exchanged surface. Concentrated coconut milk properties (color, viscosity, total soluble solids, and fat concentration) were investigated under 3 different conditions (vacuum pressure × temperature) included 1) 80 mmHg at 40-42 °C 2) 50 mmHg at 30-35 °C and 3) 80 mmHg at 15-20 °C. The first condition, the WICIE (White index CIE standard) was changed from 46.54 to 8.29, viscosity from 17.31 to 183.43 cp, total soluble solids from 12.82 to 36.73 %Brix and fat concentration from 38.33 to 64.30 %. The second condition, the WICIE was changed from 45.72 to 14.60, viscosity from 17.98 to 83.51 cp, total soluble solids from 13.24 to 31.57 %Brix and fat concentration from 38.83 to 52.67 %. The third condition, the WICIE was changed from 47.02 to -58.22, viscosity from 18.04 to 146.26 cp, total soluble solids from 13.50 to >53 %Brix and fat concentration from 38.50 to 71.83 %. It could be concluded that the first was the best. Then the test at the condition was performed to determine the percent of evaporated water and the evaporation rate. The result was 36.2 % by volume and 0.91 l/hr, respectively. The WICIE was changed from 44.28 to 14.27, viscosity from 28.96 to 92.99 cp, total soluble solids from 13.28 to 30.27 %Brix and fat concentration from 39.42 to 62.50 %. The consistency index and flow behavior index of raw coconut milk were 0.0394 Pa s^n and 0.7313, respectively. The raw coconut milk was Pseudoplastic Non-Newtonian fluid.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจจะสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับการช่วยเหลือให้คำแนะนำจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบรูณ์ , ผศ.ดร. วิภา เจียระไนวชิระ ที่ช่วยชี้แนะแนวทางตลอดจนดูแลเอาใจใส่ ตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นปริญญานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน รวมถึง พี่ติ้ก พี่แฝด พี่น้อย พี่ตุ่ม พี่กฤษณ์ พี่ชยัน และเพื่อนๆ พี่น้อง ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ที่ช่วยให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บริษัท Pneumax ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ในเรื่องสุญญากาศ และการดูแลรักษาปั๊มสุญญากาศ

ขอขอบพระคุณ โรงงาน food merit จ.ชลบุรี ที่กรุณาวัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันของน้ำกะทิโดยวิธี Gerber Method

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศรีวิศาล เกษรา จำกัด ที่ช่วยดูแล สร้างชิ้นส่วนสแตนเลส ตลอดจนให้คำแนะนำ แก้ไขส่วนประกอบของเครื่องให้ดียิ่งขึ้น

ขอบคุณท่าน ยืนยง โอภากุล สำหรับบทเพลงที่กังวานอยู่ในหัวใจในยามที่หมดสิ้นกำลังใจและเรี่ยวแรง “เป็นเพื่อนคลายเหงาคอยปลุกเร้าทางความคิด เป็นผู้ปลอบจิตและปลุกใจให้ต่อสู้”

ข้าพเจ้าขอกราบขอพระคุณอย่างสุดซึ้ง ให้แด่ คุณพ่อ คุณแม่และผู้ปกครอง ของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นบุคคลที่สำคัญที่สุดของชีวิตของข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ ที่ได้เลี้ยงข้าพเจ้าจนเติบใหญ่ดูแลเอาใจใส่และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีที่สุด พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาแก่ข้าพเจ้าอย่างเต็มที่ตลอดมา ข้าพเจ้าจะขอระลึกพระคุณอันสุดประมาณและกราบขอบพระคุณ ณ ที่นี้

ขอคุณพระศรีรัตนตรัยจงช่วย คลบันดาล ปกปักษ์รักษาให้ทุกท่านที่ข้าพเจ้าเอ่ยถึงให้มีสุขภาพและพลานามัยที่แข็งแรงและ มีความสุข ตลอดไป

ขอขอบคุณ

นาย ปัญจพนธ์ นามวงศ์
นาย พรเทพ เอี่ยมบำรุง
นาย มารัตน์ คชายุทธ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ช

สารบัญภาพ ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.5 วิธีการดำเนินงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการระเหย 3

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว (factors influencing liquid boiling) 3

2.1.1 ความดันภายนอก (external pressure) 3

2.1.2 ปริมาณตัวถูกละลายและจุดเดือดสูงขึ้น 3

(dissolved solute-boiling point rise : BPR)

2.1.3 ไฮโดรสแตติก – เฮด (hydrostatic head) 4

2.2 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อการระเหย 4

(the influence of feed liquor properties on evaporation)

2.2.1 ความหนืด (viscosity) 4

2.2.2 ตะกรัน (fouling – scaling) 4

2.2.3 การเกิดฟอง (foaming) 4

2.2.4 การกัดกร่อน (corrosion) 5

2.2.5 ความไวต่ออุณหภูมิ (temperature sensitivity) 5

2.2.6 การสูญเสียกลิ่น (aroma loss) 5

2.3 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลเมื่อจุดเดือดสูงขึ้น (boiling point elevation) 5

2.3.1 วิธีการคำนวณ (calculation method) 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การใช้กฎของดูริงค์ (Duhring's rule) 7
2.4 การถ่ายเทความร้อนระหว่างการระเหย (heat transfer during evaporation) 8
2.4.1 ตัวให้ความร้อน (heating medium) 8
2.4.2 ผิวที่ให้ความร้อน (heating surface) 9
2.4.3 ผลิตภัณฑ์ (product) 9
2.5. ชนิดของเครื่องระเหย (type of evaporator) 10
2.5.1 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นครั้ง (batch - type pan evaporator) 10
2.5.2 เครื่องระเหยแบบการหมุนเวียนตามธรรมชาติ 11
(natural circulation evaporator)
2.5.3 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้น (rising film evaporator) 12
2.5.4 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง (falling film evaporator) 13
2.5.5 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง 14
(rising / falling film evaporator)
2.5.6 เครื่องระเหยชนิดบังคับให้หมุนเวียน (force circulation evaporator) 15
2.5.7 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบางๆที่มีการกวน 16
(agigated thin film evaporator)
2.6 การตรวจเอกสาร 17
บทที่ 3 ทฤษฎีของระบบสุญญากาศ 18
3.1 ความดันไอ (vapour pressure) 18
3.2 ความเร็วปั๊ม (pumping-speed , Sp) 19
3.3 ปั๊มกลโรตารี (mechanical rotary pump) 19
3.3.1 ปั๊มกลโรตารีแบบแวน(rotary vane pump) 19
3.3.2 ก๊าซบัลลาสต์(gas ballast) 21
3.3.3 ความเร็วปั๊ม (pump speed) หรือค่าขจัดของปั๊ม (pump displacement) 22
3.3.4 ความดันต่ำสุด (ultimate pressure) 23
3.4 การออกแบบระบบสุญญากาศร่วมกับการเลือกปั๊มกลโรตารี 25
3.4.1 ผลของท่อนำก๊าซต่อความเร็วปั๊มและเวลาที่ปั๊มลง 25
3.4.2 การเลือกขนาดท่อนำก๊าซที่ต่อกับปั๊มกลโรตารี 27
3.4.3 การคำนวณหาขนาดของปั๊มสุญญากาศเพื่อการขจัดน้ำจากผลิตภัณฑ์ 27
3.5 อุปกรณ์ดักไอน้ำและไอสาร (moisture and vapour traps) 28
3.6 สารทำแห้งและดูดความชื้น 29
3.6.1 สารดูดซับ (sorption) 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ซีล (Seal) 30
3.8 การวัดความดันสุญญากาศ (vacuum measurement) 31
3.8.1 หน่วยวัดความดัน 31
3.8.2 อุปกรณ์วัดความดัน 32
3.8.3 เกจบัวดอง (Bourdon gauge) 33
บทที่ 4 ทฤษฎีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 35
4.1 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย 35
4.1.1 การบิด 35
4.2 ภาชนะความดันผนังบาง (thin – walled pressure vessels) 36
4.2.1 ความเค้นในภาชนะความดันผนังบาง 36
(stress in thin wall pressure vessel)
4.3 ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม 39
บทที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับน้ำกะทิเข้มข้น 40
5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของสี 40
5.1.1 ค่าดัชนีความขาว (whiteness indices) 41
5.1.2 CIE 1976 L*a*b* scale 42
5.2 ความหนืด (viscosity) 43
5.3 refractometer 45
5.4 เปอร์เซ็นต์ไขมัน 45
ทบที่ 6 การคำนวณและการออกแบบ 47
6.1 แนวความคิดในการออกแบบ 47
6.2 การหาระดับความดันสุญญากาศที่ต้องการในการทำระเหย 47
6.3 การออกแบบ ทดลอง และสร้างใบกวน ลักษณะต่าง ๆ 48
6.3.1 ใบกวนแบบแผ่นตรงแบบเจาะรูทั่วแผ่น 48
6.3.2 ใบกวนแบบแผ่นโค้ง 49
6.5.3 ใบกวนแบบกระบวย 51
6.3.4 ใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง 52
6.4 การหาขนาดของถังสุญญากาศ 53
6.5 การหาความหนาของผนังถังสุญญากาศ 54
6.6 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาขับใบกวนและขนาดมอเตอร์ 54
6.7 ระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำกะทิในถังกวน 56
6.8 แบบสำเร็จ เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 วิธีการทดลอง การคำนวณและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 69
7.1 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำระเหยน้ำกะทิ 69
7.1.1 วัตถุประสงค์ 69
7.1.2 วัสดุ และอุปกรณ์ 69
7.1.3 วิธีการทดลอง 72
7.1.4 วิธีการวัดคุณสมบัติทางกายภาพ 73
7.1.5 ผลการทดลอง 74
7.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ 83
7.2 การทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไปจากน้ำกะทิโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทำระเหย 84
7.2.1 วัตถุประสงค์ 84
7.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ 84
7.2.3 วิธีการทดลอง 84
7.2.4 ผลการทดลอง เปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไปและอัตราการระเหย 85
7.2.5 ผลการทดลอง ลักษณะทางกายภาพของน้ำกะทิ 86
บทที่ 8 สรุป และ วิจารณ์ผล 91
8.1 สรุปเกี่ยวกับชุดเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 91
8.2 สรุปผลการทดลอง 91
8.2.1 ค่า n และค่า k ของน้ำกะทิเริ่มต้น 91
8.2.2 การทดลองโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทำระเหย 91
8.3 ข้อเสนอแนะ 92
8.3.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับชุดเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 92
8.3.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับผลการทดลอง 93
ภาคผนวก ก. 94
ภาคผนวก ข. 96
ภาคผนวก ค. 97
ภาคผนวก ง. 113
เอกสารอ้างอิง 122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิ	17
3.1 ความยาวท่อนำก๊าซ	26
3.2 ค่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำก๊าซและความยาวของท่อ	27
3.3 คุณสมบัติของสารทำแห้ง	29
3.4 การแปลงค่าหน่วย	31
3.5 อุปกรณ์วัดความดันและช่วงใช้งาน	32
6.1 สรุปผลการทดลองการหาระดับความดันสุญญากาศที่ต้องการในการทำระเหย	48
7.1 ค่าสีเฉลี่ยของ สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C	75
7.2 ค่าสีเฉลี่ยของ สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C	75
7.3 ค่า สี เฉลี่ยของสภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C	75
7.4 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C	77
7.5 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C	77
7.6 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C	78
7.7 total soluble solids ของน้ำกะทิที่เวลาและสภาวะต่าง ๆ	79
7.8 ค่า fat concentration เฉลี่ยของน้ำกะทิที่สภาวะต่าง ๆ	81
7.9 ค่า apparent viscosity ที่ shear rate ต่าง ๆ	82
7.10 ค่า mean และค่า standard deviation ของค่า WICIE และ ความแตกต่างของสีกะทิก่อนและหลังการทดลองที่ช่วงเวลาต่างๆ	83
7.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรน้ำกะทิกับระดับน้ำกะทิในถัง	85
7.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับน้ำกะทิในถัง กับปริมาตรของ น้ำกะทิที่ระเหยไปที่เวลาต่าง ๆ	85
7.13 การเปรียบเทียบค่าสี ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง	87
7.14 การเปรียบเทียบค่า Viscosity ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง	88
7.15 การเปรียบเทียบค่า total soluble solids ของน้ำกะทิหลังการทดลอง	89
7.16 ค่า fat concentration ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. Boiling point of water – pressure/temperature relationship table 94
ข. ตารางประกอบการคำนวณ ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม 96
ค.1 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่าสี เพื่อเปรียบเทียบค่า WICIE 97
ค.2 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า viscosity 100
ค.3 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหา ค่า total soluble solids 107
ค.4 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า fat concentration เพื่อเปรียบเทียบค่า % fat 109
ค.5 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่าสี เพื่อเปรียบเทียบค่า WICIE 109
ค.6 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า viscosity 110
ค.7 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า total soluble solids 112
ง.1 การทดลองสภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C 111
ง.2 การทดลองสภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 30-35 °C 114
ง.3 การทดลองสภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C 117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปภาพ		หน้าที่
รูปที่	2.1 เส้นดูริ่งค์แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของปริมาณตัวถูกละลายต่อจุดเดือดที่สูงขึ้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์	7
	2.2 กราฟการเดือดที่แสดงบริเวณต่าง ๆ ของการต้มใกล้บริเวณผิวที่ร้อน	10
	2.3 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นกะ	10
	2.4 เครื่องระเหยชนิดหมุนเวียนแบบธรรมชาติ	11
	2.5 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้น	12
	2.6 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง	13
	2.7 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง	14
	2.8 เครื่องระเหยแบบบังคับการหมุนเวียน	15
	2.9 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มที่มีการกวน	16
	3.1 ปั๊มกลโรตารีแบบเวน	20
	3.2 ปั๊มกลโรตารีแบบเวน	21
	3.3 ความเร็วปั๊ม	23
	3.4 การปั๊มลง	24
	3.5 ความนำก๊าซ	25
	3.6 อุปกรณ์ดักไอ	28
	3.7 การซีลโดยใช้วงแหวนยางและลักษณะของวงแหวนยาง	30
	3.8 (A) เกจบัวดอง	33
	3.8 (B) เกจบัวดอง	34
	4.1 รูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง	36
	4.2 ส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดัน	38
	4.3 ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม	39
	5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ของของไหลชนิดต่างๆ	44
	5.2 ชุดเครื่องวิเคราะห์ไขมันโดยวิธี Babcock และ Gerber	46
	6.1 ใบกวนแบบแผ่นตรงแบบเจาะรูทั่วแผ่น	49
	6.2 ใบกวนแบบแผ่นโค้ง	50
	6.3 ใบกวนแบบกระบวย	51
	6.4 ใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง	52
	6.5 วงจรวงจรควบคุมการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ	56
	6.6 แบบเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 แบบส่วนประกอบชุดถังสุญญากาศ 59
6.8 แบบถังสุญญากาศ 60
6.9 แบบฝาหน้า 61
6.10 แบบฝาหลัง 62
6.11 แบบชุดยึดเพลา 63
6.12 แบบฮีตเตอร์ 64
6.13 แบบใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง 65
6.14 แบบชุดใบกวน 66
6.15 แบบดับปลิ้ง 67
6.16 แบบชุดคอนเดนเซอร์ 68
7.1 น้ำกะทิ(หัวกะทิ) ปริมาตร 5 ลิตร 69
7.2 เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 70
7.3 เครื่อง Color meter 70
7.4 Rotational Viscometer 71
7.5 Refractometer 71
7.6 เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมัน 71
7.7 การเปลี่ยนแปลงของค่า WICIE ของน้ำกะทิที่สภาวะต่าง ๆ 76
7.8 การเปรียบเทียบค่าความหนืด ก่อน และหลังการทดลอง ที่สภาวะต่าง ๆ 78
7.9 การเพิ่มขึ้นของค่า total soluble solids เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นที่สภาวะต่างๆ 80
7.10 การเปลี่ยนแปลงของ %fat ที่สภาวะต่างๆ 81
7.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง apparent viscosity ของน้ำกะทิเริ่มต้น กับ shear rate 82
7.12 ปริมาณน้ำกะทิที่หายไปเทียบกับเวลา 86
7.13 การเปรียบเทียบค่า WICIE ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง 87
7.14 การเปรียบเทียบค่า Viscosity ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 88
7.15 การเปรียบเทียบค่า total soluble solids ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง 89
7.16 การเปรียบเทียบค่า %fat ก่อนและหลังการทดลอง 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การบริโภคผลิตภัณฑ์จากกะทิ ที่ได้มาจากมะพร้าวมีปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรรูป ซึ่งปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ แบบน้ำกะทิสำเร็จรูป และแบบผง มีแนวโน้มจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากมีความสะดวก และเป็นผลผลิตพื้นฐานของเกษตรกรรมไทย แต่มีข้อเสียคือ แบบน้ำกะทิสำเร็จรูปจะมีปริมาณน้ำมาก มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงเนื่องจากน้ำหนัก ส่วนแบบผง ยากต่อการนำมาละลายและการนำไปใช้ ดังนั้น การแปรรูปผลผลิตของน้ำกะทิในรูปน้ำกะทิเข้มข้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มมูลค่าของน้ำกะทิแล้ว ยังเป็นการสะดวกใช้ต่อการบริโภค ลดน้ำหนักในการขนส่ง และยังเป็นการถนอมอาหารอีกรูปแบบหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีความต้องการกะทิเข้มข้นเยือกแข็งส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่นอีกด้วย โดยปัจจุบันการทำน้ำกะทิเข้มข้นตามท้องตลาดยังคงใช้ความร้อนในการเคี่ยว และมีการเติมแป้งลงไปเพื่อให้น้ำกะทิมีความเข้มข้นขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะใช้ระบบสุญญากาศเข้ามาทำให้น้ำกะทิเข้มข้น แทนการใช้ความร้อน ในโครงงานนี้จะออกแบบ และสร้างเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้น โดยอาศัยหลักการระเหยแบบสุญญากาศ คือ การลดความดันลงให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อลดจุดเปลี่ยนเป็นไอของน้ำในน้ำกะทิ ส่งผลให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้คุณภาพของน้ำกะทิ เช่น สี กลิ่น ยังคงอยู่และไม่เกิดการแตกมัน

โครงงานนี้จึงทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้น แบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ โดยการศึกษาหาช่วงความดันที่เหมาะสม รวมถึงการออกแบบระบบการกวน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระเหย เพื่อให้ได้น้ำกะทิเข้มข้นที่มีคุณภาพ สะดวกต่อการบริโภค ประหยัดค่าขนส่งเนื่องจากปริมาณน้ำในน้ำกะทิลดลง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เพื่อการส่งออก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของน้ำกะทิเข้มข้นที่ได้จากสภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของน้ำในน้ำกะทิโดยใช้ระบบสุญญากาศเท่านั้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการผลิต ผลิตภัณฑ์ใหม่ คือน้ำกะทิเข้มข้นที่มีปริมาณน้ำลดลง โดยที่คุณภาพของน้ำกะทิยังคงสภาพที่ดีอยู่ ซึ่งสามารถปรุงแต่งรสชาติของน้ำกะทิได้ เช่น การทำให้หวานขึ้น หรือการใส่สี และยังเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมการส่งออกน้ำกะทิ

1.5 วิธีการดำเนินงาน

โครงงานนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ ทฤษฎีและหลักการระเหย หลักการของระบบสุญญากาศ การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย จากนั้น ทำการออกแบบเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้น โดยเริ่มจากออกแบบใบกวนของระบบ โดยทำการทดลอง ออกแบบและทำการสร้างใบกวน เพื่อทดสอบกับชุดทดลองที่ทำการจำลองขึ้น หาขนาดของมอเตอร์ขับใบกวน ทำการออกแบบและหาขนาดของถังสุญญากาศ ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง

จากนั้นขั้นตอนต่อมาคือ การทดลอง เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้น หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิที่ได้จาก เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศและเปรียบเทียบกับน้ำกะทิเริ่มต้นก่อนการทดลอง หาข้อพกพร่องของเครื่องและทำการแก้ไขปรับปรุง และนำข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดมาเขียนรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการระเหย

(เนื้อหาทั้งหมดในบทนี้อ้างอิงมาจาก [7])

การระเหยเป็นหน่วยปฏิบัติการ (unit operation) ที่สำคัญและนิยมใช้ในการกำจัดน้ำจากอาหารเหลวเจือจาง เพื่อให้ได้อาหารเหลวที่เข้มข้น จุดประสงค์ของกระบวนการคือช่วยป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการทำให้ของเหลวเข้มข้นก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปอื่นต่อไปด้วย เช่นการตกผลึก ตัวอย่างของกระบวนการระเหย ได้แก่ การผลิตมะเขือเทศเข้มข้น (tomato paste)

การระเหยแตกต่างจากการทำแห้ง (dehydration) เนื่องจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการระเหย จะอยู่ในสภาพของเหลวนอกจากนี้ยังแตกต่างจากการกลั่น (distillation) เพราะว่าไอที่ได้จากเครื่องระเหยจะไม่ถูกแยกออกเป็นส่วนๆ (fraction) เหมือนการกลั่น

อาหารเข้มข้นทำได้โดยการระเหยน้ำอิสระ (free water) ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ซึ่งกระทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดเดือด (bubble point) แล้วคงไว้ ณ อุณหภูมิดังกล่าวในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการแต่ในกรณีที่อาหารไม่ทนต่อความร้อน (heat sensitivity) การระเหย ควรกระทำภายใต้ความดันสุญญากาศ การให้สภาวะสุญญากาศค่อนข้างสูง (ความดันต่ำ) จะทำให้ผลิตภัณฑ์ระเหยที่อุณหภูมิต่ำดังนั้นจึงลดความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว (factors influencing liquid boiling)

แรงขับเคลื่อน (driving force) ของการถ่ายเทความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำ และของเหลวที่ถูกทำให้ร้อน ซึ่งอุณหภูมิของของเหลวนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

2.1.1 ความดันภายนอก (external pressure)

ของเหลวจะเดือดต่อเมื่อความดันไอของของเหลวเท่ากับความดันภายนอกที่กระทำต่อของเหลวในกรณีที่ทำตัวละลายเป็นน้ำ ข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและอุณหภูมิดังแสดงในภาคผนวกตารางที่ ก.

2.1.2 ปริมาณตัวถูกละลายและจุดเดือดสูงขึ้น (dissolved solute-boiling point rise : BPR)

จุดเดือดของสารละลายจะสูงกว่า จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันเดียวกันยิ่งสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จุดเดือดก็จะสูงขึ้น ขณะที่กระบวนการระเหยเกิดขึ้น ความเข้มข้นของของเหลวจะเพิ่มขึ้น จุดเดือดก็จะสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำและของของเหลวลดลงและอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างมากด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงนี้ จะต้องนำไปพิจารณาเมื่อออกแบบเครื่องระเหย

2.1.3 ไฮโดรสเตติก –เฮด (hydrostatic head)

ที่ระดับใดๆ ที่ต่ำกว่าผิวอิสระ (free surface) ความดันของของเหลว ณ ระดับนั้นจะเท่ากับผลรวมของความดันที่ระดับผิวนั้นและความดันที่เทียบเท่ากับ ไฮโดรสเตติกเฮด (ระยะแนวดิ่งจากผิวอิสระจนถึงระดับที่พิจารณา) ดังนั้น อุณหภูมิจุดเดือดของของเหลวในเครื่องระเหยจะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น และมีผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำและของเหลวเดือดลดลง ซึ่งอาจนำไปสู่การให้ความร้อนแก่ของเหลวมากเกินไป (overheating) จนของเหลวร้อนยิ่งยวด (super – heated) ได้การให้ความร้อนมากเกินไป จะทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ (Heat damage) ผลของไฮโดรสเตติก – เฮด จะเด่นชัดมากขึ้นในเครื่องระเหยสุญญากาศ และเป็นปัญหาของเครื่องระเหยแบบท่อยาว (long – tube evaporators) โดยทั่วไปอุณหภูมิจุดเดือดเฉลี่ยของของเหลวที่ใช้คำนวณ ในการออกแบบจะใช่ที่ความดันที่ระดับของเหลวครึ่งทาง (halfway up) ของเครื่องระเหย

2.2 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อการระเหย (influence of feed liquor properties on evaporation)

การเลือกชนิดของเครื่องระเหยจะขึ้นกับคุณสมบัติของของเหลวซึ่งได้แก่

2.2.1 ความหนืด (viscosity)

เมื่ออาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น อัตราการหมุนเวียนจะลดลง และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงด้วย โดยทั่วไป ความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อการระเหยดำเนินต่อไป

2.2.2 ตะกรัน (fouling – scaling)

ตะกรันเป็นปัญหาสำคัญของการระเหยน้ำออกจากอาหาร โดยเฉพาะพวกโปรตีนและน้ำตาล (polysaccharides) ที่มีอยู่ในอาหารสามารถเกาะติดค้างอยู่ที่ผิว ซึ่งยากต่อการกำจัดออกไป และมีผลทำให้ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดลดลง (ค่า U ลดลง) อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องตะกรันจะเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อกระแสของอาหารไหลด้วยความเร็วสูง

2.2.3 การเกิดฟอง (foaming)

การเกิดฟองระหว่างการต้มมักจะพบในของของเหลวบางชนิด โดยเฉพาะในกรณีที่การต้มเกิดขึ้นภายใต้ ความดันที่ลดลงและไฮโดรสเตติก- เฮด การเกิดฟองเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับแรงระหว่างผิว (interfacial force) ที่เกิดขึ้นระหว่างไอของของเหลวร้อนยิ่งยวดและของแข็งที่แขวนลอยอยู่ โดยที่ของแข็งจะเป็นนิวคลีไอของการเกิดฟอง การใช้สารป้องกันการเกิดฟอง (antifoam) อาจช่วยป้องกันการเกิดฟองแต่จำเป็นต้องพิจารณาว่าเป็นสารเจือปนที่ยอมรับให้ใช้ได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การกัดกร่อน (corrosion)

อาหารบางอย่างเช่นน้ำผลไม้ มักจะมีองค์ประกอบที่สามารถกัดกร่อนผิวที่ แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นอันตรายต่อเครื่องมือและยังก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะในอาหารได้ ดังนั้นเครื่องระเหยส่วนมากจะใช่เหล็กปลอดสนิมเป็นโครงสร้าง และทำให้เข้มข้นขึ้นโดยเครื่องระเหยแบบบังคับการหมุนเวียน (force circulation) ซึ่งมี ค่าสัมประสิทธิ์การการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด (U) ที่สูงกว่า และใช้พื้นที่ผิวลดลงด้วย

2.3.5 ความไวต่ออุณหภูมิ (temperature sensitivity)

เพื่อลดการเสื่อมเสียอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อนระหว่างการระเหย อุณหภูมิจุดเดือดของอาหารควรจะมีค่าต่ำและใช้เวลาอยู่ในเครื่อง (residence time) ในช่วงให้ความร้อนสั้น อุณหภูมิจุดเดือดจะลดต่ำลงได้โดยการลดความดันของเครื่องระเหย ความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำต่ำลง

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าการใช้อุณหภูมิที่กำหนดไว้ว่าเป็นค่าปลอดภัยสูงสุดในการทำงานสามารถใช้ได้ถ้าเวลาที่อยู่ภายในเครื่องซึ่งมีอุณหภูมิสูงนี้สั้นมาก ดังนั้นเครื่องระเหย ที่เรียกว่า "thin – film evaporators" จึงนิยมใช้ในการทำให้อาหารที่ทนความร้อนสูงไม่ได้เข้มข้นมากขึ้น ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2.6 การสูญเสียกลิ่น (aroma loss)

องค์ประกอบของกลิ่นรส (aroma and flavor) ในอาหารเหลวหลายชนิด เช่นน้ำผลไม้ นั้นสามารถระเหยเป็นไอ (volatile) ได้มากกว่าน้ำเมื่อของเหลวนั้นถูกทำให้เข้มข้นขึ้น องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกจำกัดออกไปพร้อมกับไอน้ำที่ได้จากการระเหยทำให้คุณภาพของอาหารเข้มข้นนั้นเสื่อมเสีย องค์ประกอบของสารระเหยง่ายนี้สามารถเก็บกัก (recover) จากไอที่ไว้เป็นหัวเชื้อ (essence) โดยการกลั่นลำดับส่วนแล้วผสมกลับเข้าไปในอาหารเหลวเข้มข้นภายหลัง

2.3 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลเมื่อจุดเดือดสูงขึ้น (boiling point elevation)

จุดเดือดของอาหารเหลวที่สูงขึ้น หมายความว่าเป็นจุดเดือดที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า ของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันหนึ่ง เนื่องจากปริมาณของเข็งที่มีอยู่ในอาหารเหลว

วิธีประเมินจุดเดือดของอาหารเหลวที่สูงขึ้นหาได้จากการคำนวณโดยใช้กฎของดูริงค์ (Duhring's rule) ดังนี้

2.3.1 วิธีการคำนวณ (calculation method)

สมการที่แสดงปริมาณการเพิ่มขึ้นของจุดเดือด ได้จากการพิจารณาสมดุล ของสถานะและศักยภาพทางเคมี (chemical potential) ของ 2 สถานะที่อยู่ในสมดุล วิธีการนี้ก็เช่นเดียวกันกับการหาจุดเยือกแข็งที่ลดต่ำลงในรูปของโมลาลิตี้ (molality)ในกรณีของจุดเดือดที่สูงขึ้นจะได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_v / R_g \cdot \left[\frac{1}{T_{A0}} - \frac{1}{T_A}\right] = -\ln X_A \qquad (2.1)$$

เมื่อ λ_v = ความร้อนแฝงของการระเหยต่อหน่วยโมล

T_{AO} = จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์

X_A = สัดส่วนโมลของน้ำในสารละลาย

T_A = จุดเดือดของสารละลาย

Rg = ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 J/Mole.K

เมื่อสารละลายเจือจาง จุดเดือดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ผลคูณของ T_{AO} กับ T_A ใกล้เคียงกับ T_{AO}^2 เมื่อผลต่างของ (T_A-T_{AO}) น้อยมาก โดยกำหนดให้ $T_B = T_A - T_{AO}$ และการกระจายเทอมของล็อกในรูปของอนุกรมกำลัง โดยใช้เพียงเทอมแรกจะได้

$$\Delta T_B = \frac{R_g \cdot (T_{A0})^2}{\lambda_v} \cdot X_B \qquad (2.2)$$

เมื่อ X_B = สัดส่วนโมล ของตัวถูกละลายที่ทำให้จุดเดือดสูงขึ้น และเมื่อดัดแปลงสมการโดยใช้โมลาลิตี้จะได้สมการต่อไปนี้

$$\Delta T_B = \frac{R_g \cdot (T_{A0})^2 \cdot W_A}{L_v \cdot 1000} \cdot m \qquad (2.3)$$

เมื่อ W_A = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย A (น้ำ)

L_v = ความร้อนแฝงของการระเหยต่อหน่วยมวลน้ำ

สมการที่ (2.3) จะใช้ได้เมื่อสารละลายเจือจาง หรือค่า X_B น้อยมากอย่างไรก็ตาม เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มสูงมากเนื่องจากการระเหย การหาจุดเดือดที่สูงขึ้นในสมการ (2.3) อาจคลาดเคลื่อนไปมาก ในสภาวะเช่นนี้ควรจะใช้สมการ (2.1) จึงจะเหมาะสมกว่า

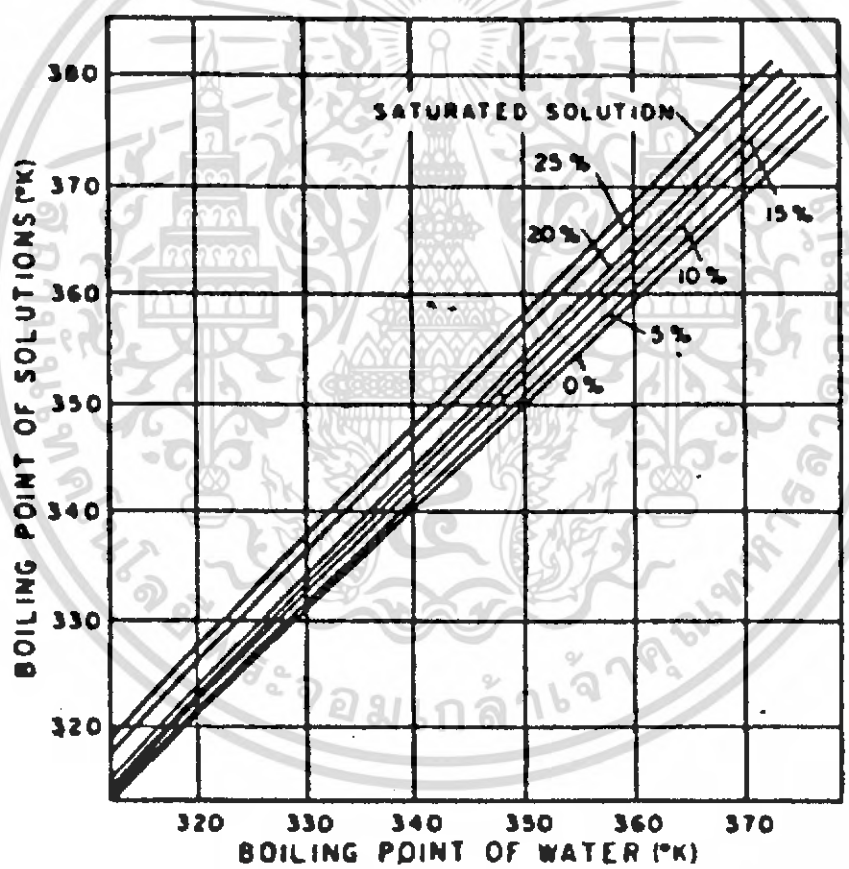
การใช้สมการที่กล่าวมาแล้วนี้ จำเป็นต้องทราบข้อมูลขององค์ประกอบเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้จุดเดือดเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมักจะไม่ค่อยสมบูรณ์หรือพร้อมที่จะนำไปใช้โดยทั่วไป การคำนวณมักจะประมาณจากองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในความเข้มข้นสูงกว่ารวมทั้งค่าน้ำหนักโมเลกุลและสัดส่วนโมลขององค์ประกอบเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การใช้กฎของดูริงค์ (duhring's rule)

วิธีที่สองมักนิยมใช้กันมากในการประมาณจุดเดือดที่สูงขึ้น ซึ่งกฎนี้กล่าวว่าอุณหภูมิของของเหลวหนึ่ง ณ ความดันไอที่กำหนดให้ค่าหนึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิของของเหลวอ้างอิงที่ความดันไอเดียวกัน นั่นคือจุดเดือดของสารละลายและจุดเดือดของน้ำมีความสัมพันธ์ เป็นเส้นตรงที่ความดันเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวมิได้ครอบคลุมช่วงของอุณหภูมิกว้างนัก ภาพที่ 2.1 แสดงระบบของเกลือโซเดียมคลอไรด์ - น้ำ จะเห็นว่าเมื่อสารละลายเข้มข้นขึ้น จุดเดือดที่สูงขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม การใช้แผนภาพนี้ก็จำเป็นต้องการทราบข้อมูลเฉพาะขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วย

การเพิ่มขึ้นของจุดเดือดเนื่องจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาเนื่องจากทำให้มีผลความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำและผลิตภัณฑ์ลดลง



รูปที่ 2.1 เส้นดูริงค์แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของปริมาณตัวถูกละลายต่อจุดเดือดที่สูงขึ้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การถ่ายเทความร้อนระหว่างการระเหย (heat transfer during evaporation)

การระเหยน้ำทำให้อาหารเข้มข้นขึ้น นั้นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมี ปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งส่งผ่านไปยังผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่เพียงพอ สมการทั่วไปของการถ่ายเทความร้อนจากตัวให้ความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์คือ

$$q = U A (T_s - T_p)$$

เมื่อ q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W , kJ/S)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ($W / m^2 .K$)

A = พื้นที่ผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน (m^2)

T_S = อุณหภูมิของไอน้ำ (องศาเซลเซียส)

T_p = อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (องศาเซลเซียส)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{UA_m} = \frac{1}{h_s A_s} + \frac{x}{kA_m} + \frac{1}{h_p A_p} \qquad (2.4)$$

เมื่อ x = ความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นผิวของการถ่ายเทความร้อน (m)

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ (W/m.K)

A_m = พื้นที่เฉลี่ยของด้านไอน้ำและผลิตภัณฑ์ของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

h_s h_p = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านไอน้ำและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ ($W/m^2.K$)

A_s A_p = พื้นที่ผิวของการส่งผ่านความร้อนด้านไอน้ำและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ (m^2)

ค่า A_m นี้เป็นค่าเฉลี่ยล็อก (logarithmic mean) ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังสมการที่ (2.4) แสดงให้เห็นว่ามี 3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการหาความต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างการระเหย ทั้ง 3 เทอม ล้วนแสดงความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานด้านผิวของตัวให้ความร้อนของฟิล์มที่ความร้อนถ่ายเทผ่านความด้านheat-medium ความต้านทานอันเนื่องมาจากการการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำ และความต้านทานในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากฟิล์มของพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนบนผลิตภัณฑ์

2.4.1 ตัวให้ความร้อน (heating medium)

ในเครื่องระเหยส่วนใหญ่ ตัวให้ความร้อนมักจะเป็นไอน้ำหรือไอที่สามารถกลั่นตัวได้ ซึ่งความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวให้ความร้อนชนิดนี้มักเกิดจากฟิล์มของหยดน้ำ(condensation –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

film) บนผิวถ่ายเทความร้อนด้านตัวให้ความร้อน สมการที่ใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับฟิล์มดังกล่าวนี้หาได้จากสมการต่างๆ ซึ่งมิได้แสดงไว้ ณ ที่นี้

2.4.2 ผิวที่ให้ความร้อน (heating surface)

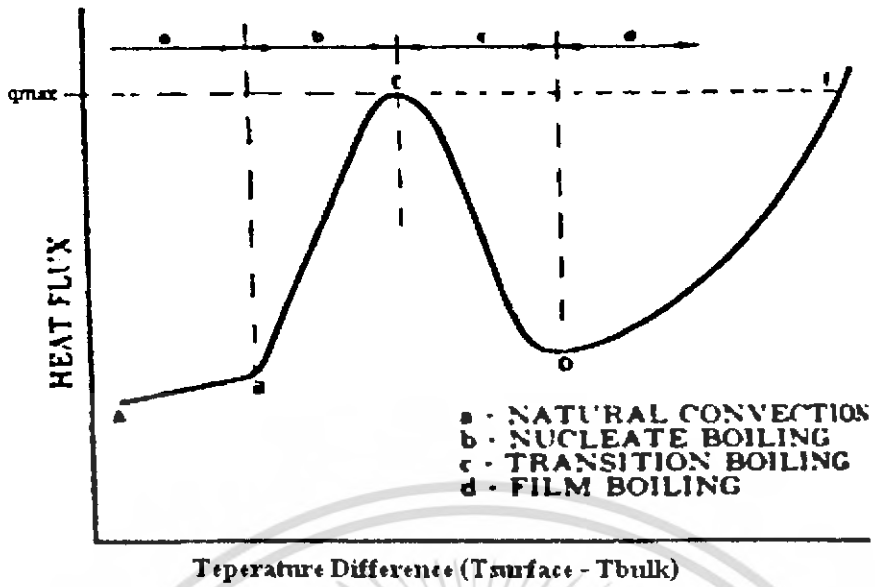
ส่วนที่สองของความต้านทานทั้งหมดต่อการถ่ายเทความร้อนของสมการที่ (2.4) ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดจากวัสดุที่เป็นผิวให้ความร้อน ผิวที่ให้ความร้อนมักสร้างจากโลหะปลอดสนิทที่ทราบคุณสมบัติและความหนา ดังนั้นเราจึงคำนวณหาความต้านทานได้เมื่อทราบความหนา (x) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)

2.4.3 ผลิตภัณฑ์ (product)

การถ่ายเทความร้อนจากผิวที่ร้อนไปยังของเหลวที่ยังกำลังเดือด จะเป็นลักษณะการพาความร้อน แต่ปริมาณความร้อน (heat flux) จะแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและของเหลว เช่นในภาพที่ 2.2 เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยมาก (น้อยกว่า 5 องศาเซลเซียส) การถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้จะเรียกว่า พูล บอยลิ่ง (pool boiling) โดยความร้อนจะส่งผ่านของเหลวไปยังบริเวณผิวหน้าหรือ (interface) ของ ของเหลว – ไอ ที่มีการระเหยเกิดขึ้นด้วยวิธีพาความร้อนเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและของเหลวเพิ่มขึ้น การกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นใกล้กับผิว ทำให้เกิดฟอง ซึ่งควบแน่นภายในของเหลวก่อนที่ถึงผิวหน้าของของเหลว- ไอ ฟองของไอน้ำที่เกิดขึ้นมักจะอยู่บนผิวบริเวณนี้จะเรียกว่า นิวคลีเอชั่น บอยลิ่ง การดำลักษณะนี้ดำเนินต่อไปจนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิใกล้กับ 55 องศาเซลเซียส ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงขึ้นฟองไอที่เกิดขึ้นที่ผิวความร้อนจะส่งไปยังผิวหน้าของของเหลวไอ ดังในรูปที่ 2.2 ค่า ฮีทฟลักซ์ จากผิวความร้อนไปยังของเหลวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดที่ใกล้กับความแตกต่างของอุณหภูมิเป็น 55 องศาเซลเซียส นั่นคือ การเกิดฟองไอใกล้ผิวในช่วง นิวคลีเอชั่น บอยลิ่ง จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวความร้อนไปยังของเหลวเดือด

เมื่อความแตกต่างอุณหภูมิสูง มากกว่า 55 องศาเซลเซียส ฟิล์มของฟองไอจะเกิดขึ้นและสะสมอยู่บนผิวการถ่ายเทความร้อน ทำให้ ฮีทฟลักซ์ มีค่าลดลง แม้ว่าฟิล์มจะไม่เสถียรที่ความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงกว่าเพียงเล็กน้อย แต่ฟิล์มนี้ก็จะเสถียรที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ เป็น 55 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าฮีทฟลักซ์ลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะลดลงด้วย เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ฟิล์มของไอจะเสถียรมากจนเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี มีผลทำให้ฮีทฟลักซ์สูงขึ้นและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็สูงขึ้นด้วย

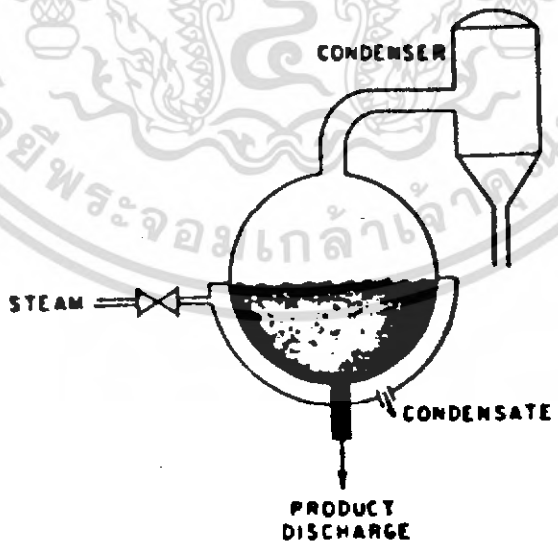
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟการเดือดที่แสดงบริเวณต่าง ๆ ของการต้มใกล้บริเวณผิวที่ร้อน

2.5. ชนิดของเครื่องระเหย (type of evaporator)

2.5.1 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นครั้ง (batch - type pan evaporator) เครื่องระเหยที่เป็นแบบเก่าที่สุดและง่ายที่สุด ดังแสดงในรูป ที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นกะ

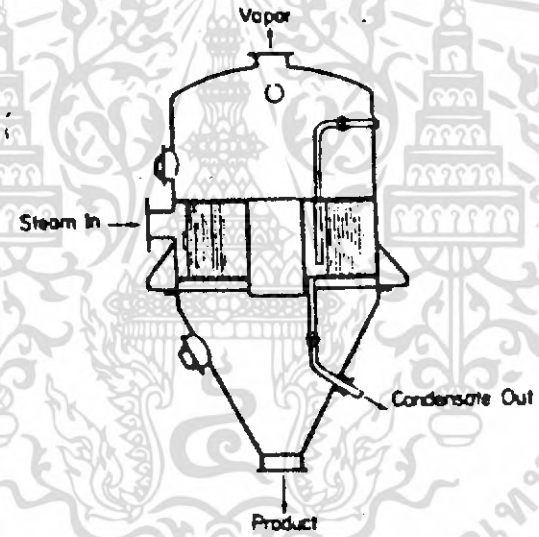
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์จะร้อนในหม้อทรงกลม steam - jacketed หม้อต้มนี้อาจจะทำงานในสภาพความดันบรรยากาศที่สุญญากาศ สภาวะสุญญากาศนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ เดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดที่ที่ความดันบรรยากาศ ทำให้ลดความเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากความร้อนที่ให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนความร้อน

เนื่องจากผิวของการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ในหม้อระเหยนี้มีค่าน้อย ดังนั้นเวลา (residence time) ที่ผลิตภัณฑ์จะต้องอยู่ในหม้อต้มเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการจึงใช้เวลานาน อาจใช้เวลาถึงหลายชั่วโมง

2.5.2 เครื่องระเหยแบบการหมุนเวียนตามธรรมชาติ (natural circulation evaporator)

เครื่องระเหยแบบนี้จะมีท่อสั้นในแนวดิ่งความยาว 1-2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 - 100 มิลลิเมตรจัดเรียงกันอยู่ภายในสตีมเชสท์ (steam chest) ทั้งท่อและสตีมเชสท์ รวมเรียกว่า คาลานเดรีย (calandria)



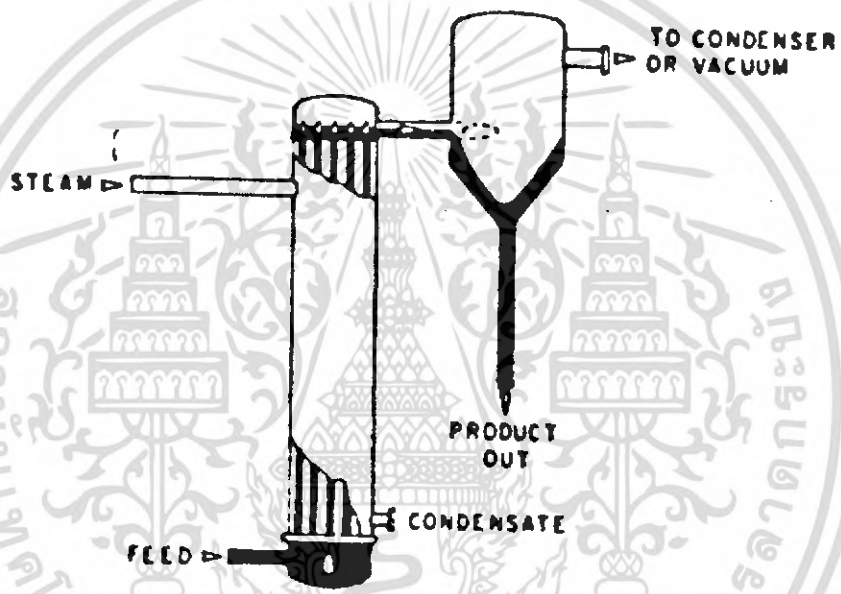
รูปที่ 2.4 เครื่องระเหยชนิดหมุนเวียนแบบธรรมชาติ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อน จะขึ้นสูงผ่านคาลานเดรีย ด้วยการหมุนเวียนแบบธรรมชาติ ขณะที่ไอน้ำจะควบแน่นภายนอกท่อ การระเหยจะเกิดขึ้นภายในท่อและผลิตภัณฑ์ จะเข้มข้นขึ้น ของเหลวเข้มข้นจะตกกลับไปสู่ส่วนล่างของภาชนะโดยผ่านส่วนวงแหวนตรงกลาง (central annular) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่อาหารเหลวอาจถูกอุ่นโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้น (rising film evaporator)

เครื่องทำระเหยแบบนี้จะใช้กับอาหารที่มีความหนืดต่ำ เพื่อให้เดือดภายในท่อแนวดิ่งยาว 10 - 15 เมตรท่อจะถูกทำให้ร้อนจากภายนอกด้วยไอน้ำ ของเหลวจะขึ้นสูงภายในท่อ โดยไอที่เกิดขึ้นใกล้ด้านล่างของท่อให้ความร้อน การเคลื่อนที่ขึ้นของไอสู่ด้านบนทำให้ฟิล์มของเหลวเคลื่อนสู่ด้านบนอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผลิตภัณฑ์และสารให้ความร้อนอย่างน้อยประมาณ 14 องศาเซลเซียส จึงจะพอเพียงต่อการเกิดฟิล์มดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.5

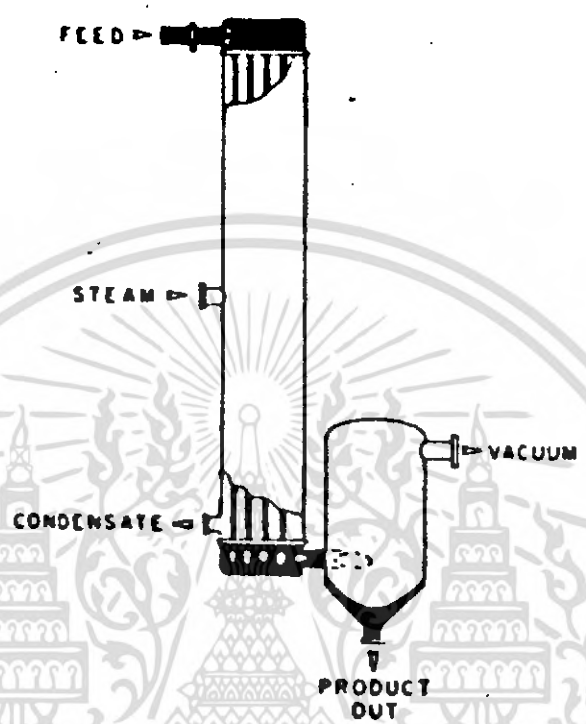


รูปที่ 2.5 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง (falling film evaporator)

ตรงกันข้ามกับเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นจะมีฟิล์มบางๆ เคลื่อนที่ลงภายใต้แรงดึงดูดของโลกในท่อแนวดิ่ง ดังรูปที่ 2.6



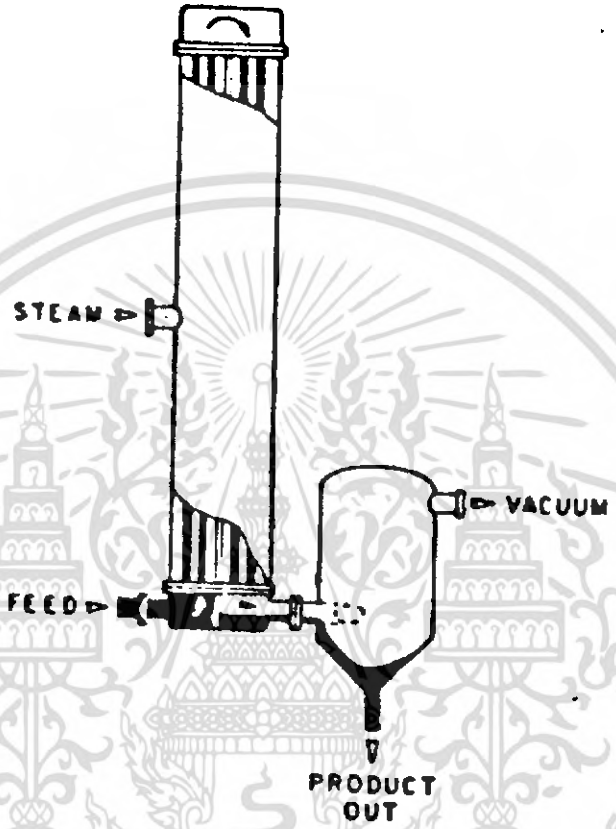
รูปที่ 2.6 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง

อย่างไรก็ตาม การออกแบบเครื่องระเหยนี้ค่อนข้างจะซับซ้อน เนื่องจากการกระจายตัว (distribution) ของของเหลวในลักษณะที่เป็นฟิล์มเคลื่อนที่ลงอย่างสม่ำเสมอในท่อนั้น เกิดค่อนข้างจะยากกว่า ระบบการไหลขึ้น ของเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวกระจาย (distributors) หรือหัวพ่น (spray nozzles) ช่วย เครื่องระเหยแบบนี้สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง และใช้กับอาหารที่ไม่สามารถทนกับความร้อนสูงได้ (highly heat sensivitive) เช่น น้ำผลไม้ สำหรับเวลา (residence time) จะใช้เพียง 20-30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง (rising / falling film evaporator)

ในเครื่องระเหยแบบนี้ ผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เข้มข้นโดย การหมุนเวียนผ่านส่วนที่เป็นฟิล์มไหลขึ้น ตามด้วยส่วนที่เป็นฟิล์มตกลงมาในเครื่องระเหย ดังรูปที่ 2.7

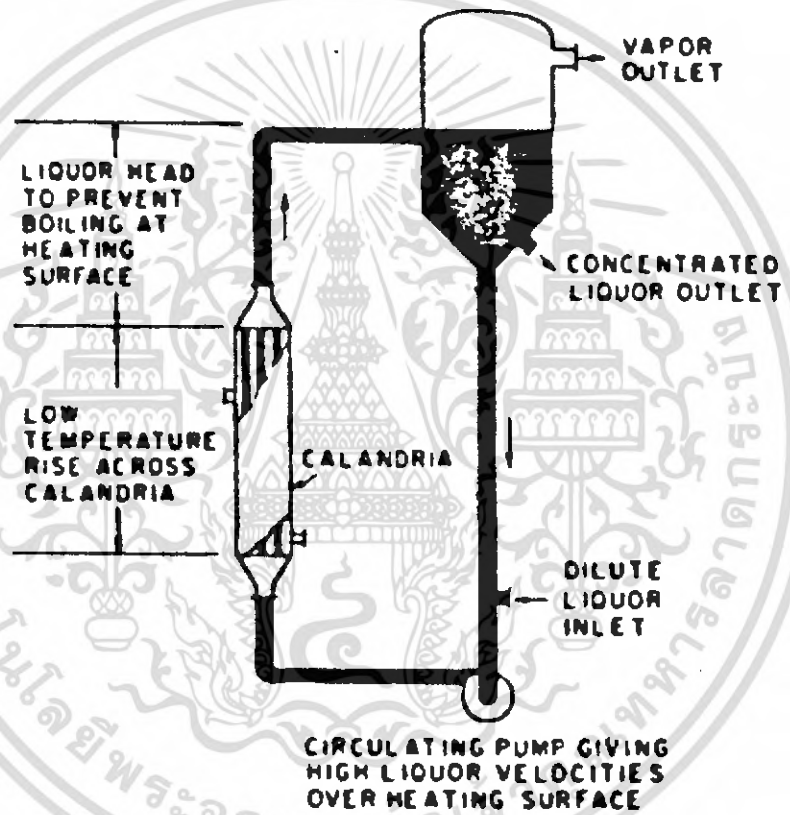


รูปที่ 2.7 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 เครื่องระเหยชนิดบังคับให้หมุนเวียน (force circulation evaporator)

เครื่องระเหยนี้จะประกอบด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่มีการสัมผัส (noncontact) ซึ่งผลิตภัณฑ์จะหมุนเวียนอยู่ภายในด้วยอัตราเร็วสูง นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง ดังรูปที่ 2.8 ความดันไฮโดรสเตติกเฮด ที่อยู่ส่วนบนของท่อป้องกันมิให้ของเหลวเดือด ซึ่งจะจำกัดความระเหยให้ความร้อนเกิดในท่อเท่านั้น ส่วนภายในเครื่องแยกความดันสมบูรณ์จะต่ำกว่าความดันในท่อ (tube bundle) เล็กน้อย ดังนั้นของเหลวที่เข้าเครื่องแยกจะเปลี่ยนเป็นไอทันที ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวให้ความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็น 3-5 องศาเซลเซียส

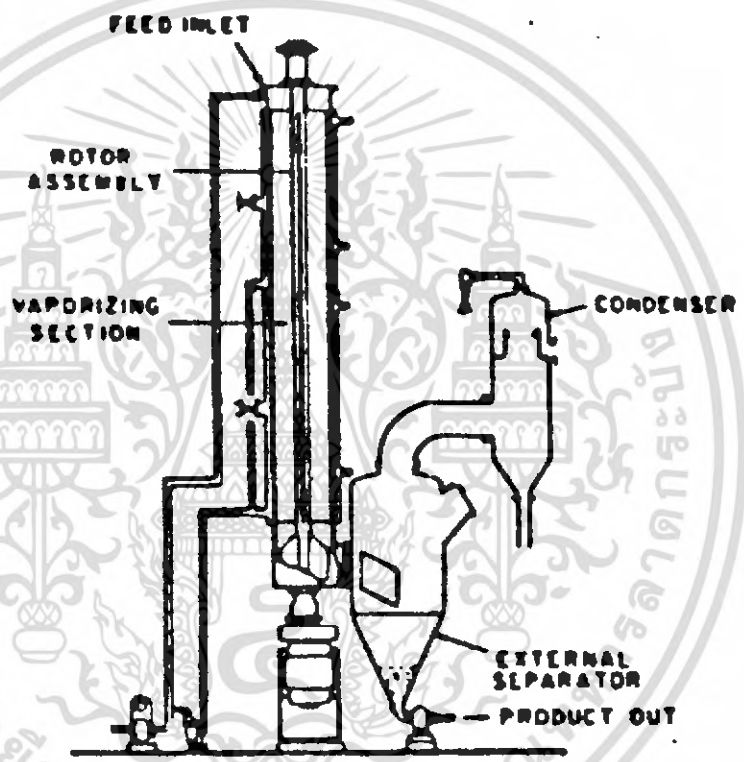


รูปที่ 2.8 เครื่องระเหยแบบบังคับการหมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบางๆที่มีการกวน (agitated thin film evaporator)

เครื่องระเหยชนิดนี้ เหมาะสำหรับอาหารเหลวที่มีความหนืดสูง โดยที่อาหารเหลว ที่เข้าสู่เครื่องจะถูกเกลี่ยให้อยู่ด้านในของผิวให้ความร้อนทรงกระบอก โดยการใช้มีดปาย (wiper blades) เนื่องจากมีการกวนในอัตราสูง ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงมาก รูปร่างของเครื่องที่เป็นทรงกระบอกจะทำให้พื้นที่ผิวถ่ายเท ความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของผลิตภัณฑ์ต่ำ ไอน้ำความร้อนสูงจะใช้เป็นตัวให้ความร้อน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มที่มีการกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.6 การตรวจเอกสาร

ฉันทกร(2545)[6] เขียนไว้ว่า อุตสาหกรรมกะทิเข้มข้น กะทิเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำน้ำกะทิมาระเหยเอาน้ำออกบางส่วน และนำมาบรรจุในภาชนะปราศจากอากาศ ทำให้เก็บรักษาไว้ได้นานและสะดวกต่อการใช้ เมื่อนำกะทิดังกล่าวมาผสมน้ำก็จะคืนรูปเป็นกะทิสดธรรมดานั่นเอง อุตสาหกรรมกะทิเข้มข้นนับเป็นแนวทางหนึ่ง ที่จะระบายมะพร้าวผลในช่วงที่มะพร้าวออกมาก ซึ่งเวลานั้น ราคามะพร้าวจะตกต่ำปัจจุบันคนไทยก็นิยมบริโภคกะทิเข้มข้นที่บรรจุในรูปของ ถุง-พลาสติก หรือ กระป๋อง หรือ กล่องกระดาษ UHT มากยิ่งขึ้น

น้ำกะทิมีสารอาหารที่สำคัญเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ต่างกันกล่าวคือ หัวกะทิมีปริมาณไขมันมากประมาณ 60-75%โปรตีนประมาณ 1.2-1.5% และมีความชื้นเท่ากับ 4-7% หางกะทิมีไขมันประมาณ 3-7%โปรตีนเท่ากับ 2-4% และความชื้นสูงถึง 58-64% ในขณะที่น้ำมะพร้าวมีไขมันประมาณ 3.56% โปรตีน 0.23%

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิ [6]

คุณสมบัติทางกายภาพ	ช่วง
ความถ่วงจำเพาะ	1.0029 - 1.0080
แรงตึงผิว(dynes/cm^2)	97.76 - 125.43
ความหนืด(poise)	0.0161 - 0.0202
ดัชนีหักเหแสง	1.3412 - 1.3446
PH	5.93 - 6.30

จิตติวัฒน์และคณะ(2547)[8] รายงานไว้ว่า ความเข้มข้นของน้ำกะทิตามท้องตลาด มีค่า n = 0.163 และค่า k = 32.884 และค่าความหนืด = 1.522 Nsm^{-2}

62655

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีของระบบสุญญากาศ

(เนื้อหาทั้งหมดในบทนี้อ้างอิงมาจาก[1])

3.1 ความดันไอ (vapour pressure)

ปกติโมเลกุลของเหลวสามารถหนีหลุดออกจากผิวของของเหลวไปเป็นก๊าซได้ ถ้าความดันเหนือผิวเท่าความดันบรรยากาศปกติ โมเลกุลที่หนีจากผิวได้จะมีน้อย แต่ที่ความดันสุญญากาศโมเลกุลจะหนีหลุดออกไปได้ง่าย โมเลกุลที่หลุดออกจากผิวของเหลวอาจชนกับผิวของภาชนะหรือกลับคืนเป็นของเหลวได้ใหม่ ความดันในขณะที่จำนวนโมเลกุลหนีออกเท่ากับจำนวนที่กลับคืนเรียกว่า **ความดันไออิ่มตัว** (saturated vapour pressure) ของสารนั้น

สารทุกชนิดมีความดันไอ ถ้าสารใดมีความดันไอสูงที่อุณหภูมิปกติ สารนั้นไม่เหมาะสำหรับใช้งานในสุญญากาศ

ตัวอย่าง **ความดันไอของปรอท** ที่อุณหภูมิต่างๆ หน่วยเป็น (torr)

อุณหภูมิ (°C)	30	20	10	0	-20
ความดันไอ (torr)	2.78×10^{-3}	1.2×10^{-3}	4.9×10^{-4}	1.85×10^{-4}	1.8×10^{-5}

ความดันไอมีความสำคัญในงานสุญญากาศคือ

(1) ของเหลวใดๆ ที่ยังหลงเหลืออยู่ภายในภาชนะสุญญากาศจะเป็นแหล่งกำเนิดของไอตลอดเวลา ความดันของสุญญากาศที่สร้างได้จะเป็นเพียงแต่ความดันไออิ่มตัวเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องขจัดของเหลวภายในภาชนะให้หมด

(2) การลดอุณหภูมิใด ๆ ในภาชนะ จะเป็นการลดความดันไออิ่มตัว จึงใช้หลักนี้ในการออกแบบที่ดักไอใช้ความเย็น (cold trap) ปั๊มใช้ความเย็น (cryogenic pump) หรือฉากกั้นใช้ความเย็น (refrigerated baffle)

(3) การทำงานของปั๊มแบบโรตารีจะมีช่วงอัดก๊าซที่ความดันสูง ไอของเหลวที่อยู่ภายในปั๊มในสภาพที่ไม่อิ่มตัวจะเกิดการควบแน่นภายใต้ความดันสูงและละลายในน้ำมันปั๊มซึ่งจะระเหยเป็นไอได้อีกเมื่อปั๊มอยู่จังหวะความดันต่ำทำให้การลดความดันของก๊าซในภาชนะสุญญากาศได้ผลลดลง วิธีแก้ไขปัญหานี้จะกล่าวถึงในตอน3.3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ความเร็วปั๊ม (Pumping-speed , S_p) และอัตราขับ (Throughput) หรือ Mass flow,Q)

ความเร็วปั๊ม ไม่ว่าจะเป็นปั๊มแบบใด หาได้จากอัตราของปริมาตรก๊าซที่ปั๊มได้ต่อเวลา

$$S_p = \frac{dV}{dt}$$

เมื่อ V เป็นปริมาตรของก๊าซ

หน่วยความเร็วของปั๊มมักใช้ ($l\text{-}s^{-1}$)

ความเร็วปั๊มจะไม่คงที่ แต่เปลี่ยนไปตามความดัน เรื่องนี้จะกล่าวถึงอีกครั้งในตอนที่3.3.3

ส่วนอัตราขับเป็นผลคูณของความเร็วปั๊มกับความดันที่บริเวณช่วงเข้าปั๊ม (inlet pressure,P_{in})

$$Q = P_{in} \frac{dV}{dt}$$

$$= P_{in} S_p$$

3.3 ปั๊มกลโรตารี (Mechanical rotary pump)

ปั๊มกลเป็นปั๊มที่ใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศไม่ต่ำกว่า ~ 10^{-3} torr หลักการอย่างง่ายๆ คือ ก๊าซหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวของลูกสูบ ทำให้ก๊าซในห้องสูบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ก๊าซจะถูกขับออกมา

3.3.1 ปั๊มกลโรตารีแบบเวน (Rotary vane pump)

ปั๊มประกอบด้วยโลหะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง เรียกว่า **สเตเตอร์** (stator A) ภายในทรงกระบอกกลวง มีแท่งโลหะรูปทรงกระบอกหมุนได้โดยมอเตอร์ไฟฟ้า เรียกว่า **โรเตอร์** (rotor, B) แกนของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้มันแตะผิวของสเตเตอร์พอดี มีช่องห่างเพียง 0.001นิ้ว บริเวณที่แตะผิวด้านบนนี้เรียกว่า top seal rotor จะถูกเจาะเป็นร่องเพื่อติดเวน (van, EC) 2 อัน เวน 2 อันนี้จะถูกดันด้วยสปริงให้แตะกับผิวสเตเตอร์ตลอดเวลา

การทำงานของปั๊มจะเข้าใจได้โดยง่าย (รูปที่3.1) การทำงานอาจแบ่งเป็น จังหวะ a, b, c คือ

(a) โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา ทำให้ก๊าซถูกดูดออกจากภาชนะสุญญากาศเข้าตัวปั๊มทางช่อง D

(b) เมื่อโรเตอร์หมุนไปเกือบ 180° ก๊าซที่ถูกดูดเข้าจะถูกอัด แล้วส่งออกทางลิ้น E (discharge value) ปกติลิ้นนี้จะปิดและมีน้ำมันปั๊มอยู่โดยรอบ ก๊าซที่ถูกขับออกจากปั๊มนี้จะต้องมีความดันเหนือความดันบรรยากาศปกติเล็กน้อย

(c) ก๊าซถูกอัดส่งออกจนเกือบหมด ก๊าซจากภาชนะสุญญากาศจะถูกเวนดูดเข้าไปยังช่องว่างในสเตเตอร์อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์จะหมุนเร็วหลายร้อยหลายพันรอบต่อนาที จึงขับก๊าซออกจากภาชนะสุญญากาศได้เร็ว น้ำมันปั๊มบางส่วนสามารถเล็ดลอดผ่านเข้าไปในสเตเตอร์ได้เล็กน้อย เพื่อใช้เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างเวนกับผิวสเตเตอร์ อัตราส่วนระหว่างความดันก๊าซที่ถูกขับออกกับก๊าซที่ถูกดูดเข้าเรียกว่า อัตราส่วนการอัดปั๊ม (pump compression ratio) ดังนั้นในการสร้างความดันราว 10^{-2} torr ปั๊มจะต้องมีอัตราส่วนการอัดถึง 10^{5} เท่า

ปั๊มกลโรตารีแบบแวนนี้ ติดประดิษฐ์ขึ้นโดย Gaede ในปี ค.ศ. 1905 และเป็นแบบที่นิยมใช้กันในห้องปฏิบัติการวิจัย

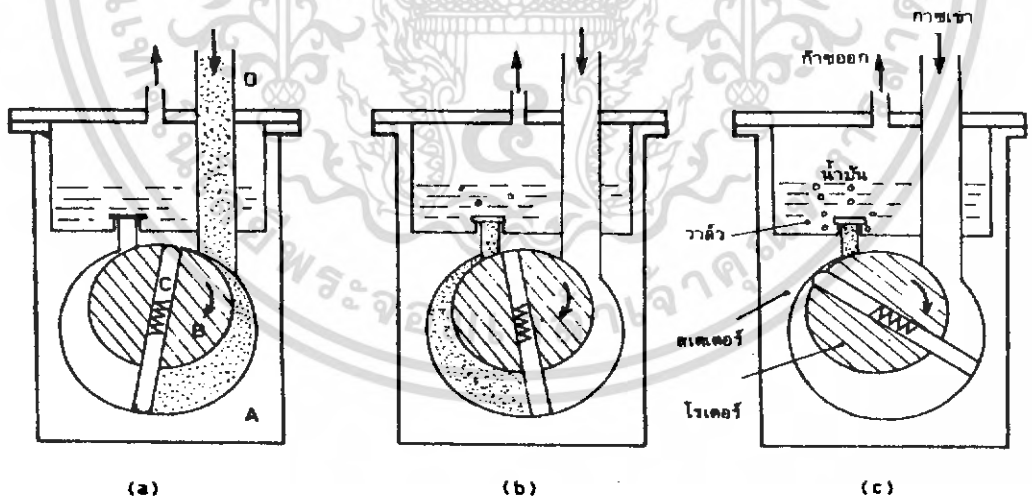
ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

(1) ผิวของสเตเตอร์และโรเตอร์จะต้องสะอาด มันเรียบและที่ซีลด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย

(2) การซีลระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวซีลหล่อลื่น และระบายความร้อนไปในตัว

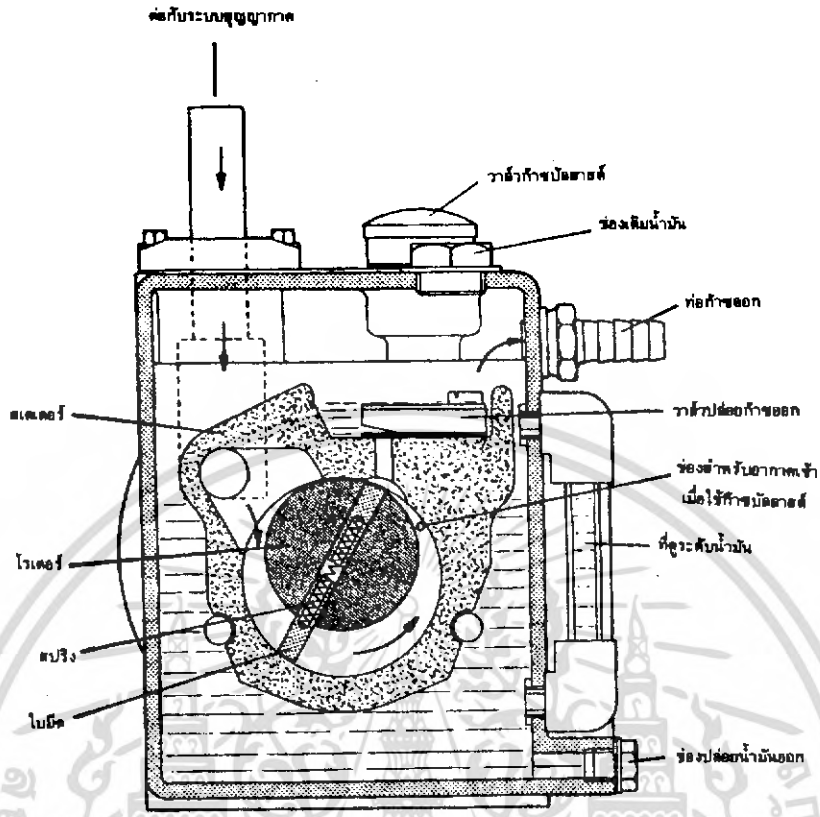
(3) ก๊าซที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอของของเหลวนี้อาจละลายในน้ำมันที่ความดันสูงจึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการปั๊มลดลง วิธีแก้ให้ใช้ ก๊าซบัลลัสต์ (gas ballast)

(4) การรั่วของก๊าซที่ถูกอัดที่ซีลตอนบน และซีลระหว่างแวนกับสเตเตอร์



รูปที่ 3.1 ปั๊มกลโรตารีแบบเวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ปั๊มกลโรตารีแบบแวน

3.3.2 ก๊าซบัลลาสต์(Gas ballast)

ก๊าซบัลลาสต์หมายถึงวิธีการขจัดไอน้ำหรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊ม โดยการเพิ่มความดันก๊าซรวมให้สูงกว่าความดันย่อยไอของน้ำหรือไอของของเหลว

จะพบว่า ถ้าใช้ปั๊มกลโรตารีดึงก๊าซบริสุทธิ์ออกจากภาชนะสุญญากาศจะได้ความดันตามที่กำหนด แต่ถ้าใช้ปั๊มก๊าซที่มีไอน้ำหรือไอของของเหลวปะปนอยู่ ประสิทธิภาพในการปั๊มจะลดลงมาก สาเหตุมาจาก

(1) ไอของของเหลวปกติเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ แต่จะควบแน่นละลายเป็นของเหลวปะปนอยู่ในน้ำมันปั๊มช่วงอัด เมื่อโรเตอร์หมุนน้ำมันไปสู่ด้านที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศ ของเหลวนี้จะระเหยออกจากน้ำมันได้เพราะความดันด้านที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศต่ำกว่าความดันไอของของเหลว ผลก็คือจะปั๊มก๊าซจากภาชนะสุญญากาศได้ความดันที่ไม่ต่ำกว่าความดันไอของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ไอของของเหลวบางชนิดอาจละลายได้ทันทีในน้ำมันปั๊ม โดยไม่ต้องควบแน่น แล้วไหลเวียนไปกับน้ำมันปั๊ม

ปัญหาการเจือปนไอของของเหลวในน้ำมันนี้ นอกจากจะทำให้ลดความดันในภาชนะสุญญากาศได้ยากแล้วไอของของเหลวยังทำให้คุณสมบัติที่ดีของน้ำมันปั๊มเปลี่ยนไป และไอของของเหลวบางชนิดยังมีอำนาจกัดกร่อนส่วนภายในของปั๊มด้วย

วิธีการของก๊าซบัลลาสต์ คือ เปิดวาล์วให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในส่วนสเตเตอร์ที่เป็นช่วงอัดของปั๊ม (ดูรูปที่3.2) อากาศจะผสมกับไอของของเหลวที่กำลังถูกอัดจะมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความดันย่อยของของเหลวจะลดลง (โดยกฎความดันย่อยของ ดาลตัน) เมื่อความดันย่อยลดลงไอของของเหลวจะไม่ควบแน่นในน้ำมัน แต่จะถูกขับออกไปพร้อมกับก๊าซและอากาศ

เนื่องจากการปล่อยอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในปั๊ม อัตราส่วนการอัดของก๊าซผสมจะลดลงเหลือ 10 : 1 ในช่วงนี้มอเตอร์จะทำงานหนักและร้อนขึ้น ความดันในภาชนะสุญญากาศจะสูงขึ้นเล็กน้อย โดยการเปิดวาล์วก๊าซบัลลาสต์เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ ถึงหลายชั่วโมง จะสามารถไล่ไอของของเหลวออกจากน้ำมันได้ เมื่อปิดวาล์วก๊าซบัลลาสต์จะเห็นว่าปั๊มทำงานดีขึ้นและสามารถลดความดันในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำกว่าเดิม

ปั๊มที่มีก๊าซบัลลาสต์ที่ดีควรจะสามารถขจัดไอน้ำออกได้ขณะที่มีความดันในภาชนะสุญญากาศสูงถึง 20 torr เพราะในการปั๊มก๊าซออกจากภาชนะสุญญากาศที่กำลังดำเนินกรรมวิธีทางเคมีหรืออุตสาหกรรม จะมีไอน้ำออกมาเรื่อยๆ จึงต้องเดินเครื่องปั๊มโดยเปิดวาล์วก๊าซบัลลาสต์บ่อยครั้ง

3.3.3 ความเร็วปั๊ม (pump speed) หรือค่าขจัดของปั๊ม (pump displacement)

ความเร็วปั๊มคำนวณได้จากปริมาณของก๊าซที่โรเตอร์กวาดไป(รอบต่อนาที) นั่นคือ ปริมาตรของการขจัด (volumetric displacement) x ความเร็วรอบของปั๊ม (rpm of pumps) หน่วยที่ใช้อาจเป็น $l\text{-}s^{-1}$ หรือ $m^3\text{-}hr^{-1}$ ตัวอย่างเช่น ปั๊มกลโรตารีของบริษัท Edwards รุ่น EDM-6 มีความเร็วปั๊มสูงสุด 6 $m^3\text{-}hr^{-1}$

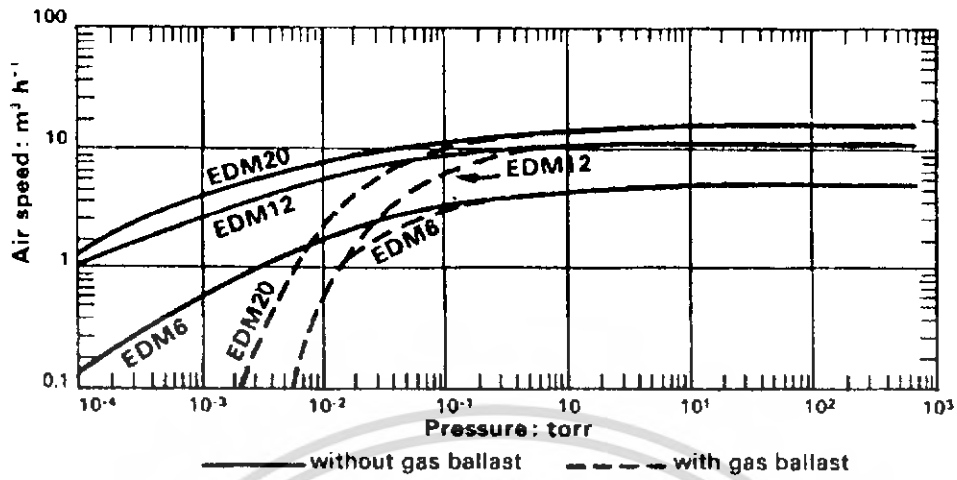
ความเร็วปั๊มขึ้นอยู่กับ

(1) ชนิดของก๊าซที่กำลังปั๊มออก ก๊าซที่มีโมเลกุลหนักจะทำให้ความเร็วปั๊มลดลง โดยทั่วไปมักจะใช้อากาศหรือไนโตรเจนเป็นก๊าซอ้างอิงในการบอกความเร็วปั๊ม

(2) ความเร็วปั๊มขึ้นอยู่กับความดันของภาชนะสุญญากาศ หรือความดันของก๊าซที่ช่องเข้าปั๊มกล ความเร็วปั๊มจะมีค่าคงที่ที่ความดันสูง แล้วลดลงเมื่อมีความดันลดต่ำลง ในคู่มือการใช้ปั๊มจึงมักแสดงกราฟของความเร็วปั๊มที่ความดันต่างๆ กัน รูปที่ 2.8 แสดงความเร็วปั๊มของปั๊มกลโรตารีของบริษัท Edwards รุ่น EDM ขนาดต่างๆ กัน จะเห็นว่าเมื่อใช้ก๊าซบัลลาสต์(เส้นประ) ความเร็วปั๊มจะลดลงที่ความดันต่ำ

(3) ความเร็วปั๊มขึ้นอยู่กับการทำงานของปั๊ม ขณะใช้ภาชนะบัลลาสต์ ดูรูปที่3.3 อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ความเร็วปั๊ม

3.3.4 ความดันต่ำสุด (Ultimate pressure)

ความดันต่ำสุด หมายถึง ความดันต่ำสุดที่บริเวณช่องก๊าซเข้าปั๊มที่ปั๊มสามารถทำได้ แต่ภายในภาชนะสุญญากาศอาจจะไม่สามารถทำให้มีความดันต่ำสุดได้ ทั้งนี้เพราะข้อต่อจากภาชนะไปยังปั๊มจะลดประสิทธิภาพของการปั๊มความดันต่ำสุดของปั๊มจะแปรไปตามขนาดของปั๊มแบบจังหวะเดียวหรือสองจังหวะ น้ำมันปั๊มที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ปั๊มรุ่น EDM-12 ของบริษัท Edwards จะให้ความดันต่ำสุด 10^{-4} torr เมื่อไม่ใช้ก๊าซบัลลาสต์และ 10^{-2} torr เมื่อใช้ก๊าซบัลลาสต์

3.3.5 กราฟแสดงการปั๊มลง (Pump down curve)

ปั๊มกลโรตารีจะใช้เวลาช่วงหนึ่งในการปั๊มภาชนะให้มีความดันลดลง ซึ่งแสดงได้ในกราฟรูปที่ 3.4 สำหรับปั๊มจังหวะเดี่ยวและสองจังหวะ เวลาที่ใช้ในการปั๊มลงทั้งหมด (total pump down time,T) หาได้จาก

$$T = \frac{FxV}{S}$$

เมื่อ S = ความเร็วปั๊ม

V = ปริมาณของภาชนะสุญญากาศหรือระบบ

F = ค่าจำเพาะปั๊มลง (pump down factor) หาได้จากกราฟรูปที่ 3.4

ตัวอย่างการคำนวณ ถ้าภาชนะมีปริมาตร 60l ต้องการปั๊มให้เหลือความดัน 1 torr ภายในเวลา 3 นาที จะต้องใช้ปั๊มขนาดเท่าใด?

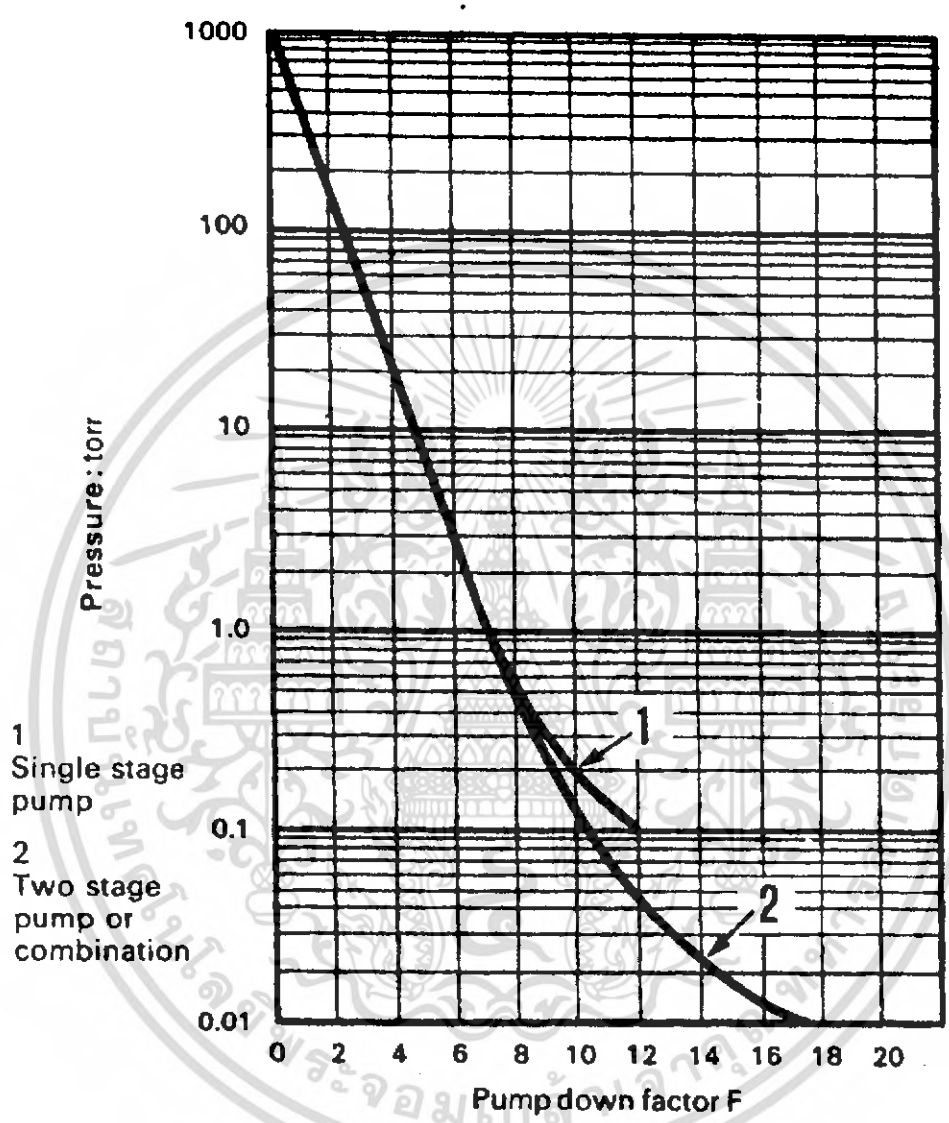
จาก $S = \frac{F \times V}{S}$

จากรูปที่ 3.4 จะได้ F = 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $S = 7 \times \frac{60}{3} \simeq 140$ l-min^{-1} หรือ 8.4 m^3-hr^{-1}

โดยการเปิดดูแคตตาล็อคของปั๊ม จะทราบรุ่นและแบบที่ต้องการ



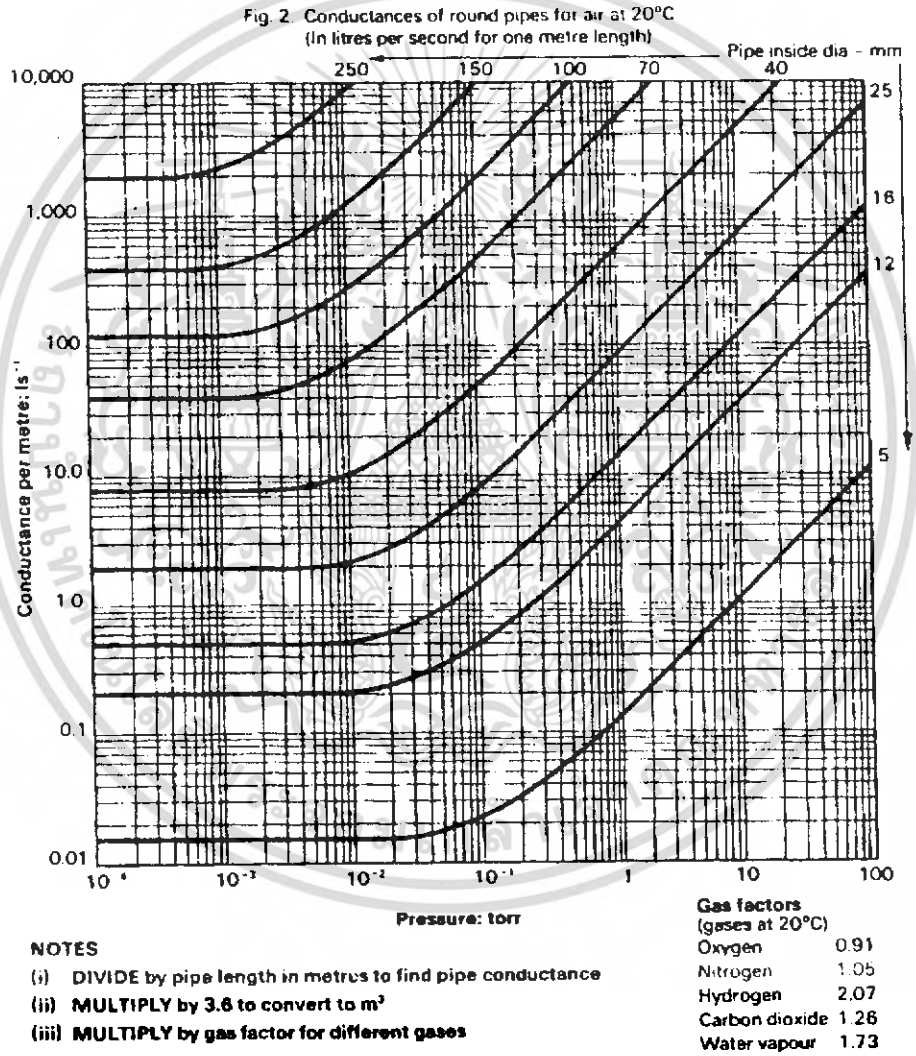
รูปที่ 3.4 รูปแสดงการปั๊มลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบระบบสุญญากาศร่วมกับการเลือกปั๊มกลโรตารี

3.4.1 ผลของท่อนำก๊าซต่อความเร็วปั๊มและเวลาที่ปั๊มลง

ท่อที่ใช้ต่อระบบสุญญากาศจะมีความต้านทานต่อการไหลของก๊าซ ทำให้มีผลความเร็วปั๊มและเวลาที่ปั๊มลงค่าความนำก๊าซสามารถคำนวณได้จากขนาดของท่อ รูปที่ 3.5 แสดงกราฟของความนำก๊าซ (conductance) ต่อหน่วยความยาวที่เส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่างกัน ค่าของความนำจะเปลี่ยนตามความดันจนเมื่อลดลงถึงค่าความดันต่ำ ความนำจะมีค่าคงที่



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความนำก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการหาค่าความนำที่ความดันใดๆ ให้อ่านค่าความนำต่อหน่วยความยาวจากตาราง แล้วคูณด้วยความยาวท่อเป็นเมตร

ถ้าต้องการหาค่าความนำที่ต่างไปจากอากาศ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ให้คูณค่าความนำที่อ่านจากกราฟด้วยค่าของก๊าซ

เมื่อใช้ท่อต่อกับปั๊มสุญญากาศ ความเร็วปั๊มจะเปลี่ยนไป หาได้จากสูตร

$$\frac{1}{So} = \frac{1}{Sp} + \frac{1}{C}$$

เมื่อ So = ความเร็วปั๊มทั้งหมด

Sp = ความเร็วของปั๊ม

C = ความนำของท่อ

ค่าความนำ C ของท่อนำก๊าซที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D cm และความยาว L cm เมื่อมีการไหลของก๊าซแบบโมเลกุล (molecular flow) มีค่าเท่ากับ $C = 12.1\ D^3 / L$

เนื่องจากการใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวต่างกันเวลาที่ปั๊มลงจะเปลี่ยนแปลงได้

เวลาที่ปั๊มลงอาจคำนวณได้โดยการใช้กราฟก๊าซที่ความดันใดๆ แล้วคำนวณหาค่าความเร็วปั๊มทั้งหมด

ตารางที่ 3.1 แสดงความยาวท่อนำก๊าซสูงสุดที่ยอมให้ได้ ถ้าหากต้องการให้เวลาที่ปั๊มลงเนื่องจากความต้านทานของท่อไม่เกิน 20%

ตารางที่ 3.1 ความยาวท่อนำก๊าซ

ค่าขจัดของปั๊ม ($m^3\ hr^{-1}$)	ขนาดท่อ (mm)	ความยาวท่อสูงสุด(m) เมื่อปั๊มลงถึง 1 torr	ความยาวท่อสูงสุด (m) เมื่อปั๊มลงถึง 0.1 torr
2	10	10	1.4
4	12	5	0.7
4	25	90	10.0
6	25	56	6.0
12	25	28	3.0
20	25	18	2.0
40	40	50	5.5
60	40	30	3.5
120	63	180	20
240	70	90	10
480	100	170	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเลือกขนาดท่อนำก๊าซที่ต่อกับปั๊มกลโรตารี

ท่อนำก๊าซที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างปั๊มกลโรตารีกับปั๊มไอฟุ้งกระจายจะต้องมีขนาดโตพอสมควร เพื่อมิให้ด้านทานการไหลของก๊าซ อันจะทำให้ความดันท้าย (backing pressure) ที่ข้อต่อปั๊มไอฟุ้งกระจายสูงเกินกว่าที่กำหนด แม้ว่าปั๊มกลโรตารีจะมีความเร็วปั๊มสูงก็ตาม ถ้าความดันท้ายสูงเกินไป ปั๊มไอฟุ้งกระจายจะทำงานไม่เป็นปกติ

ปั๊มไอฟุ้งกระจายส่วนใหญ่จะมีค่าความดันท้ายวิกฤติมากกว่า 0.4 torr ดังนั้นตาราง 3.2 แสดงค่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำก๊าซและความยาวของท่อ ถ้าหากไม่ต้องการให้ความเร็วปั๊มที่ความดัน 0.4 torr ลดลงเกิน 20%

ตารางที่ 3.2 ค่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อนำก๊าซและความยาวของท่อ

ค่าขจัดปั๊ม $m^3\ hr^{-1}$	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ(mm)	ความยาวท่อสูงสุด (m)
2	10	1.2
4	12	0.6
6	25	5.0
12	25	3.0
20	25	2.0
40	40	4.5
60	40	3.0
120	63	14.0
240	70	7.0
480	100	16.0

3.4.3 การคำนวณหาขนาดของปั๊มสุญญากาศเพื่อการขจัดน้ำจากผลิตภัณฑ์

สมมุติว่าต้องการขจัดน้ำปริมาณ 500 กรัมจากผลิตภัณฑ์ที่ความดัน 10 torr ภายในเวลา 15 นาที อุณหภูมิที่ปั๊ม 40 C จะต้องใช้ปั๊มความเร็วเท่าใด และจะต้องใช้ความร้อนเท่าใดในการทำให้น้ำระเหย

อัตราการปั๊มก๊าซหรือไอที่ความดันและอุณหภูมิใดๆ หาได้จาก

$$W = \frac{PSM}{RT}$$

เมื่อ W = อัตราการปั๊มมวลของสาร หน่วย $g\text{-}hr^{-1}$

S = ความเร็วปั๊มหน่วย $m^3\text{-}hr^{-1}$

P = ความดันที่ท่อนำก๊าซเข้าปั๊ม หน่วย torr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M = น้ำหนักโมเลกุล $g\text{-}mole^{-1}$

$\dot{T}$ = อุณหภูมิสัมบูรณ์ K

R = 62.3×10^{-3} torr $m^3\text{-}k^{-1}\text{-}mole^{-1}$

แทนค่าในสูตรจะได้

$$S = W \times \frac{RT}{PM} = 500 \times 4 \times \frac{62.3 \times 10^{-3} (273+40)}{10 \times 18}$$

$$= 217\ m^3\text{-}hr^{-1}$$

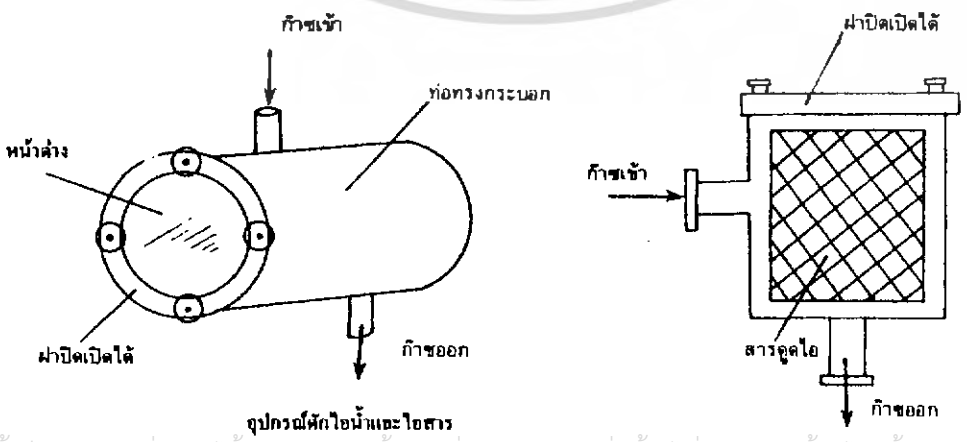
จึงควรเลือกปั๊มกลโรตารีที่มีความเร็วปั๊มไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ และมีก๊าซบัลลาสต์สำหรับไล่น้ำจากตัวปั๊ม ส่วนความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ 1 กรัม จะใช้ 590 cal ดังนั้นอัตราการใช้ความร้อนจึงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{590x500}{15x60} = 328\ cal\text{-}s^{-1}$$ หรือ 1370 Watt

การคำนวณข้างบนนี้ สมมุติว่ากระบวนการขจัดน้ำเกิดขึ้นที่ความดันคงที่ 10 torr ตลอดเวลา ซึ่งไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ

3.5 อุปกรณ์ดักไอน้ำและไอสาร (moisture and vapour traps)

ถ้ามีไอน้ำหรือไอของสารเข้าไปเจือปนอยู่ในน้ำมันปั๊มกลโรตารี การทำงานของปั๊มจะลดประสิทธิภาพลง ดังนั้นในระบบข้อต่อก่อนจะถึงปั๊มโรตารีจึงควรติดตั้งอุปกรณ์ดักไอน้ำและไอสาร อุปกรณ์นี้เป็นท่อซึ่งให้การไหลเข้าและไหลออกไปยังปั๊ม ภายในจะบรรจุสารดูดความชื้น เช่น ฟอสฟอรัสเพ็นตอกไซด์มันจะดูดไอน้ำได้ 20% ของน้ำหนักมัน โดยยังคงสภาพความดันไอต่ำไว้ ที่ด้านข้างของอุปกรณ์เป็นหน้าต่างกระจกสำหรับดูว่าฟอสฟอรัสเพ็นตอกไซด์อิ่มตัวหรือยัง ในขณะเดียวกันไอน้ำมันปั๊มกลโรตารีก็ไม่เป็นสิ่งที่ปรารถนาจะให้ไหลกลับเข้าไปยังภาชนะสุญญากาศที่สะอาด จึงควรมีอุปกรณ์เช่นเดียวกับอุปกรณ์ดักไอน้ำ แต่ภายในบรรจุสารที่ดูดไอได้ดี เช่น อะลูมิน่าที่ถูกกระตุ้นแล้ว (activated alumina)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ดักไอ

3.6 สารทำแห้งและดูดความชื้น

สารทำแห้งในที่นี้หมายถึงสารที่ใช้การดูดซับไอน้ำโดยตรง สารที่นิยมใช้ในระบบสุญญากาศเพื่อดูดความชื้นในการทำแห้ง ได้แก่ฟอสฟอรัสเพนต็อกไซด์ (P_2O_5) และซิลิกาเจล ตารางที่ 3.3 แสดงรายการสารทำแห้ง

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของสารทำแห้ง

วัสดุ	ปริมาตรของอากาศต่อ cm^3 ที่ STP	ปริมาตรน้ำต่อลิตรของอากาศที่เหลืออยู่
ซิลิกาเจล	2.1-5.2	0.006
อะลูมิเนียมออกไซด์	5.6-6.2	0.001
แคลเซียมซัลเฟต(แอนไฮดรัส)	0.45-0.7	2.8
แคลเซียมคลอไรด์(ผงก้อน)	6.1-24.2	1.5
สังกะสีคลอไรด์(แท่ง)	0.8-2.1	0.98
แบเรียมคลอเรต(แอนไฮดรัส)	2.3-3.7	0.82
แมกนีเรียมคลอเรต	2.3-8.9	0.80
โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์	4.0-7.2	0.031
(แท่ง)	3.2-7.2	0.014
แบเรียมออกไซด์	10.6-25	0.00065

3.6.1 สารดูดซับ (sorption) จะดูดเก็บก๊าซและไอของเหลว โดยไม่จำกัดว่าเป็นชนิดใด ได้แก่ ถ่านที่กระตุ้นแล้ว (activated charcoal) ซีโอไลต์ (zeolite) อะลูมิน่าที่กระตุ้นแล้ว (activated alumina) สารเหล่านี้มักใช้ในที่ดักไอความเย็นต่ำ เพราะสารทำความเย็นจัด เช่น ไนโตรเจนเหลวจะช่วยเพิ่มอัตราการดูดซับให้ดีขึ้น

ถ่านที่กระตุ้นแล้ว (activated charcoal) มักทำจากเปลือกมะพร้าว วิธีเตรียมคือ นำเปลือกมะพร้าวอ่อนมาเผาในเตาที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับร้อนแดง จนกระทั่งไม่มีไอขับออกมาอีก เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถ่านร้อนแดงอ่อนๆเป็นเวลา 30 วินาที แล้วเผาที่อุณหภูมิ 450 C เป็นเวลาหลายชั่วโมงภายใต้สุญญากาศ ถ่านควรจะมีพื้นที่ดูดซับก๊าซ 2500 m^2g^{-1} สามารถดูดซับก๊าซได้ 2000cm^3 ต่อ g ที่ความดันอุณหภูมิปกติ เมื่อใช้งานแล้วสามารถไล่ก๊าซและไอของเหลวออกได้โดยใช้ความร้อน เพื่อนำถ่านกลับไปใช้งานได้อีกวัสดุที่ใช้ทำถ่านได้อีก คือ ถ่านก้อน น้ำตาล

ที่อุณหภูมิปกติ การดูดซับออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนจะมากกว่าก๊าซหายาก (ยกเว้น อาร์กอน) และไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

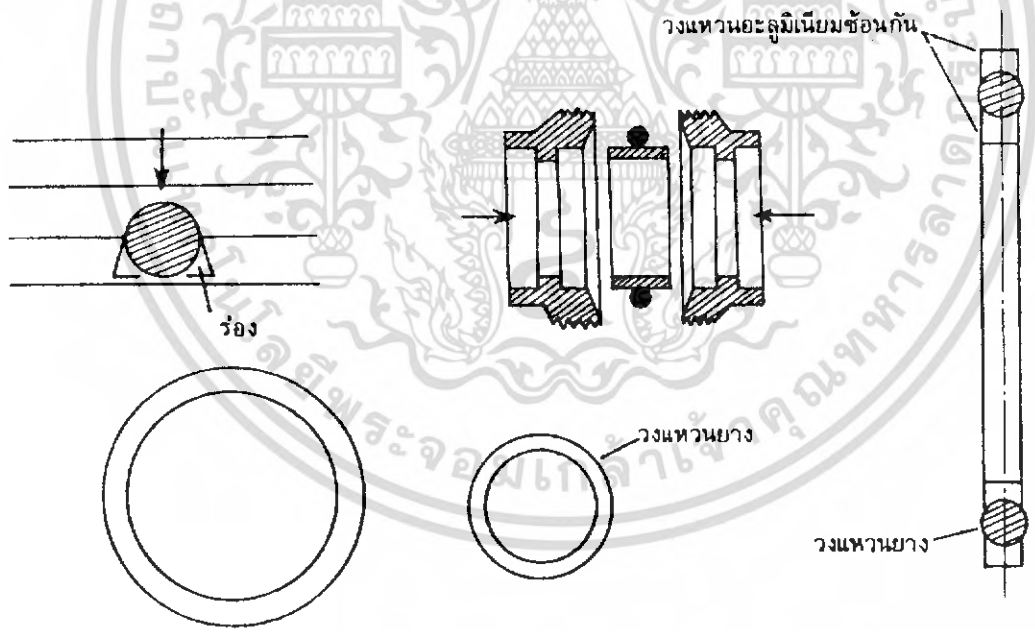
(1) ซีโอไลต์ เป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกต อยู่ในรูปธรรมชาติและสังเคราะห์ สามารถดูดซับก๊าซและไอโดยเฉพาะไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง ในสภาพใช้งานซีโอไลต์จะเป็นเม็ด เมื่อใช้แล้วก็สามารถเผาให้ร้อนเพื่อไล่ความชื้นได้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 600C ไม่ทำให้ซีโอไลต์เสียไป

(2) ซิลิกาเจล ได้จากการทำแห้งกรดซิลิซิค สามารถดูดซับไอน้ำและก๊าซถาวร แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าถ่านอะลูมินาและซีโอไลต์

(3) ฟอสฟอรัสเพ็นต็อกไซด์ (Phosphorus pentoxide) เป็นสารดูดความชื้น ใช้ในงานทำแห้งด้วยสุญญากาศ เมื่อรวมตัวกับน้ำจะได้กรดฟอสฟอริก จึงระวังอันตรายจากฤทธิ์กัดกร่อนของกรด และระวังการหายใจเอาผงฟอสฟอรัสเพ็นต็อกไซด์เข้าไป

3.7 ซีล (Seal)

ภาชนะสุญญากาศและระบบข้อต่อที่สามารถถอดประกอบและซ่อมบำรุงได้จะต้องมีวิธีการซีล เพื่อคงสภาพสุญญากาศไว้ได้ การซีลรอยต่อหรือข้อต่อนิยมใช้ยางวงแหวน ("O" ring) หรือปะเก็นยาง ปะเก็นทองแดง(copper-gasket)



รูปที่ 3.7 การซีลโดยใช้วงแหวนยางและลักษณะของวงแหวนยาง

วงแหวนยาง ("O" ring) วงแหวนยางทำด้วยไวตัน (vition) ยางนีโอพรีน หรือยางไนไตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของยางและวงแหวนต่างๆ กัน ในการใช้งานจะต้องเลือกขนาดให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำร่อง (groove) ยึดยางที่มีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของยาง ยางไวตันมีคุณภาพสูงใช้ซีลสุญญากาศได้ต่ำถึง 10^{-9} torr ส่วนยางไนไตรจะใช้กับสุญญากาศได้ต่ำเพียง 10^{-6} torr ความดันเอของยางจะมีค่าสูงตามอุณหภูมิใช้งานด้วย ถ้าต้องการซีลระบบสุญญากาศความดันต่ำมากและบางครั้งต้องอบที่อุณหภูมิสูงเกิน 250 C จำเป็นจะต้องใช้ปะเก็นทองแดง รูปที่6.9 แสดงวงแหวนยางที่ตำแหน่งซีลต่างๆ กัน ขนาดของร่องยึดควรจะโตกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของวงแหวนราว 0.01 cm และในกรณีที่มีแผ่นวัสดุกดทับควรออกแบบให้ร่องยึดมีความลึกเพียงพอทำให้เกิดการอัดตัว 25% ของขนาดเดิม เพื่อช่วยหล่อลื่นให้ใช้จาระบีสุญญากาศทาวงแหวนก่อนใช้เพียงบางๆ

"Con-O-ring" เป็นวงแหวนยางที่ยึดไว้โดยวงแหวนอลูมิเนียมซ้อนกัน สามารถใช้ซีลแผ่นจาน 2 แผ่นโดยไม่ต้องมีร่องคอยยึดวงแหวนยาง

3.8 การวัดความดันสุญญากาศ(Vacuum measurement)

3.8.1 หน่วยวัดความดัน

ความดัน ความดันในระบบสุญญากาศมีช่วงกว้างมาก ตั้งแต่ความดันบรรยากาศ (760 torr หรือ 1000 mbar) ไปจนถึง 10^{-12} torr ช่วงความดันอาจแบ่งได้เป็น

ความดันสุญญากาศหยาบ (rough vacuum) 760 – 1 torr

- ความดันสุญญากาศปานกลาง (medium vacuum) 1- 10^{-3} torr
- ความดันสุญญากาศต่ำ (high vacuum) 10^{-3} – 10^{-8} torr
- ความดันสุญญากาศมาก (ultrahigh vacuum) < 10^{-8} torr

หน่วยวัดความดัน นิยมใช้หน่วย torr (mmHg) ในระบบ S.I. จะใช้หน่วย pascal (pa) ซึ่ง 1 Pa มีค่าเท่ากับ 1 $N.m^{-2}$ หรือใช้ millibar (mbar) และ 1 bar = $1*10^{5}$ Pa

ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงค่าหน่วย

	torr	mbar	bar	pascal	atm
1 torr =	1	1.333	$1.33*10^{-3}$	133.3	$1.316*10^{-3}$
1 mbar =	0.75	1	0.001	100	$9.87*10^{-4}$
1 bar =	750	1000	1	$1*10^{-5}$	$9.87*10^{-1}$
1 pascal =	0.0075	0.01	$1*10^{-5}$	1	$9.87*10^{-6}$
1 atm =	760	1013	1.013	101325	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การขยายตัว หดตัวของก๊าซเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนค่าการนำความร้อนของโลหะภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ หรืออาศัยหลักการแตกตัวของก๊าซชนิดต่าง ๆ กันที่ความดันต่างกัน จะขอสรุปแบบของอุปกรณ์ช่วงความดันที่วัดได้ และหลักการโดยย่อในตารางที่ 3.5 เฉพาะแบบที่นิยมใช้กันอยู่

ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์วัดความดันและช่วงใช้งาน

ชนิดหรือแบบ	ช่วงความดันที่วัดได้	หลักการ
มาโนมิเตอร์	760 – 1 torr	การเปลี่ยนแปลงระดับปรอทเนื่องจากความดัน
เกจบัวดอง	760 – 10 torr	การเปลี่ยนขนาดของภาชนะปิดภายใต้ความดัน
เกจแอนีรอยด์	760 – 20 torr	การเปลี่ยนขนาดของภาชนะปิดภายใต้ความดัน
หลอดดิชาร์จ	5 – 0.01 torr	การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะดิสชาร์จไฟฟ้า เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง
เกจแม็คลาวด์	$10 - 10^{-6}$ torr	การเปลี่ยนแปลงระดับปรอท
เกจพิรานิ	$760 - 10^{-3}$ torr	ความต้านทานขดลวดเปลี่ยนตามการนำความร้อนของก๊าซ
เกจเทอร์โมคับเปิล	$760 - 10^{-3}$ torr	การนำความร้อนของก๊าซ
เกจเพ็นนิง	$10^{-2} - 10^{-6}$ torr	การไอออนไนเซชันของก๊าซภายใต้สนามแม่เหล็กและไฟฟ้า
เกจไอออนไนเซชันขั้วคาโทดร้อน	$10^{-3} - 10^{-11}$ torr	การไอออนไนเซชันของก๊าซ
เกจแอลฟาตรอน	$760 - 10^{-3}$ torr	การไอออไนเซชันของก๊าซเมื่อรับรังสี
เกจบาราตรอน	$760 - 10^{-4}$ torr	การเปลี่ยนค่าคาพาซิแตนท์

ในการเลือกใช้อุปกรณ์วัดความดัน ควรพิจารณาองค์ประกอบหรือข้อมูลที่เกี่ยวกับอุปกรณ์วัดดังนี้

(1) **ช่วงความดันที่วัดได้** ควรจะครอบคลุมความดันสุญญากาศที่ต้องการวัด หัววัดบางหัวจะทำงานที่ความดันต่ำมาก เช่น หัววัดเกจไอออนไนเซชัน ถ้าใช้วัดความดันสูงกว่า 10^{-3} torr หัววัดจะชำรุด ระบบสุญญากาศจึงมักใช้หัววัด 2 แบบ คือ วัดความดันในช่วง $760 - 10^{-3}$ torr ช่วงหนึ่งและต่ำกว่า 10^{-3} torr อีกช่วงหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

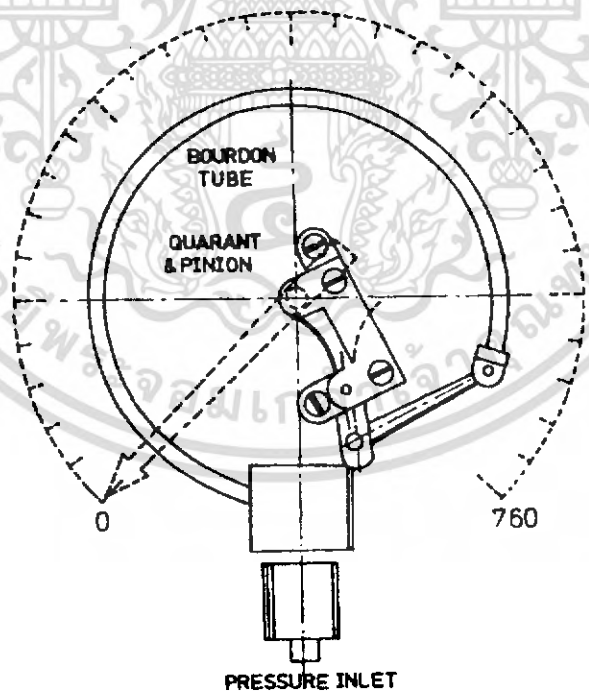
(2) ความละเอียดของสเกลวัด อุปกรณ์วัดความดันหลายแบบจะวัดความดันที่อ่านในสเกล log และอ่านสเกลเชิงเส้นตรงได้ในบางช่วง อุปกรณ์บางแบบจึงใช้อ่านความดันได้อย่างหยาบๆ เกจไอออนไนเซชัน สามารถอ่านในสเกลเชิงเส้นได้

(3) ความไวต่อก๊าซปั๊ม อุปกรณ์วัดความดันหลายแบบอาศัยหลักการนำความร้อนของก๊าซหรือการแตกตัวของก๊าซ ดังนั้นเมื่อใช้กับก๊าซต่างชนิดกันจะให้ความไวต่างกัน จึงต้องทราบค่าแก้หรือค่าเปรียบเทียบของก๊าซต่าง ๆ อุปกรณ์ประเภทนี้มักจะใช้ไนโตรเจนหรืออากาศแห้งมาตรฐาน

(4) ข้อมูลจำเพาะเกี่ยวกับอุปกรณ์ ควรทราบว่าหัววัดความดันสามารถแสดงค่าตอบสนองต่อการเปลี่ยนความดันได้เร็วช้าเพียงใด ผลของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ ความแม่นยำ ตลอดจนรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ อะไหล่ การติดตั้ง ข้อควรระวังต่าง ๆ

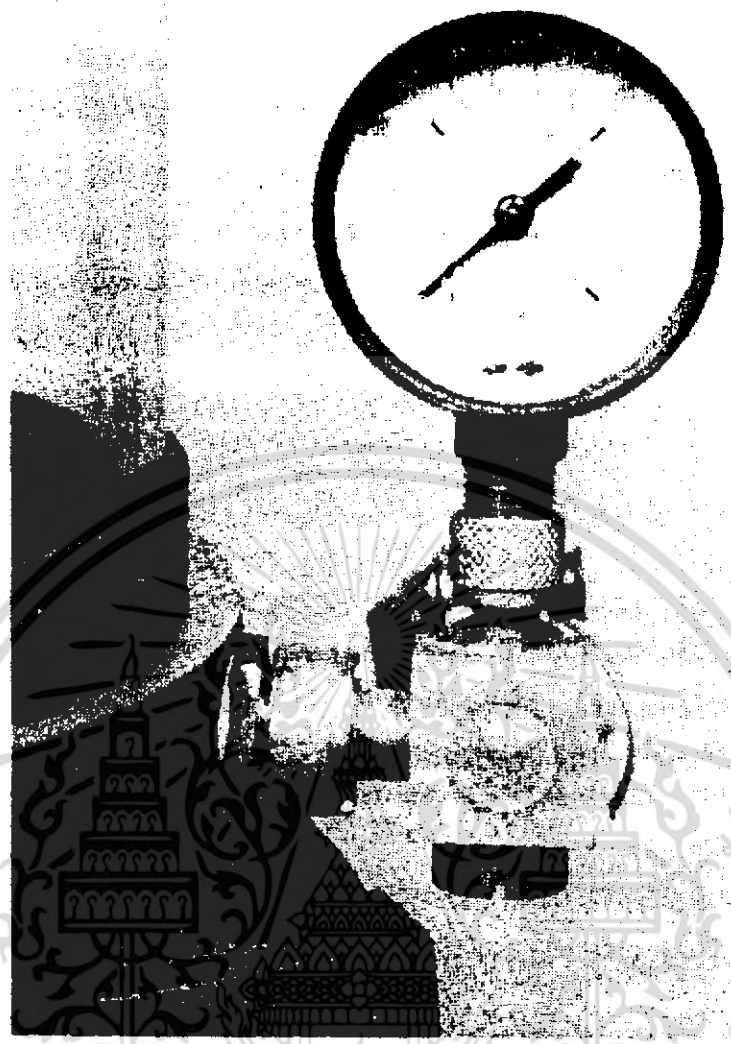
3.8.3 เกจบัวดอง (Bourdon gauge)

เกจบัวดองเป็นอุปกรณ์วัดความดันก๊าซ ใช้วัดความดันในช่วง 760 – 10 torr เกจบัวดองประกอบด้วยขดท่อกลวง มีภาคตัดขวางเป็นรูปรี ด้านหนึ่งปิด อีกด้านหนึ่งต่อกับภาชนะที่ต้องการวัดความดัน ถ้าความดันในท่อกลวงเพิ่มขึ้น ภาคตัดขวางจะเปลี่ยนจากรูปรีเป็นรูปวงกลม แล้วจะทำให้ขดท่อกลวงขยายตัวออก ถ้าความดันน้อยลง ขดท่อจะมีรัศมีน้อย การขยายตัวหรือหดตัวของขดลวดจะทำให้เข็มกระดิกชี้ค่าความดันบนสเกล



รูปที่ 3.8 (A) เกจบัวดอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 (B) เกจบัวดอง

เนื่องจากค่าของความดันที่วัดได้ขึ้นอยู่กับผลต่างของความดันภายในและภายนอกขดท่อ จึงไม่อาจใช้วัดค่าความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure) ได้ และอาจมีค่าผิดพลาดอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศภายนอก

ความดันสัมบูรณ์ที่วัดได้ = ความดันบรรยากาศ – ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4

ทฤษฎีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

4.1 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย [2]

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างง่าย จำเป็นจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์ วัสดุ พลศาสตร์ วัสดุศาสตร์ และอื่น ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานและการนำไปใช้

4.1.1 การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด(torque) จะบิดไปเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ}$$

โดยที่ T คือโมเมนต์บิด

L คือความยาว

J คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar moment of inertia)

$= \frac{\pi}{32} d^4$ สำหรับท่อนกลมตัน

$= \frac{\pi}{32}(d^4 - d_i^4)$ สำหรับท่อนกลมกลวง

d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

d_i คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการบิดจะมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกของท่อนกลมนี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = \frac{Tr}{J} \qquad (4.1)$$

โดยที่ r คือรัศมีนอกของท่อนกลม

ในการที่จะใช้สมการที่ (4.1) มักจะจำเป็นที่จะต้องหาค่าโมเมนต์บิดให้ได้เสียก่อน สำหรับเครื่องจักรกลที่ส่งกำลังมาตามเพลา จะคำนวณหาค่าโมเมนต์บิดได้จาก

$$Wp = T\omega = 2\pi nT \qquad (4.2)$$

โดยที่ Wp คือกำลังขับเป็น W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T คือโมเมนต์บิดเป็น Nm

ω คือความเร็วเชิงมุมเป็น rad/s

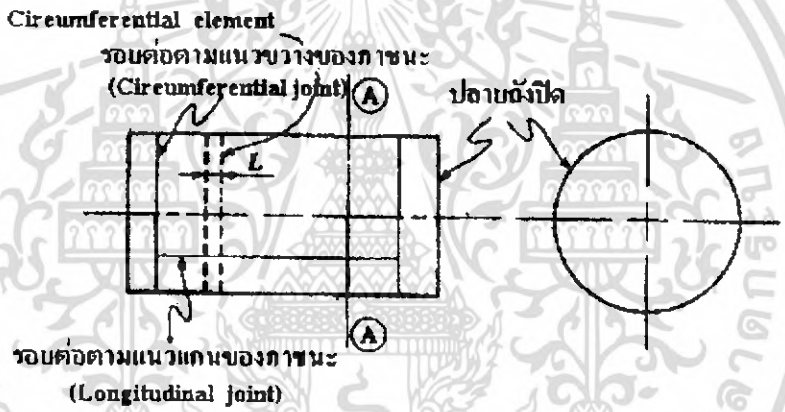
n คือความเร็วรอบเป็น rev/s

4.2 ภาชนะความดันผนังบาง(thin – walled pressure vessels) [3]

ภาชนะความดันผนังบาง โดยปกติจะมีรูปลักษณะทรงกลม, ทรงกระบอก หรือรูปวงรี จุดประสงค์เพื่อบรรจุของเหลวหรือก๊าซภายใต้ความดัน ในทางปฏิบัติภาชนะความดันประกอบด้วยเปลือกหรือผนังเพื่อบรรจุอากาศที่มีความดันด้วย Flange Rings และยึดด้วยรอยต่อและทนต่อแรงดันสูง

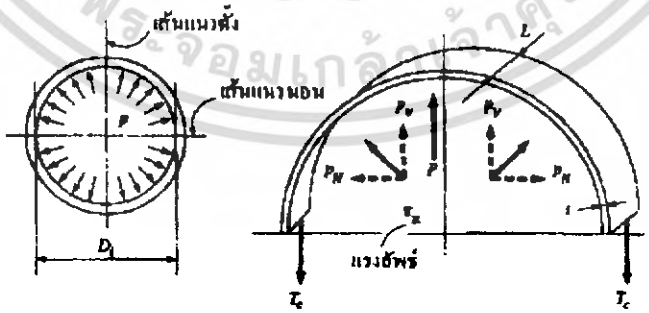
4.2.1ความเค้นในภาชนะความดันผนังบาง (stress in thin wall pressure vessel)

พิจารณารูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง จากรูป 4.1(a)



(a) (b)

ถ้าเราตัดหน้าตัด(Section) จะได้ดังรูป 4.1(c)



(c) (d)

รูปที่ 4.1 รูปตัดของภาชนะความดันผนังบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.1(c) และ 4.1(d) ภาชนะความดันมีความยาว L มีความหนา t ฉะนั้น แรงลัพธ์ในแนวตั้ง (Vertical) F_R = PLDi (หาจาก F = PA) ในที่นี้ค่าของ A เป็น projected area = LDi

การต้านแรงนี้ถูกกระทำตอบโต้โดยผนังของภาชนะความดัน การต้านเป็นการต้านแรงดึงโดยแรง Tc ซึ่งดูได้จากไดอะแกรมรูปอิสระ (free-body diagram) ผลรวมของแรงในแนวตั้ง $F_R = 2Tc$ ฉะนั้น $Tc = F_R/2$ ดังนั้น การแก้ปัญหาสำหรับความเค้นแรงดึงในแนวเป็นรอบวง (circumferential tensile stress) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Hoop stress ในผนังของภาชนะความดัน จะได้ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{T_c}{tL} = \frac{F_R/2}{tL} = \frac{PLD_i}{2tL} = \frac{PD_i}{2t} = \frac{P(2r_i)}{2t}$$

$$\therefore \sigma_t = \frac{Pr_i}{t} \qquad (4.3)$$

โดยกำหนด σ_{tc} หมายถึง ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (circumferential tensile stress) ในผนังของภาชนะความดันผนังบาง

P	หมายถึง	ความเค้นภายใน
Di	หมายถึง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของภาชนะความดัน
ri	หมายถึง	รัศมีภายในของภาชนะความดัน
t	หมายถึง	ความหนาของภาชนะความดัน

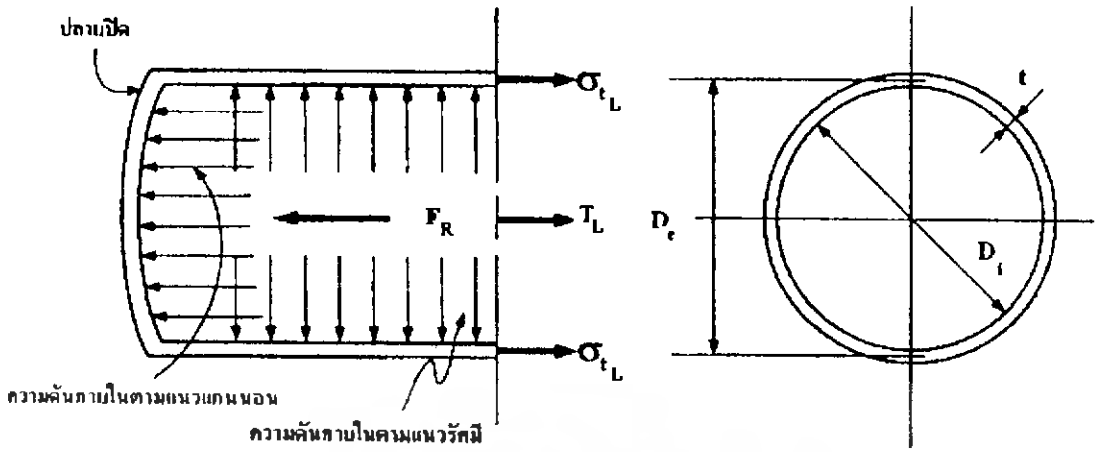
ข้อสังเกต ตัวอักษร F_R แรงลัพธ์ (resultant force) ซึ่งเกิดจากความดันในถัง

ในสมการ $\sigma_t = \frac{Pr}{t}$ สามารถใช้ในการออกแบบ เพื่อคำนวณหาค่าความหนาของถังภาชนะที่สามารถต้านความดันภายใน ขณะความเค้นแรงดึงอนุญาตไม่เกินที่กำหนด (σ_{tc})allow สมการนี้จะได้ค่า t ดังนี้

$$t = \frac{PD_i}{2(\sigma_t)_{allow}} \qquad (4.4)$$

สภาพการณ์ของภาชนะความดันที่มีรูปทรงกระบอกปลายปิด จะฉีกหรือแยกออกตามแนวยาว (longitudinal) ของรอยต่อ ความดันจะมีแนวโน้มเกิดขึ้นพร้อมกัน เพื่อที่จะผลักด้านปลายให้แยกออกและดึงส่วนของภาชนะตามแนวเส้นรอบวง ความเค้นดึงจะเกิดขึ้นในผนังของภาชนะความดันที่ซึ่งกระทำบนรอยต่อของจุดแนวเส้นรอบวง ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความเค้นตามแนวยาวของภาชนะหรือ Longitudinal Stress ความเค้นนี้จะตั้งฉากในแนวเส้นรอบวง เพื่อหาค่าความเค้นตามตามแนวยาวที่เกิดขึ้น (Longitudinal Stress) พิจารณาจากรูปส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดันดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 4.2 ส่วนปิดของภาชนะความดันรูปทรงกระบอกที่ถูกกระทำด้วยความดัน

เนื่องจากด้านปลายของภาชนะความดันถูกปิด ผลรวมของแรงลัพธ์ (F_R) จะผลักด้านปลายของภาชนะความดันออก และสามารถหาแรงลัพธ์ในเทอมของความดันและพื้นที่ได้ดังนี้

เพื่อที่จะหาสภาพการณ์ที่สมดุลของแรง F_R ต้องหาจากผลรวมของแรงต้าน T_L ที่เกิดขึ้นที่ผนังในแนวแกนนอน กำหนด σ_{tL} เป็น Longitudinal Stress และกำหนดผนังของภาชนะมีความหนาเท่ากันตลอด

$$\therefore \quad \text{จะได้ค่า } \sigma_{tL} = \frac{T_L}{A} = \frac{T_L}{\pi D_C t} = \frac{F_R}{\pi D_C t} \text{ ; ในที่นี้ } (T_L = F_R)$$

กำหนด D_C เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะความดันระหว่างจุดศูนย์กลางของผนัง และในภาชนะผนังบางนี้ ค่าของ $D_c \approx D_i$

$$\therefore \text{ จะได้ } \quad \sigma_{tL} = \frac{P(\pi D^2 i)/4}{\pi D_i t} = \frac{PD_i}{4t}$$

$$\sigma_{tL} = \frac{Pr_i}{2t} \qquad (4.5)$$

ซึ่ง σ_{tL} เป็นความเค้นตามแนวแกนนอนในผนังของภาชนะความดัน จะพบว่าความเค้นตามแนวแกนนอนของภาชนะความดัน จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเค้นตามแนวเส้นรอบวง หรือ $\sigma_{tC} = 2\sigma_{tL}$ ฉะนั้น ถ้าของไหลถูกบรรจุในภาชนะความดันปิด และเกิดความเค้นมากเกินไปภาชนะความดันจะแตกหรือแยกออกตามแนวแกนขาวของภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม [4]

ค่าสำหรับหน่วยวงกลม

(ดูตารางในภาคผนวก ข. ประกอบการคำนวณ)

α = มุมรอบจุดศูนย์กลาง

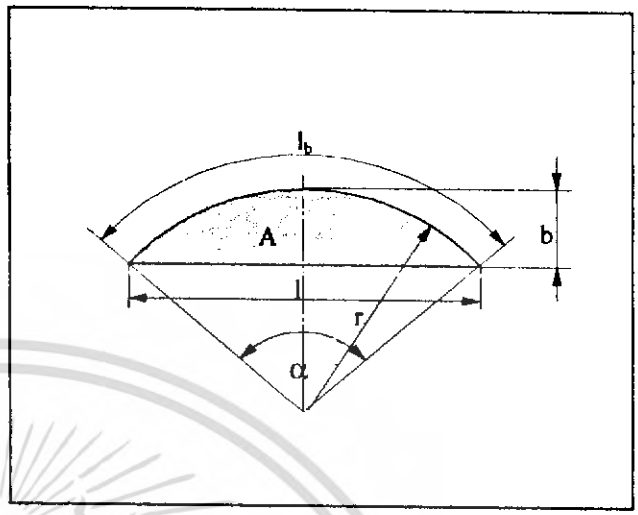
b = ความกว้างส่วนตัด

A = พื้นที่ส่วนตัด

l_b = ความยาวส่วนโค้ง

l = ความยาวส่วนตัด (คอร์ด)

r = รัศมี



รูปที่ 4.3 ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม

วิธีคำนวณส่วนของวงกลมจากตาราง(ภาคผนวก ข.)	วิธีคำนวณค่าฟังชั่นของมุมจากตาราง(ภาคผนวก ข.)
$l_b = r \cdot l_{b1}$	$l_b = \frac{\pi \cdot r \cdot \alpha}{180^\circ}$
$b = r \cdot b_1$	$b = r\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right) = 2r \cdot \sin^2\frac{\alpha}{4} = \frac{l}{2} \cdot \tan\frac{\alpha}{4}$
$l = r \cdot l_1$	$l = 2r \cdot \sin\frac{\alpha}{2}$
$A = r^2 \cdot A_1$	$A = \frac{1}{2}r^2\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} - \sin\alpha\right)$

l_{b1}, b_1, l_1, A_1 = ค่า factor ประกอบการคำนวณดูจากภา8ผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

คุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับน้ำกะทิเข้มข้น

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของสี [15]

ในทางกายภาพ เราสามารถนิยามสีของวัตถุใดๆ ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่หรือสะท้อนออกมาจากวัตถุนั้น ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วง visible wavelength (ประมาณ 380-740 nm) ตาของมนุษย์จะสามารถเห็นได้ และรับรู้ว่าเป็นสีอะไร เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบวัตถุ แสงบางส่วนอาจถูกดูดซับ (absorb) หรือทะลุผ่าน (transmit) บางส่วนอาจสะท้อน (reflect) หรือหักเห (bend) รวมถึงบางส่วนที่เกิดการแผ่รังสี (radiation) แสงส่วนที่สามารถเดินทางมาถึงผู้สังเกตได้ จะเป็นสีที่ผู้สังเกตมองเห็น

วัตถุต่างชนิดมีสีที่แตกต่างกัน เช่น เขียว เหลือง แดง เป็นผลมาจากการที่วัตถุมีความสามารถในการดูดซับพลังงานแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ แตกต่างกัน ถ้าวัตถุชนิดหนึ่งดูดซับพลังงานแสงความยาวคลื่นอื่นเอาไว้ แล้วสะท้อนออกมาเฉพาะความยาวคลื่นช่วง 380 นาโนเมตร ออกมาปริมาณมากกว่าความยาวคลื่นอื่นเราจะเห็นวัตถุเป็นสีม่วง ความยาวคลื่นที่สะท้อนออกมามากกว่าความยาวคลื่นอื่น และมีอิทธิพลต่อสีของวัตถุ เราเรียกความยาวคลื่นนั้นว่า ความยาวคลื่นเด่น (dominant wavelength) หรือ hue

เม็ดสีในวัสดุเกษตรและอาหารมีความสามารถในการดูดซับและสะท้อนพลังงานแสงที่แตกต่างกัน เช่น คลอโรฟิลล์ในใบไม้จะสะท้อนสีเขียว แอนโทไซยานินในไวน์จะสะท้อนสีแดง และเบต้าแคโรทีนในฟักทองหรือมันเทศจะสะท้อนสีเหลือง เป็นต้น นอกจากนี้พื้นผิวของวัสดุก็ยังมีผลต่อการเห็นสีด้วย เป็นมันเลื่อม แต่ถ้าหากวัสดุด้านหรือขรุขระ แสงสะท้อนจะกระจายไปหลากหลายทิศทางทำให้วัสดุดูมืดกว่า

พระอาทิตย์ดูเหมือนจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ดีสำหรับการพิจารณาสี แต่ในความเป็นจริงแล้วในแต่ละสถานที่ในแต่ละวันและในแต่ละชั่วโมง แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันเลย ทั้งสเปกตรัมของแสง ความเข้มและทิศทาง จึงไม่สามารถใช้แสงอาทิตย์เป็นมาตรฐานสำหรับการพิจารณาสีได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงขึ้นเพื่อให้การพิจารณาสีนั้นอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน หรือสามารถเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1931 CIE (Commission Internationale de l'Eclairage หรือ International Commission On Illumination) ซึ่งเป็นองค์กรสากลทางด้านมาตรฐานการวัดแสง โดยได้กำหนดมาตรฐานหลอดไฟสำหรับการวัดสีขึ้นจำนวนหนึ่งและได้มีการพัฒนาต่อมาเป็นเวลานาน ทั้งนี้เมื่อใช้ต้นกำเนิดแสงมาตรฐานแล้ว ยังต้องมีการกำหนดสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ระยะห่าง ทิศทางและการรบกวนแสงตามมาตรฐานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเป็นคุณสมบัติที่มีความซับซ้อน หากต้องการระบุค่าสีให้คนอื่นเข้าใจตรงกันหรือต้องการเปรียบเทียบสีที่มีความคล้ายกันมากๆ คงเป็นเรื่องยากมากหากไม่สามารถระบุค่าในเชิงปริมาณได้ ในการระบุค่าของสี ได้มีผู้ศึกษาและสร้างมาตรฐานขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้คุณสมบัติ 3 ประการ ได้แก่

- สี (hue) คือ ค่าสีหลักของวัตถุ มีทั้งระบุเป็นเชิงคุณภาพ (ระบุเป็นสี เช่น แดง เขียว น้ำเงิน เป็นต้น) แต่จะมีการไล่สีอิงกับค่าความยาวคลื่น และที่ระบุเป็นเชิงปริมาตรเลย (เช่น ค่าความยาวคลื่น หรือกำหนดเป็นองศาของสี)

- ความสว่าง (lightness) คือ ค่าความสว่าง วัตถุสีขาวจะมีค่าความสว่างมากที่สุด และวัตถุสีดำจะมีค่าความสว่างน้อยที่สุด

- ความอิ่มตัว (chroma) คือ ค่าความอิ่มตัวหรือความบริสุทธิ์ของสี หากมีค่าเต็มวัตถุจะมีสีเท่ากับ Hue และหากมีค่าเป็นศูนย์ วัตถุนั้นจะเป็นสีเทา (จะเป็นเทาเข้มหรืออ่อน ขึ้นอยู่กับค่า lightness)

เนื่องจากการวัดค่าสี เป็นเรื่องที่ซับซ้อน จึงมีการพัฒนามาตรฐานในการระบุค่าสี ที่เป็นระบบขึ้น ระบบที่นิยมใช้มีอยู่มากมายหลายระบบการเลือกใช้ระบบสีขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน สีบางสีไม่สามารถระบุได้ในบางระบบ แต่สีบางสีก็สามารถคำนวณแปลงข้ามระบบได้ ระบบที่นิยมใช่ได้แก่ mullsell color system , hunter color system และ CIE color system

5.1.1 ค่าดัชนีความขาว (whiteness Indices)[11]

ค่าดัชนีความขาว (whiteness Indices) เกี่ยวข้องกับพื้นที่ ที่เป็นสีขาวของวัตถุ โดยระดับค่าดัชนีความขาวจะวัดได้โดยระดับของการเบี่ยงเบนไปจากมาตรฐานสีขาวของวัตถุ โดยจะมีสมการการคำนวณค่าดัชนีความขาวดังนี้

$$WICIE = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y) \qquad (5.1)$$

ค่า Y X Z เป็นค่าคู่ลำดับของสี (chromaticity Coordinates) ที่ได้จากวัดจากตัวอย่างของระบบ CIE ส่วนค่า Y จะเป็นค่า luminance factor และ x และ y คือค่า chromaticity coordinates ซึ่งค่า x, y หาได้จาก

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

ค่า x และ y จะบอกค่าสีในช่วงของ เขียว-แดง น้ำเงิน-เหลือง ตามลำดับ ส่วนค่า x_n กับ y_n เป็นค่าของสีขาวมาตรฐานที่วัดค่าโดยแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65/10°(แหล่งกำเนิดแสงของเครื่องวัดสี Miniscan) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ x_n =0.3138 และ y_n = 0.3310

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 CIE 1976 L*a*b* scale[11]

ระบบ ค่าสี CIE 1976 L*a*b* scale เป็นระบบที่ได้แนะนำมาจาก Commission internationale de l' Eclairage (CIE) L* คือ ค่าบ่งบอกถึงความสว่าง,a* คือ ค่าสีในช่วงของ เขียว-แดง, b* คือ ค่าสีในช่วงของ น้ำเงิน-เหลือง โดยความสัมพันธ์ ระบบ CIE 1976 L*a*b* scale กับระบบ CIE XYZ (ได้กล่าวในข้างต้น) มีดังนี้

- ถ้าค่า X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n มีค่ามากกว่า 0.008856 ใช้ค่าดังนี้

$$L^* = 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad a^* = 500\left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}\right) \quad b^* = 200\left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}\right)$$

- ถ้าค่า X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.008856 ใช้ค่าดังนี้

$$L^* = 903.3 \cdot \frac{Y}{Y_n} \quad a^* = \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad b^* = \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right)$$

เมื่อ

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt{\frac{X}{X_n}} \qquad X/X_n > 0.008856$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7.87\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} \qquad X/X_n \le 0.008856$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \qquad Y/Y_n > 0.008856$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7.87\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} \qquad Y/Y_n \le 0.008856$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \qquad Z/Z_n > 0.008856$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7.87\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116} \qquad Z/Z_n \le 0.008856$$

การหาค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (DE*) หาได้จาก

$$DE^* = \sqrt{DL^{*2} + DA^{*2} + Db^{*2}}$$

เมื่อ

$$DL^* = L^*_{SMP} - L^*_{STD}$$

$$Da^* = a^*_{SMP} - a^*_{STD}$$

$$Db^* = b^*_{SMP} - b^*_{STD}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ความหนืด (viscosity)[12]

ความหนืด (viscosity) เป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานการไหล หรือความต้านทานการเฉือนของของไหล ขนาดของแรงที่ทำให้เกิดการไหลขึ้น ขึ้นกับ viscosity ของของไหล ความเค้นเฉือน (shear stress, τ) เป็น stress ที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของของไหลเลื่อนตัวผ่านโมเลกุลอื่นในระนาบใดๆ ส่วนความเร็วที่โมเลกุลใดๆเลื่อนผ่านโมเลกุลอื่น เรียกว่า velocity gradient (-dv/dy) ซึ่งก็คืออัตราการเฉือน (rate of shear หรือ shear rate, $\dot{\gamma}$) ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ของการไหลของของไหล ในทิศทางเดียวแสดงได้โดย

$$\tau = \mu\left[-\frac{dv}{dy}\right] \qquad (5.2)$$

สมการนี้เรียกว่า Newton 's law of viscosity และ μ เป็นค่าคงที่เรียกว่า viscosity ของของไหล ของไหลประเภท newtonian จะเป็นไปตามกฎนี้ และค่า μ คงที่ โดยไม่ขึ้นกับ shear stress หรือ shear rate ของไหลเหล่านี้ได้แก่ น้ำ

ของไหลที่มีพฤติกรรมแตกต่างจากสมการที่ 1 เรียกว่า non- Newtonian fluid สมการที่อธิบายพฤติกรรมของของไหลประเภทนี้ มี 2 สมการ คือ สมการ power law (สมการที่ 5.3) และสมการ Herschel-Bulkley (สมการที่ 5.4)

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \qquad (5.3)$$

$$\tau = \tau_0 + k(\dot{\gamma})^n \qquad (5.4)$$

n คือ flow behavior index (ไม่มีหน่วย)

k คือ consistency index มีหน่วยเป็นหน่วยความดันคูณกับหน่วยเวลายกกำลัง n เช่น $Pa.s^n$

τ_0 คือ yield stress คือ stress ที่ต้องเอาชนะก่อนที่ของไหลจะเริ่มไหล

สมการที่ 5.3 และสมการที่ 5.4 สามารถจัดใหม่ได้ดังนี้

$$\tau = \left|k(\dot{\gamma})^{n-1}\right| \cdot \dot{\gamma} \qquad (5.5)$$

$$\tau - \tau_0 = \left|k(\dot{\gamma})^{n-1}\right| \cdot \dot{\gamma} \qquad (5.6)$$

จากสมการที่ 5.5 และ 5.6 กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

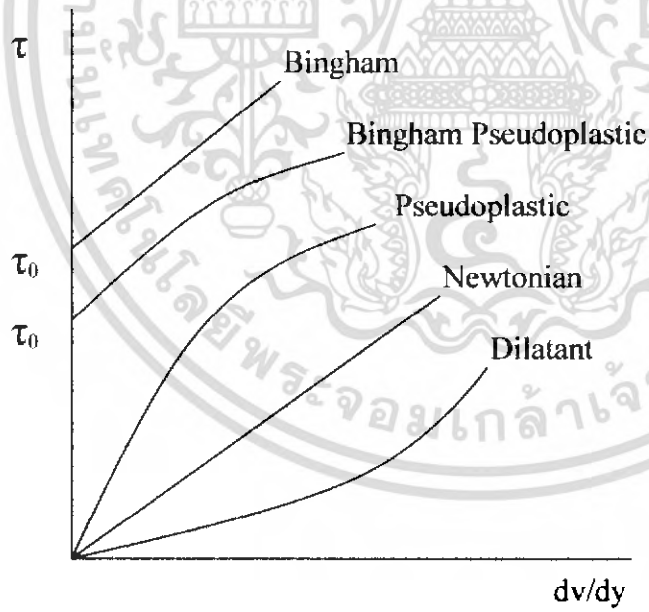
$$\text{apparent viscosity} = \mu_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \qquad (5.7)$$

$$\text{apparent viscosity} = \mu_{app} = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \qquad (5.8)$$

เมื่อ n < 1 และ apparent viscosity จะลดลงเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น ของไหลจะมีพฤติกรรมที่เรียกว่า shear thinning เรียกของไหลนั้นว่า shear thinning fluid หรือ pseudoplastic fluid ซึ่งได้แก่ หมึกพิมพ์ น้ำกะทิ

เมื่อ n > 1 และ apparent viscosity จะเพิ่มขึ้นเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น ของไหลจะมีพฤติกรรมที่เรียกว่า shear thickening เรียกของไหลนั้นว่า dilatant fluid ได้แก่ ปูนซีเมนต์เปียก

ของไหลพวกที่มี yield stress เรียกว่า เป็นของไหลประเภท Bingham ได้แก่ ยาสีฟัน และถ้า n = 1 เรียกว่าเป็นของไหลประเภท Bingham plastic ส่วนของไหลพวกที่มี yield stress และ n < 1 เรียกว่าเป็นของไหลประเภท Herschel Bulkley หรือ Bingham pseudoplastic



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ของของไหลชนิดต่างๆ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 refractometer [13]

เมื่อนำหลอดๆหนึ่งจุ่มลงในแก้วน้ำที่มีน้ำอยู่ จะสังเกตเห็นการโค้งงอของหลอด และถ้าน้ำที่มีอยู่ในแก้วมีน้ำตาลละลายอยู่ หลอดจะโค้งงอมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การหักเหของแสง (refraction) refractometer คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นจากการหักเหของแสงนี้ โดยหลักการทำงานของ refractometer จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสาร เช่น การละลายของน้ำตาลในน้ำ และจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น (เราจะสังเกตการณ์โค้งงอได้มากขึ้น) โดย refractometer ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาโดย Dr. Ernst Abbe ในต้นศตวรรษที่ 20

refractometer หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศสู่น้ำ จากน้ำสู่คริสตัล โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง เป็นต้น

การตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) สามารถทำได้ 2 ระบบ คือ ระบบการส่องผ่านของแสง (transparent system) และ ระบบการสะท้อนของแสง (refraction system) โดย refractometers ที่ใช้ระบบของการสะท้อนของแสง คือ hand – held refractometer และ Abbe refractometers ส่วน refractometers ที่ใช้ระบบของการส่องผ่าน คือ digital refractometers

ค่าของ Brix (%) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลาย (water solution) ปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมด (soluble solid) คือ ผลรวมของของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด เช่น น้ำตาล เกลือ โปรตีน กรด เป็นต้น และค่าที่อ่านได้จะออกมาในรูปผลรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมด

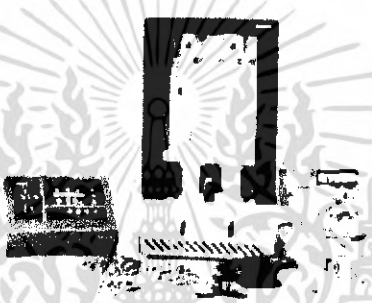
5.4 เปอร์เซ็นต์ไขมัน [14]

ไขมันเป็นหนึ่งในส่วนประกอบหลักที่พบในอาหารแทบทุกประเภท ซึ่งจะมีมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร เช่น เนื้อสัตว์ นม ธัญพืช และผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปต่างๆ มันเป็นแหล่งสะสมพลังงานและเป็นแหล่งให้กรดไขมันจำเป็นต่อร่างกาย ในทางตรงกันข้ามการบริโภคไขมันบางประเภทอย่างเช่น คอเรสเตอรอล (cholesterol) และไขมันอิ่มตัว (saturated fats) ในปริมาณที่มากก็ทำให้เกิดผลเสียต่อร่างกายได้เช่นกัน ในอาหารหลายชนิด ไขมันจะมีบทบาทสำคัญในการกำหนดลักษณะทางกายภาพ เช่น กลิ่น/รส (flavor), เนื้อสัมผัส (texture) และความรู้สึกที่ปาก (mouthfeel) ดังนั้นมันจึงเป็นการยากถ้าหากต้องใช้ในปริมาณน้อย เพราะอาจทำให้ลักษณะทางกายภาพของอาหารชนิดนั้นไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ไขมันหลายชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดกลิ่น/รสที่ไม่พึงปรารถนา (off-flavors) หรือเกิดสารบางชนิดที่อาจเป็นอันตรายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลเหล่านี้จึงทำให้ต้องมีการวิเคราะห์ชนิด ปริมาณ สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และโครงสร้างของไขมัน

ไขมันเป็นกลุ่มของสารชีวโมเลกุลที่มีสมบัติร่วมกันคือไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายไขมัน เช่น อีเทอร์ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม และเบนซิน เป็นต้น ไขมันเป็น เอสเทอร์ (ester) หรือสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ (esterification) ของกรดไขมันในอาหารชนิดต่างๆจะมีไขมันหลายชนิดอยู่รวมกัน เช่น ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ไดกลีเซอไรด์ (diglycerides) โมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides) กรดไขมันอิสระ (free fatty acids) ฟอสโฟลิปิดสเตอรอล แครอทีนอยด์ วิตามินเอ หรือวิตามินดี เป็นต้น แต่จะมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ เป็นสัดส่วนที่มากที่สุด โดยคิดเป็น 95-99 % ของปริมาณไขมันทั้งหมด



รูปที่ 5.2 ชุดเครื่องวิเคราะห์ไขมันโดยวิธี babcock และ gerber

การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธีการสกัดโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย (non-solvent liquid extraction method) คือวิธีการสกัดไขมันในอาหารด้วยของเหลว ซึ่งไม่ได้มีเพียงแต่ตัวทำละลายอินทรีย์เท่านั้น แต่ยังสามารถใช้สารเคมีอื่นๆได้อีก เช่น วิธี Babcock วิธี Gerber หรือวิธีใช้ detergent ซึ่งเหล่านี้คือตัวอย่างของวิธีการใช้สารเคมีชนิดอื่น (เช่น กรดซัลฟูริก) ผสมลงในตัวอย่างอาหารแล้วปั่นแยกไขมันออกมา โดยที่วิธี Babcock และ Gerber เป็นวิธีวิเคราะห์ไขมันในน้ำนมที่ได้รับความนิยมในยุโรปและอเมริกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่6

การคำนวณและการออกแบบ

6.1 แนวความคิดในการออกแบบ

(1) ถังหรือภาชนะที่ใช้การระเหยผลิตภัณฑ์ต้องทนแรงดันสุญญากาศได้

(2)ใบกวนภายในถังสุญญากาศต้องทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดลักษณะเป็นฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

(3) เพลาขับใบกวนต้องสามารถทนต่อแรงบิดได้

(4) ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่จะทำระเหยคือ 5 ลิตร

(5) ใช้วัสดุที่หาง่าย และราคาประหยัด

6.2 การหาระดับความดันสุญญากาศที่ต้องการในการทำระเหย

ได้จาก การทดลองเพื่อหาระดับความดันสุญญากาศที่เหมาะสม โดยใช้เครื่อง Rotary Vacuum Evaporator

วัสดุอุปกรณ์

(1) ตัวอย่างน้ำกะทิที่ได้จากท้องตลาด

(2) Rotary Vacuum Evaporator

(3) Refractometer

การทดลอง

(1) บรรจุน้ำกะทิ 200 ml ลงในขวดก้นกลมของ Rotary Vacuum Evaporator

(2) ปรับความเร็วรอบการหมุนขวดก้นกลมที่ระดับ 5

(3) ทำการทดลอง 5 สภาวะ คือ

- ความดัน 20 mmHg, อุณหภูมิน้ำ 40°C
- ความดัน 30 mmHg, อุณหภูมิน้ำ 30°C
- ความดัน 87 mmHg, อุณหภูมิน้ำ 60°C
- ความดัน 87 mmHg, อุณหภูมิน้ำ 70°C
- ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิน้ำ 60°C

(5) จับเวลาและสังเกต การเปลี่ยนแปลงของน้ำกะทิ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งหยุดเดือด จึงทำการวัดค่า total soluble solids และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำที่หายไปกับอัตราการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการทดลองการหาระดับความดันสุญญากาศที่ต้องการในการทำระเหย

condition	%Brix	อัตราการระเหย (ลิตรต่อชั่วโมง)	%น้ำกะทิที่ระเหยไป	เวลาที่ระเหย (นาที)
น้ำกะทิเริ่มต้น	14.3			
ความดัน20 mmHg, อุณหภูมิ40 °C	24.96	2.25	28.92	15.56
ความดัน30 mmHg, อุณหภูมิ50 °C	22.56	2.34	24.15	12.51
ความดัน87 mmHg, อุณหภูมิ60 °C	18.3	1.50	18.67	15
ความดัน87 mmHg, อุณหภูมิ70 °C	16.87	2.50	18.63	9
ความดัน50 mmHg, อุณหภูมิ60 °C	ระหว่าง 32-58	2.42	35.01	17

จึงสรุปได้ว่า ที่ช่วงความดันประมาณ 50 mmHg และอุณหภูมิประมาณ 60 °C เป็นช่วงที่เกิดการระเหยมากที่สุด โดยมีน้ำระเหยไป 35.01 % มีอัตราการระเหย 2.42 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่า total soluble solids อยู่ระหว่าง 32-58 %Brix จึงได้นำข้อมูลเหล่านี้มาประกอบการเลือกขนาด vacuum pump และ ขนาดของ heater

6.3 การออกแบบ ทดลอง และสร้างใบกวน ลักษณะต่าง ๆ

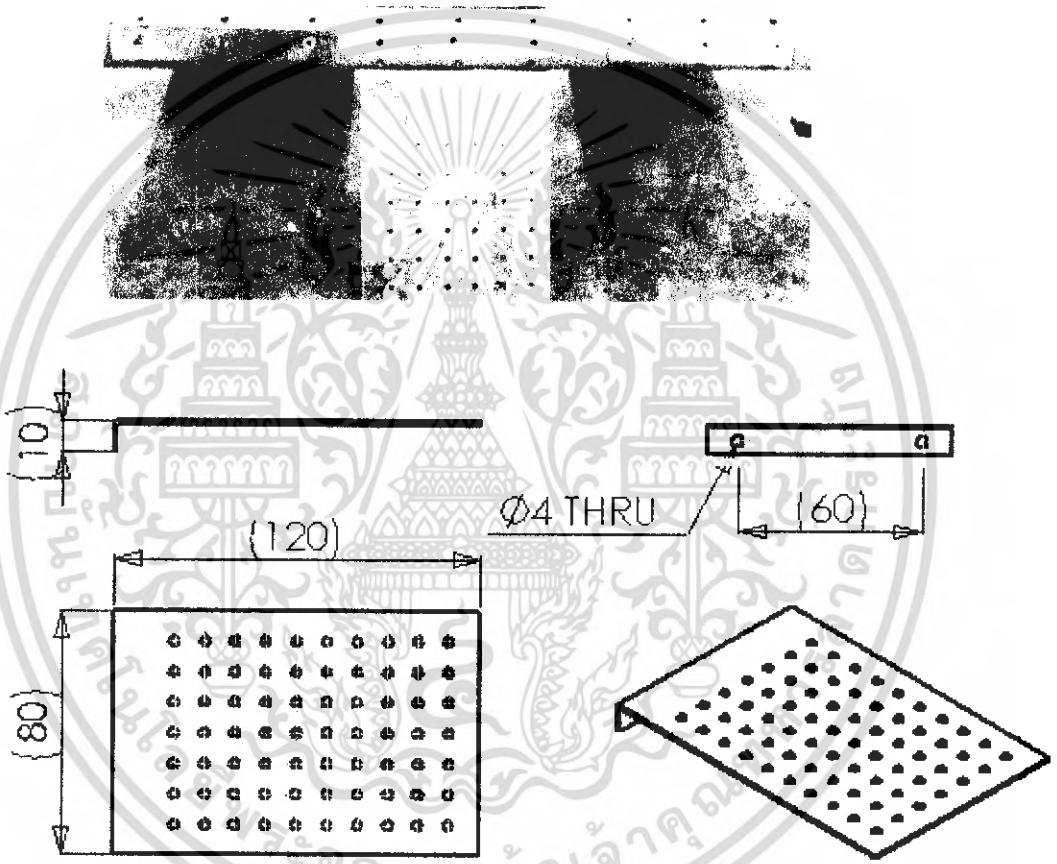
6.3.1 ใบกวนแบบแผ่นตรงแบบเจาะรูทั่วแผ่น

เริ่มต้นโดยคิดว่า ต้องการจะให้น้ำกะทิในถังสุญญากาศเกิดเป็นฟิล์มแผ่นบางๆจึงนำใบกวนมาเจาะรูเพื่อต้องให้น้ำไหลผ่านรูไปในลักษณะเส้นบางๆ โดยได้แนวความคิดมาจาก กังหันน้ำชัยพัฒนา และสังเกตการตีน้ำเมื่อใช้ใบกวนเป็นแบบแผ่นตรง

การสร้าง ใช้แผ่นสังกะสีเป็นวัสดุในการทำ โดยจะตัดแผ่นสังกะสีให้มีลักษณะตามขนาดเจาะรูขนาด 3 มม. ทั่วทั้งแผ่นสังกะสี และใช้รีเวทเป็นเป็นตัวยึดติดกับแกนท่อ PVC (ดังรูปที่ 5.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองใช้ มอเตอร์ขับใบกวน ที่ 5,10, 50,100 รอบต่อนาที เติมน้ำลงไป 5 ลิตร ผลของลักษณะการกวนที่ได้ คือ จะมีลักษณะเป็นการตีน้ำให้เกิดความปั่นป่วนภายในถัง โดยที่ไม่มีลักษณะของฟิล์มแผ่นบางๆเกิดขึ้น



รูปที่ 6.1 ใบกวนแบบแผ่นตรงแบบเจาะรูทั่วแผ่น

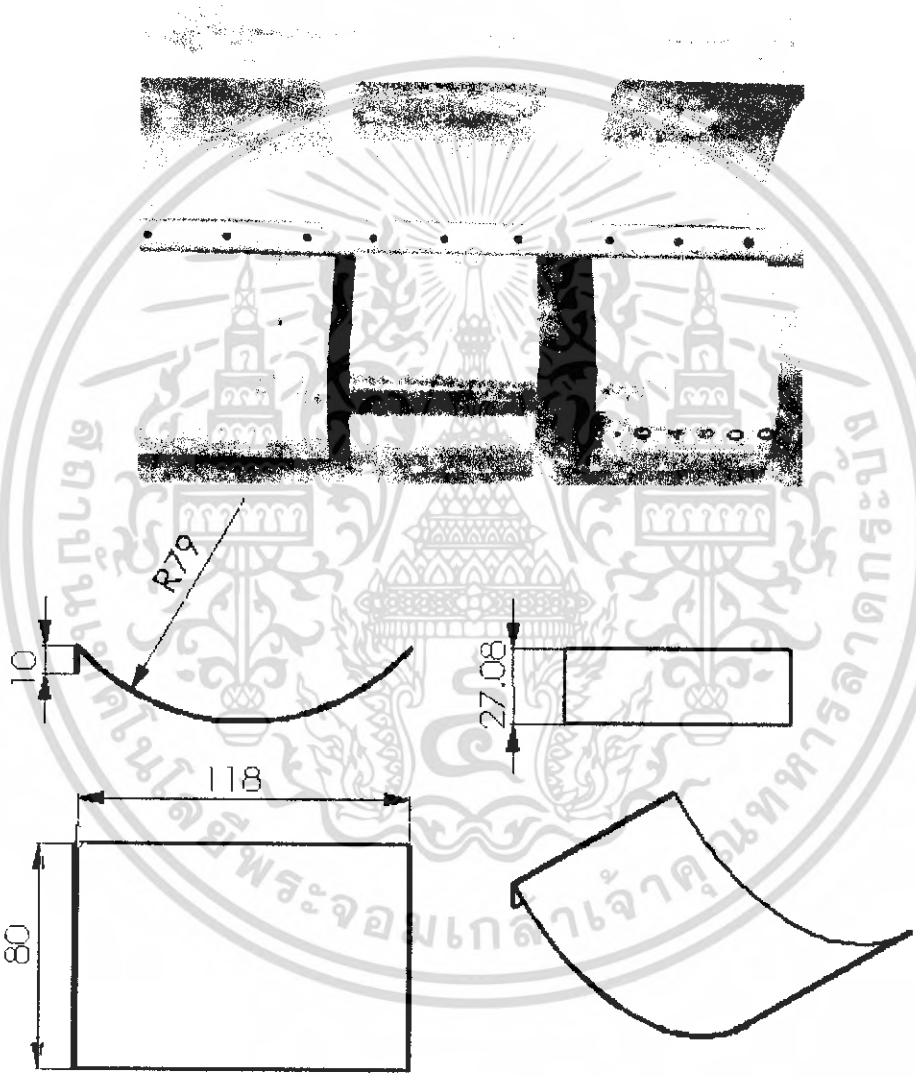
6.3.2 ใบกวนแบบแผ่นโค้ง

ได้ทดลองสร้างใบกวนแบบแผ่นโค้งขึ้นเพื่อทดลองว่าลักษณะใบกวนที่เป็นแผ่นโค้งจะสามารถวักน้ำให้สาดไปผนังถังเพื่อที่จะเป็นแผ่นฟิล์มที่ผนังถังได้ และสังเกตการตีน้ำเมื่อใช้ใบกวนที่มีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้าง ใช้แผ่นสังกะสีเป็นวัสดุในการทำ โดยจะตัดแผ่นสังกะสีให้ได้ขนาด(รูปที่ 5.2) และนำมาดัดเป็นแผ่นโค้ง โดยใช้เครื่องม้วนเหล็กแผ่น และใช้รีเวทเป็นเป็นตัวยึดติดกับแกนท่อ PVC

จากการทดลองใช้ มอเตอร์ขับใบกวน ที่ 5,10,50,100 รอบต่อนาที เติมน้ำลงไป 5 ลิตร ผลของลักษณะ การกวนที่ได้คือ จะมีลักษณะคล้ายกับใบกวนแบบแผ่นตรง คือตีน้ำให้เกิดการปั่นป่วน โดยที่ไม่มีลักษณะของฟิล์มแผ่นบางๆเกิดขึ้นแต่จะสามารถตีน้ำให้เป็นฟิล์มบางๆ โดยจะเป็นฟิล์มวิ่งอยู่ที่บริเวณขอบถัง



รูปที่ 6.2 ใบกวนแบบแผ่นโค้ง

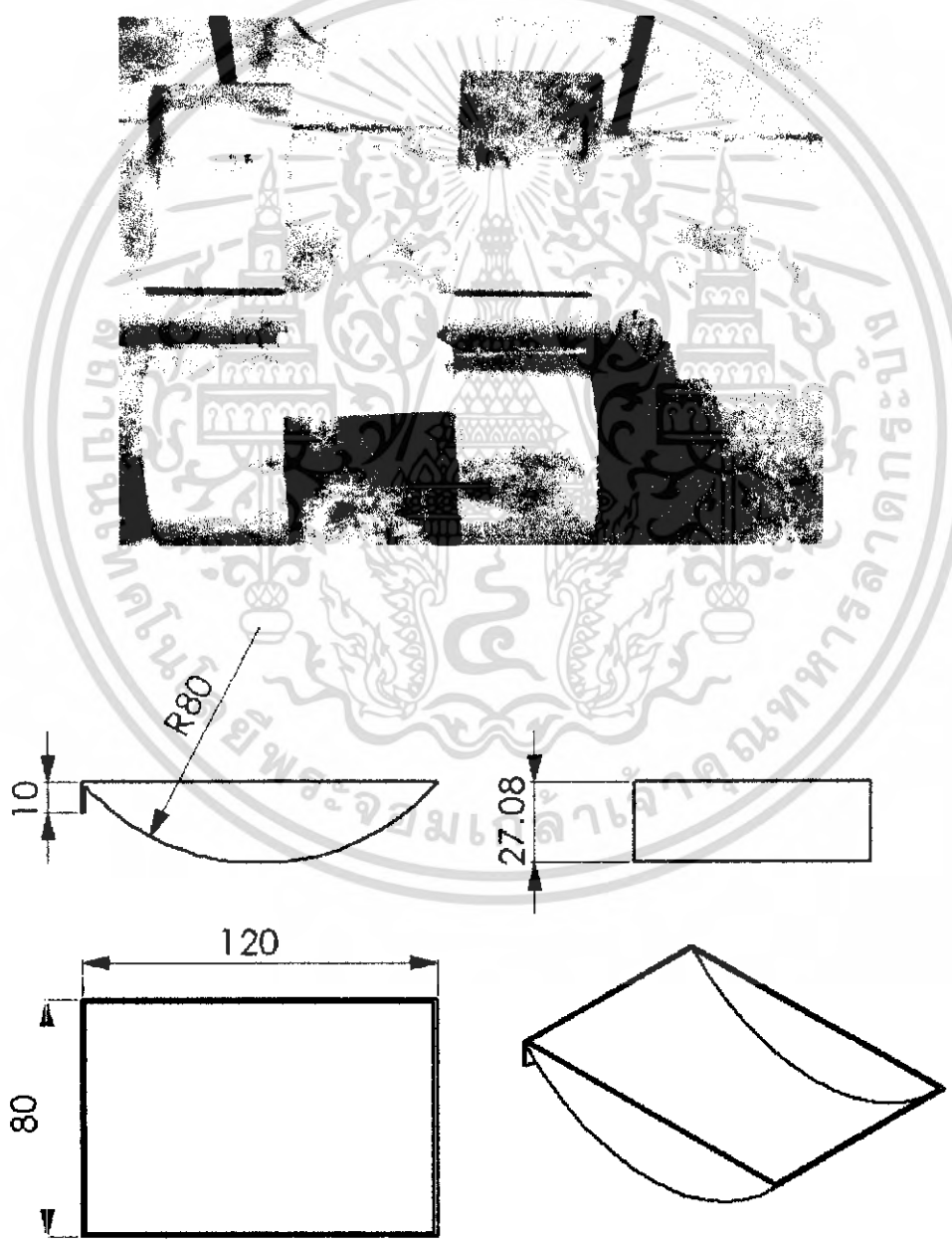
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.3 ใบกวนแบบกระบวย

เพื่อทดลองว่าลักษณะใบกวนที่เป็นกระบวยจะสามารถตีน้ำให้สาดไปผนังถังเพื่อที่จะเป็นแผ่นฟิล์มที่ผนังถังได้

การสร้าง ใช้แผ่นสังกะสีเป็นวัสดุในการทำ โดยจะทำตัดแผ่นสังกะสีส่วนโครงของกระบวยก่อนคือส่วนของผนังด้านข้าง จากนั้นจึงทำส่วนของตัวแผ่นโค้ง ประกอบเข้ากับส่วนโครงยึดติดกันโดยใช้การเชื่อมแบบจุดและใช้รีเวทเป็นเป็นตัวยึดติดกับแกนท่อ PVC (ดังรูปที่ 5.3)

จากการทดลองใช้ มอเตอร์ขับใบกวน ที่ 5,10,50,100 รอบต่อนาที เติมน้ำลงไป 5 ลิตร ผลของลักษณะ การกวนที่ได้คือ จะเป็นการตักขึ้นและเทลงเท่านั้น โดยที่ไม่มีลักษณะของฟิล์มแผ่นบางๆเกิดขึ้น



รูปที่ 6.3 ใบกวนแบบกระบวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

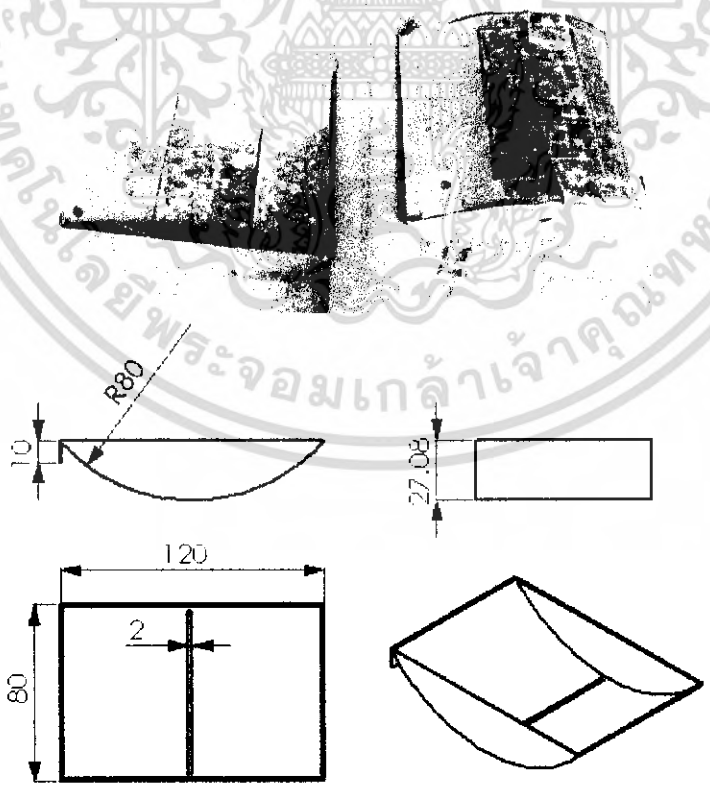
จากการทดลองออกแบบใบกวนทั้ง 3 แบบแรก ได้สังเกตลักษณะการทำงานของใบกวนทั้ง 3แบบ ได้ข้อสมมติฐานว่าใบกวนควรจะมีลักษณะเป็นแผ่นโค้งแต่จะต้องทำให้ไม่เกิดการปั่นป่วนในระบบที่มากเกินไป และในแบบกระบวยน่าจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นถ้านำมาพัฒนาต่อจึงนำแนวคิดที่ได้ไปทำการออกแบบใบกวนต่อ

6.3.4 ใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง

เนื่องจากการใช้ใบกวนแบบกระบวยสามารถตักน้ำได้จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์ตรงส่วนนี้ได้ จึงคิดใช้ลักษณะการไหลลงมาจากร่องของกระบวยให้มีลักษณะเป็นเป็นแผ่นบางๆจึงได้มีการทำร่องเพื่อให้น้ำไหลลงมาเป็นแผ่นฟิล์มได้

การสร้าง ใช้วิธีการทำแบบเดียวกันกับการทำใบกวนแบบกระบวย แต่ทำการเซาะร่องเป็นแนวยาวที่ส่วนของแผ่นโค้งและใช้รีเวทเป็นเป็นตัวยึดติดกับแกนท่อ PVC (ดังรูป 5.4)

จากการทดลองใช้ มอเตอร์ขับใบกวน ที่ 5, 10, 50, 100 รอบต่อนาที เติมน้ำลงไป 5 ลิตร ผลของลักษณะ การกวนที่ได้คือ มีลักษณะการตักขึ้นและน้ำจะไหลผ่านร่องลงมาเป็นลักษณะเป็นม่านของน้ำลงมา โดยที่ยังเหลือน้ำบางส่วนถูกเทลงด้านล่าง ซึ่งสังเกตได้ว่ามีการเกิด เป็นฟิล์มแผ่นบางๆเกิดขึ้น ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ส่วนที่ความเร็วรอบสูง 100 รอบต่อนาทีจะมีลักษณะตักวิดน้ำและวิดสาดทั่วถังชุดทดลอง



รูปที่ 6.4 ใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองใบกวนทั้ง 4 แบบ สรุปได้ว่าใบกวนแบบกระบวยเซาะร่องมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเพิ่มพื้นที่ส่วนโค้งให้มากขึ้นเพื่อจะได้ตักน้ำได้มากและเพิ่มจำนวนร่องเพื่อเกิดเป็นฟิล์มบางมากที่สุด

6.4 การหาขนาดของถังสุญญากาศ

ในการหาขนาดของถัง เนื่องจากถังอยู่ในลักษณะเป็นทรงกระบอกวางตามแนวราบ โดยจะพิจารณาจากปริมาตรของน้ำกะทิ 5 ลิตร เมื่อบรรจุเข้าไปในถังแล้วมีความสูงจากผนังของถังเท่าใดแล้วจึงกำหนดขนาดของถังให้สัมพันธ์กับขนาดของใบกวน

การหาความสูงจากผนังของน้ำกะทิ โดย สมมติ ใช้ถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 28 cm (r = 14 cm) และมีความยาว (l) 28 cm

รัศมี (r) = 14 cm

ปริมาตร (V) = พื้นที่ (A) * ความยาว (l)

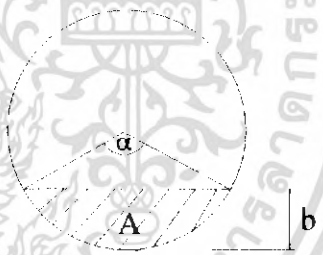
ต้องการ V = 5 ลิตร = 5000 cm^3

หา A จาก

$$A = \frac{V}{l}$$

$$A = \frac{5000}{28}$$

$$A = 178.57 cm^2$$



จากสูตร (ในหัวข้อ 4.3)

$$A = r^2 * A_1$$

$$A_1 = \frac{A}{r^2}$$

$$A_1 = \frac{178.57}{14^2} = 0.911$$

ใช้การประมาณค่าเพื่อหาค่ามุม α จากตาราง(ภาคผนวก ข.) $\alpha = 140.69^\circ$

จากสูตร (ในหัวข้อ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = r(1-\cos\frac{\alpha}{2})$$

$$b = 14(1-\cos\frac{140.69}{2})$$

$$b = 14(0.6636)$$

$$b = 9.29cm$$

ความสูงของน้ำกะทิขึ้นมาจากผนังถัง เท่ากับ 9.29 cm พบว่ามีความสอดคล้องกับขนาดของใบกวนจึงเลือกขนาดของถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 28 cm และมีความลึกเท่ากับ 28 cm

6.5 การหาความหนาของผนังถังสุญญากาศ

วัสดุที่ใช้ทำถังสุญญากาศต้องเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษกับอาหาร ในโครงงานนี้ได้ใช้วัสดุ Stainless Steel AISI Grade 304 ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทั่วไป [9]

พิจารณา ภาชนะความดันผนังบาง เมื่อเกิดความเสียหายจะเกิดความเสียหายตามแนวยาว (Longitudinal) ก่อน สังเกตได้จาก $\sigma_{tC} = 2\sigma_{tL}$ จะพบว่าความเค้นตามแนวแกนนอนของภาชนะความดัน จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (หัวข้อ 4.2)

จากสูตร4.5 $\sigma_{tL} = \frac{Pr_i}{2t}$

ค่า Yield Strength (σ_y)ของ Stainless Steel AISI Grade 304 มีค่าเท่ากับ 205 MPa [9] หรือเท่ากับ 205 N/mm^2 กำหนดค่าความปลอดภัย (N) เท่ากับ 5

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

ความดัน (P) คือผลต่างของความดันภายใน และภายนอกถัง ซึ่งความดันภายในถังสุญญากาศมีค่าเป็นศูนย์ ความดันภายนอกประมาณค่าให้เท่ากับ 1 bar หรือเท่ากับ 0.1 N/mm^2

รัศมีของถัง (r_i) มีค่าเท่ากับ 14 cm

ความหนาของถัง (t) หาจาก

$$t = \frac{Pr_i}{2(\sigma_{tL})}$$

$$t = \frac{(0.1)(140)}{2(41)}$$

$$t = 0.17mm$$

ความหนาที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.17 mm แต่ในการเลือกซื้อต้องคำนึงถึงความหนาที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาขับใบกวนและขนาดมอเตอร์

เนื่องจากเพลาที่ใช้ขับใบกวนเกิดแรงบิดเพียงอย่างเดียว จึงใช้ทฤษฎีของการบิดเข้ามาคำนวณขนาดของเพลา เริ่มจากกำหนดขนาดของมอเตอร์ เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1/4 HP ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ให้กำลังขับ(Wp) เท่ากับ 186.5 Nm/s ซึ่งเพียงพอในการขับใบกวน ค่าความเร็วรอบสูงสุดจากการทดลองที่ใช้ขับใบกวนเท่ากับ 100 รอบต่อนาที

ขนาดของเพลาหาได้จาก (4.1)

$$\tau_d = \frac{Tr}{J}$$

$$\tau_d = \frac{\tau_y}{N} \quad ; \quad \tau_y = 0.6\sigma_y$$

ค่า Yield Strength (σ_y) ของ Stainless Steel AISI Grade 304 มีค่าเท่ากับ 205 MPa [9] หรือเท่ากับ 205 N/mm^2

กำหนดค่าความปลอดภัย (N) เท่ากับ 5

$$\tau_y = 0.6(205) = 123 \qquad \text{N/mm}^2$$

$$\therefore \quad \tau_d = \frac{123}{5} = 24.6 \qquad \text{N/mm}^2$$

จากสูตร $P = \frac{2n\pi T}{60}$ $\quad \therefore \quad T = \frac{60(P)}{2n\pi}$

$$J = \frac{\pi}{32}d^4 \quad ; \quad r = \frac{d}{2}$$

แทนค่าในสมการ 4.1

$$\tau_d = \frac{T(d/2)}{(\pi/32)\cdot d^4} = \frac{32T(d/2)}{\pi d^4} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$= \frac{16(\frac{60(P)}{2n\pi})}{\pi d^3}$$

P = 186.5 Nm/s = 186500 Nmm/s

$$d^3 = \frac{16(\frac{60\times 186500}{2\times 100\times \pi})}{\pi \times 24.6}$$

$$= \frac{16(17809.43)}{77.28}$$

$$= 3687.103 \qquad \text{mm}^3$$

$$d = 15.44 \qquad \text{mm} \quad \therefore \text{ เลือกใช้เพลาขนาด 16 mm ในการขับใบกวน}$$

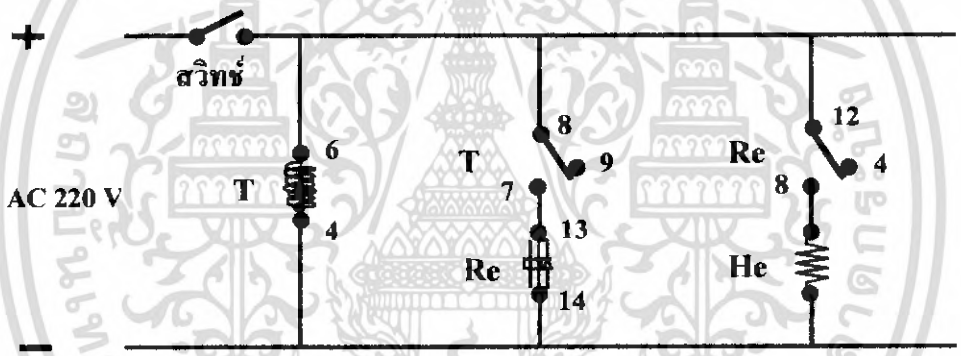
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 ระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำกะทิในถังกวน

เมื่อลดความดันภายในถังลงน้ำกะทิจะสามารถเกิดการเดือดได้ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C ในระหว่างการเดือด น้ำกะทิจะมีอุณหภูมิลดต่ำลง เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปในการเปลี่ยนสภานะ[10] ทำให้น้ำกะทิเย็นตัวลงจนไม่เกิดการเดือด จึงจำเป็นต้องมีการให้พลังงานแก่น้ำกะทิ โดยให้พลังงานในรูปแบบความร้อน จึงจำเป็นต้องมีการติด อุปกรณ์ให้ความร้อนเข้าไปที่ถังกวน

สำหรับตัวถังของเครื่องนั้นได้นำฮีตเตอร์มาใช้ในการให้ความร้อนแก่ระบบ และเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนแก่ระบบ จึงได้นำเทอร์โมสตัส มาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิโดยจะใช้เทอร์โมคับเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำกะทิ

เนื่องจากฮีตเตอร์มีขนาดกำลังไฟ 1000 วัตต์ ซึ่งเกินกว่าที่เทอร์โมสตัสจะจ่ายให้ได้ จำเป็นต้องนำตัว รีเลย์ มาใช้ในการจ่ายไฟให้กับฮีตเตอร์ ในการทำงานของตัวรีเลย์ถูกควบคุมด้วยเทอร์โมสตัส ซึ่งมีวงจรควบคุมการทำงานดังรูป



รูปที่ 6.5 วงจรวงจรควบคุมการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

T คือ เทอร์โมสตัส

Re คือ รีเลย์

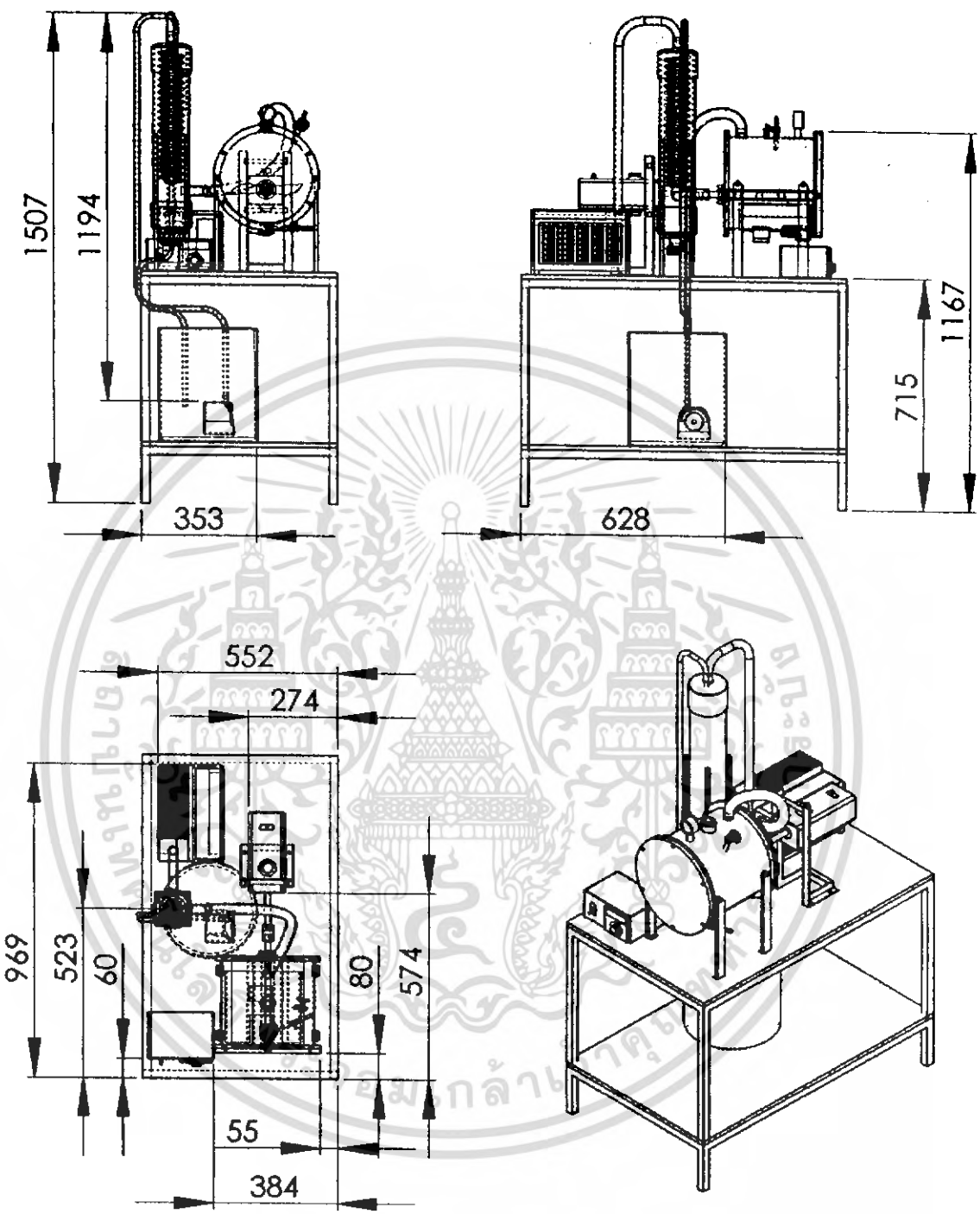
He คือ ฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.8 แบบของเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

จากการสร้างแบบจำลองใบกวน การคำนวณและการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ได้มีการเขียนแบบของเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ดังรูปที่ 6.6 – 6.12 เพื่อใช้ในการสร้างเครื่องที่สามารถใช้งานได้จริง

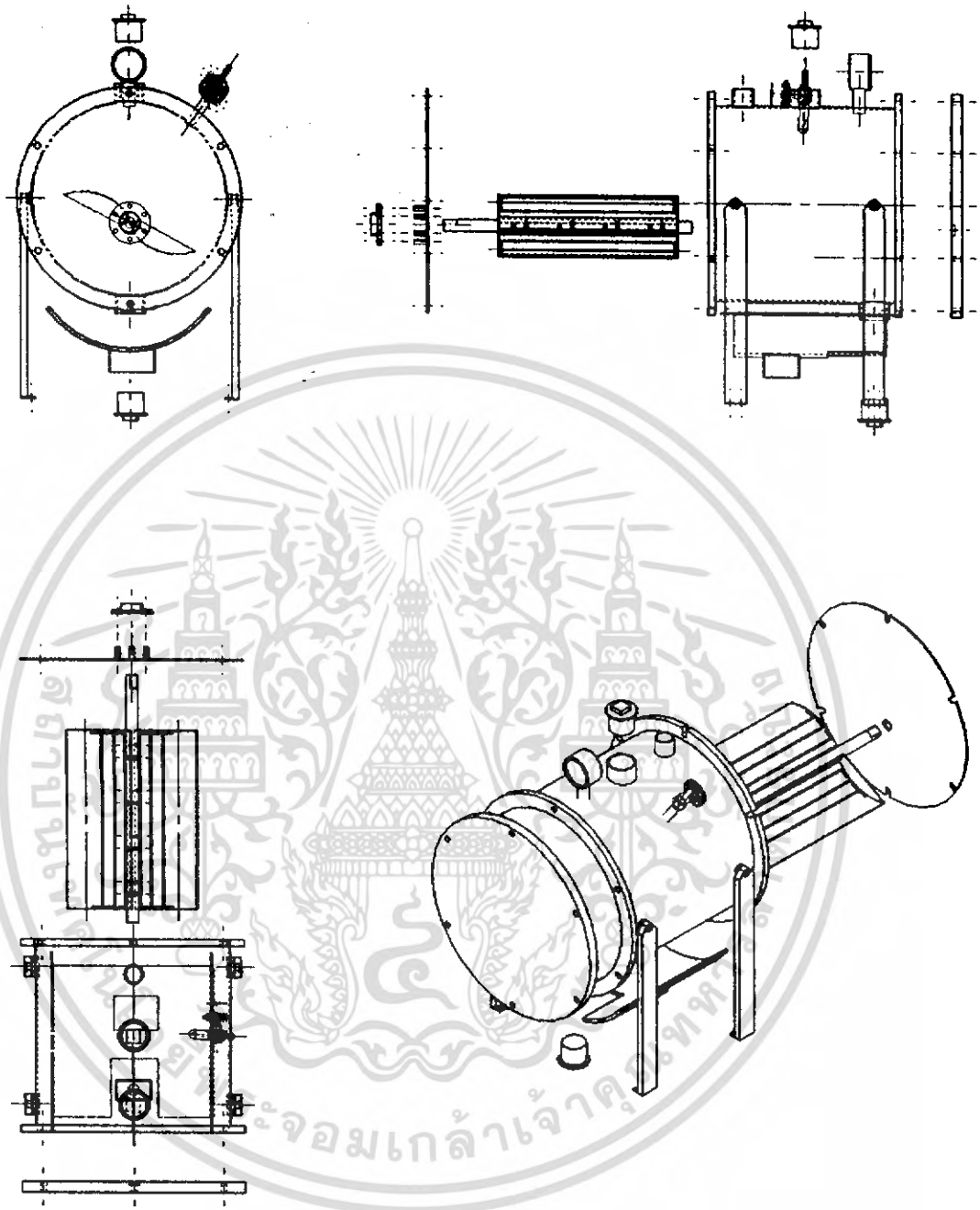
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แบบเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale:1:20	
	Date:2/21/2006	

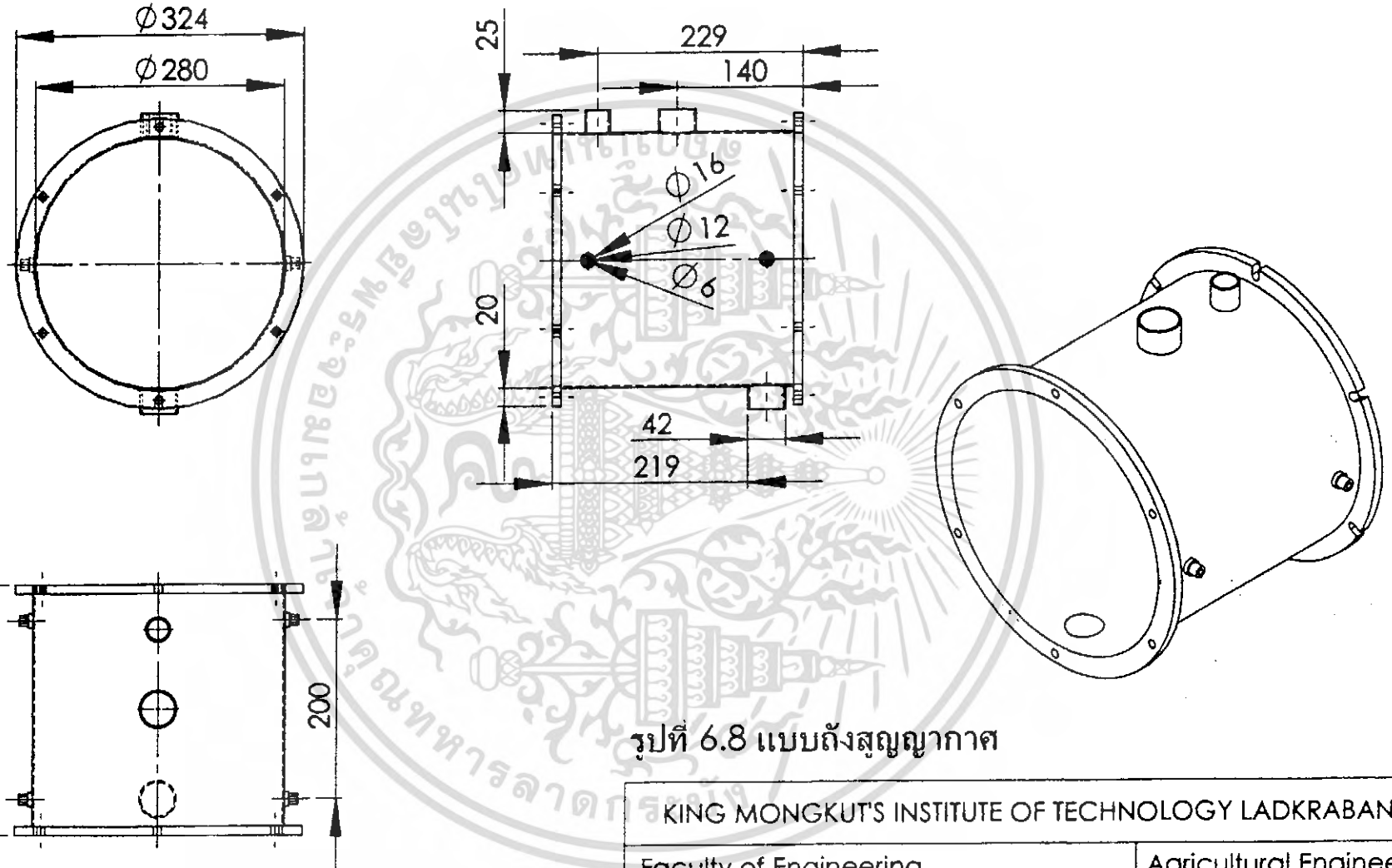
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แบบส่วนประกอบชุดถังสูญญากาศ

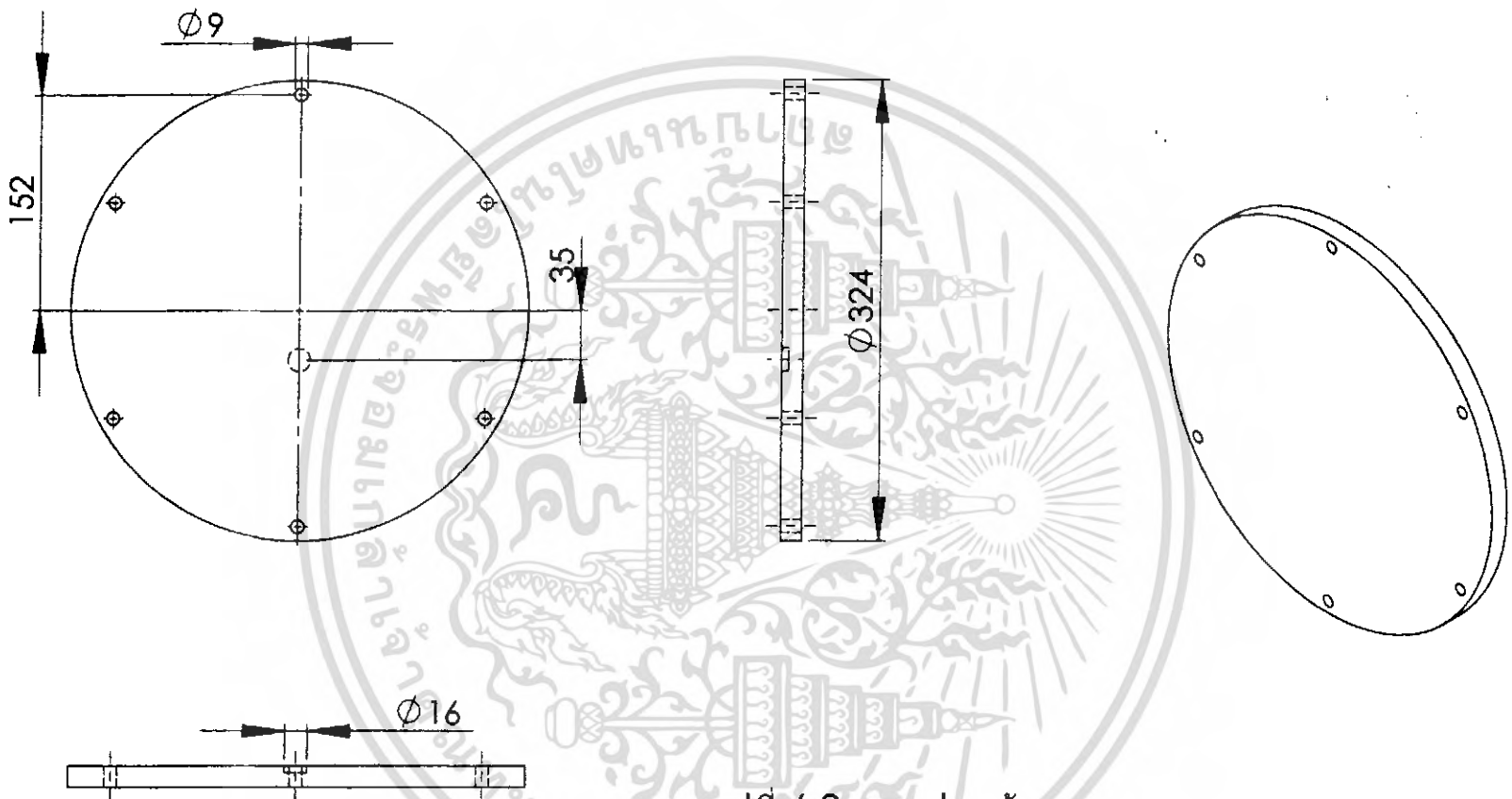
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบส่วนประกอบชุดถังสูญญากาศ		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale:1:1	
	Date:2/21/2006	

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



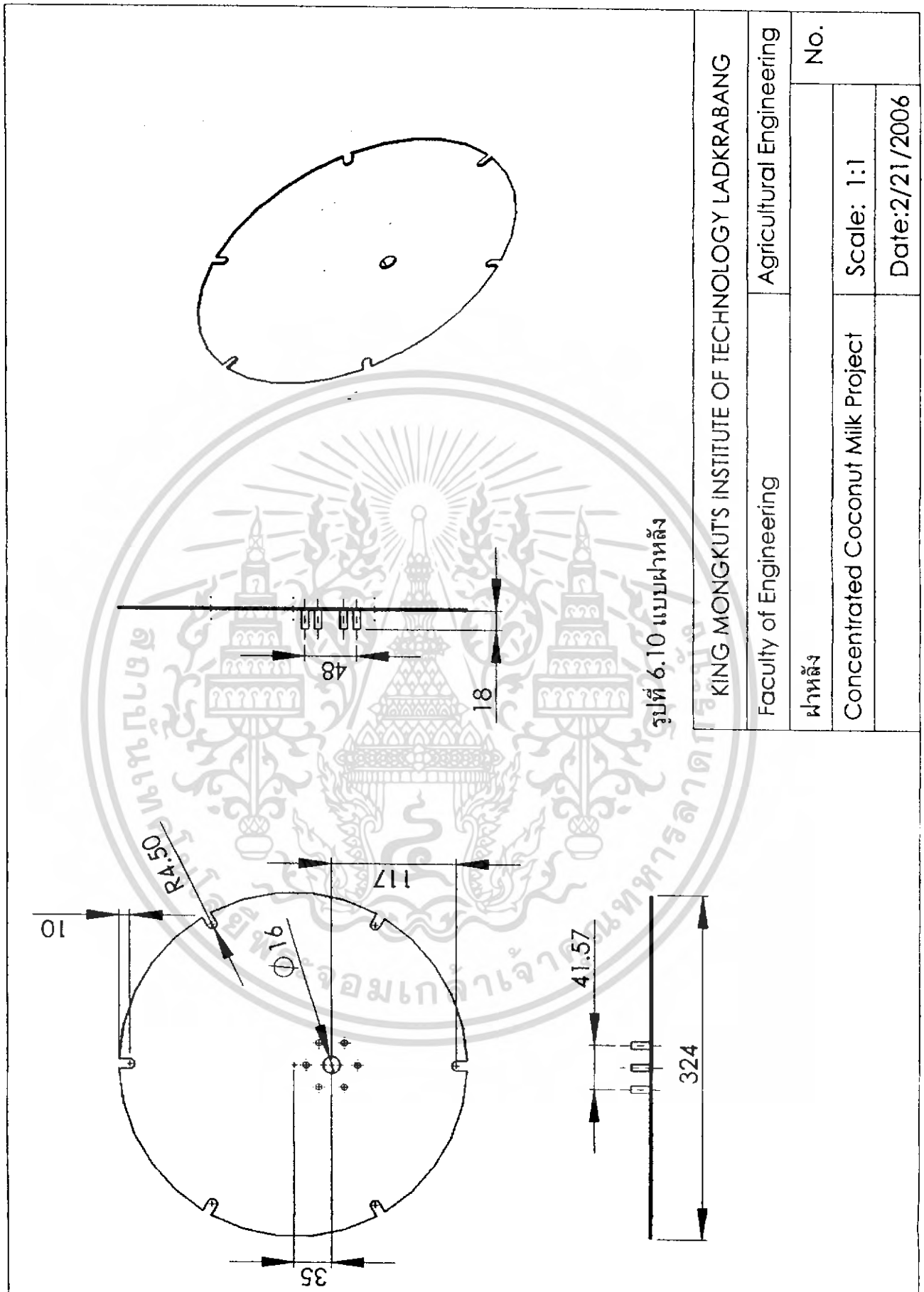
รูปที่ 6.8 แบบถังสุญญากาศ

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบถังสุญญากาศ		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:1	
	Date:2/21/2006	

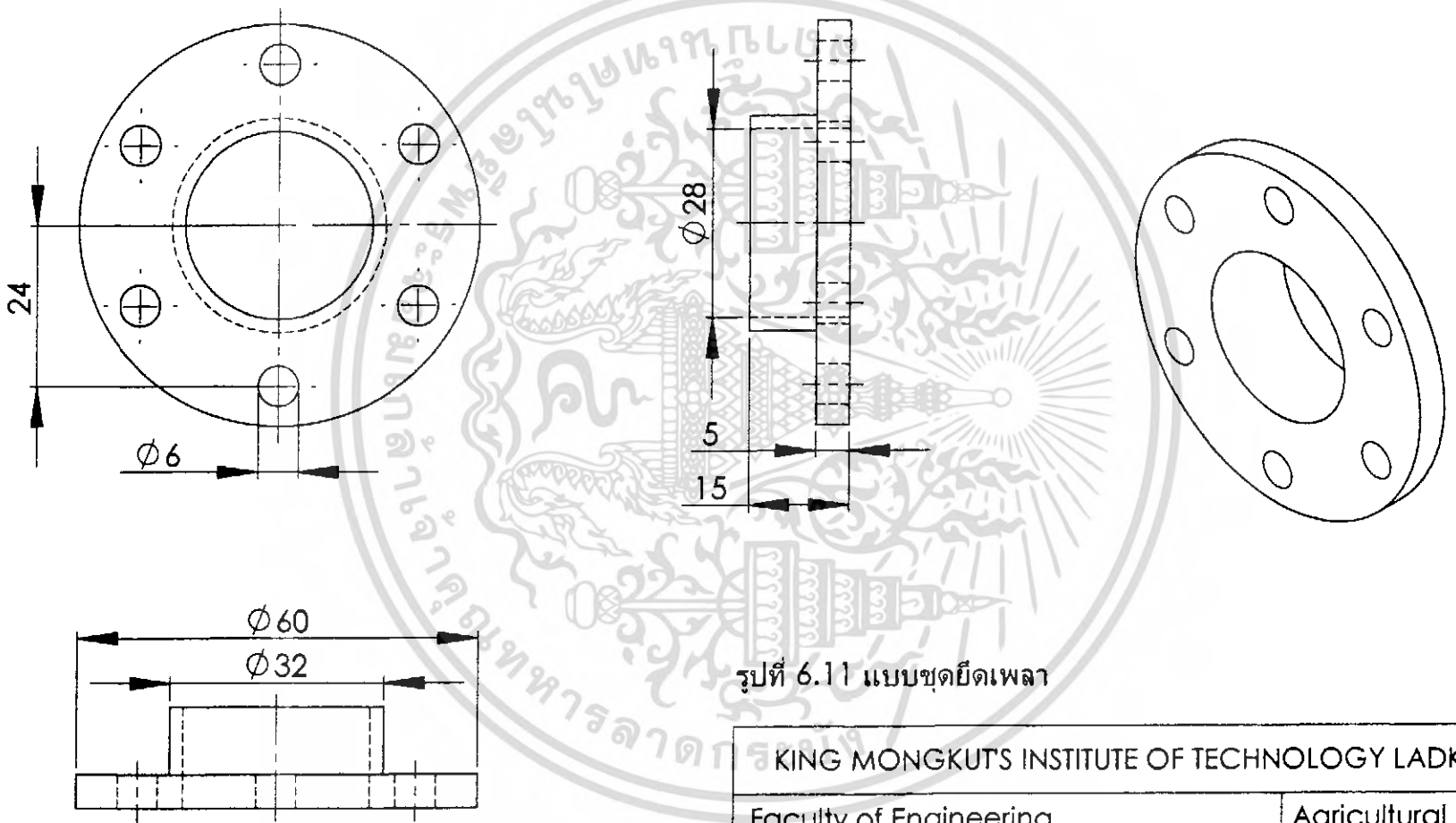


รูปที่ 6.9 แบบฝาหน้า

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบฝาหน้า		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:5	
	Date:2/21/2006	

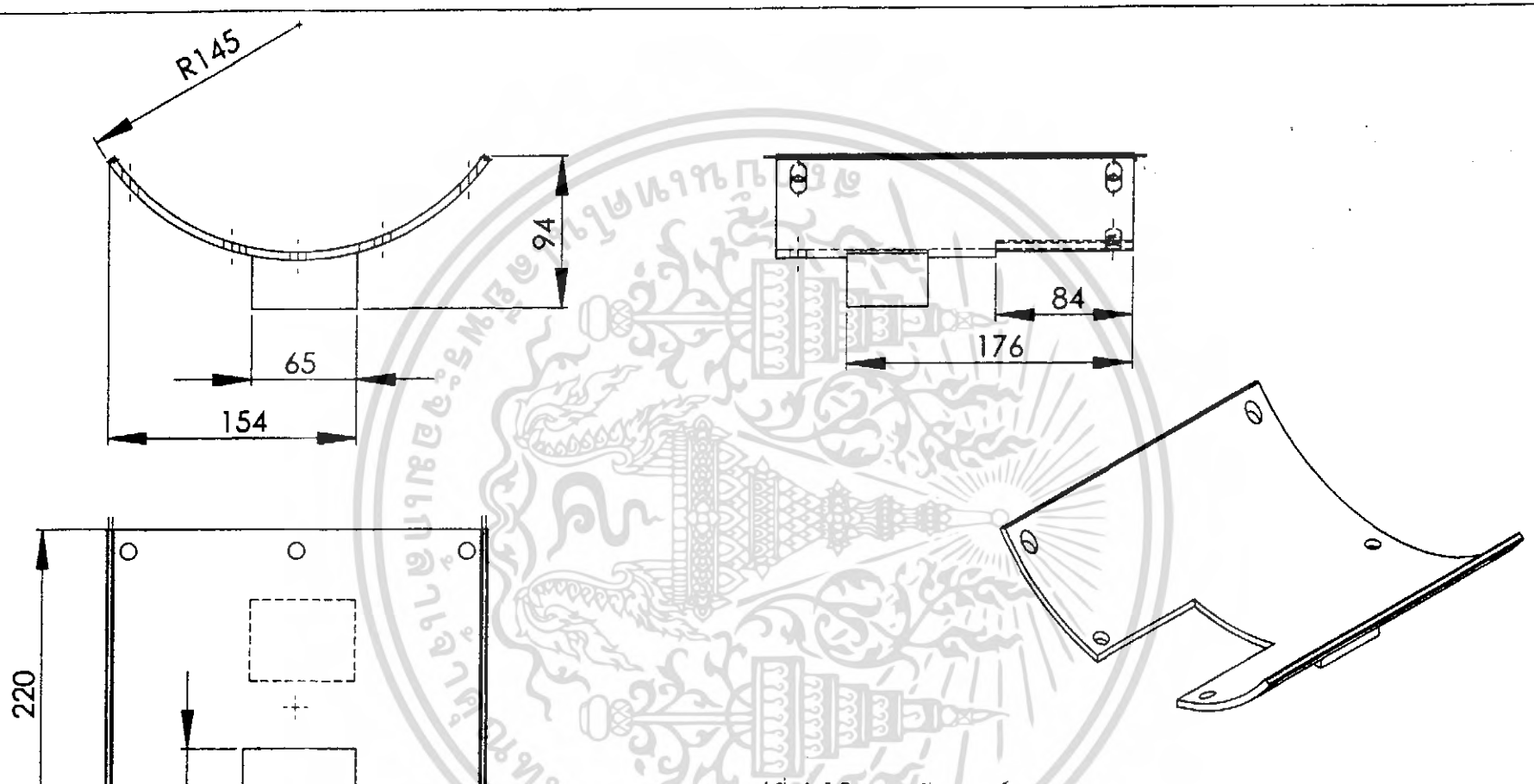


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



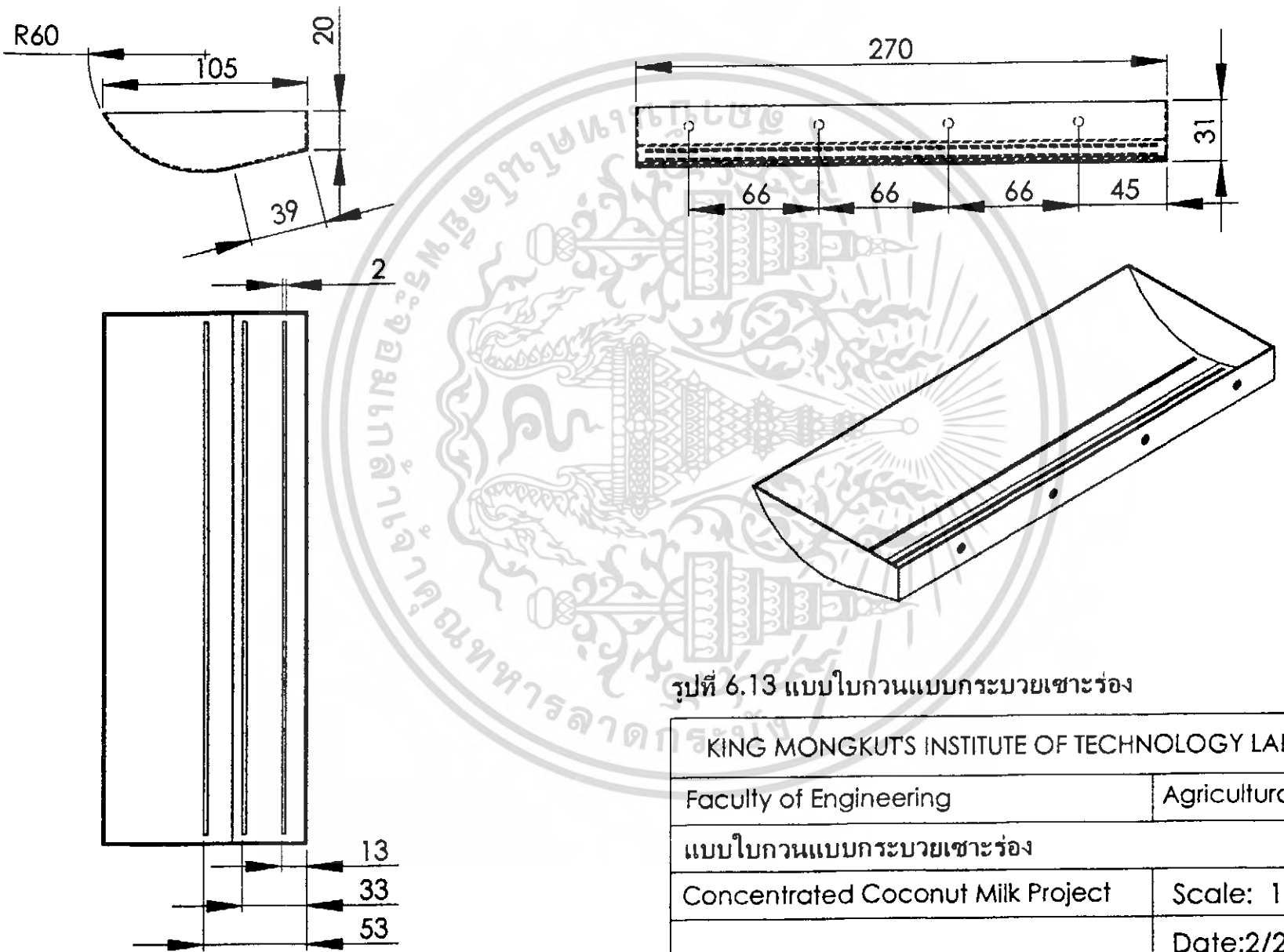
รูปที่ 6.11 แบบชุดยึดเพลา

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบชุดยึดเพลา		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:1	
	Date:2/21/2006	



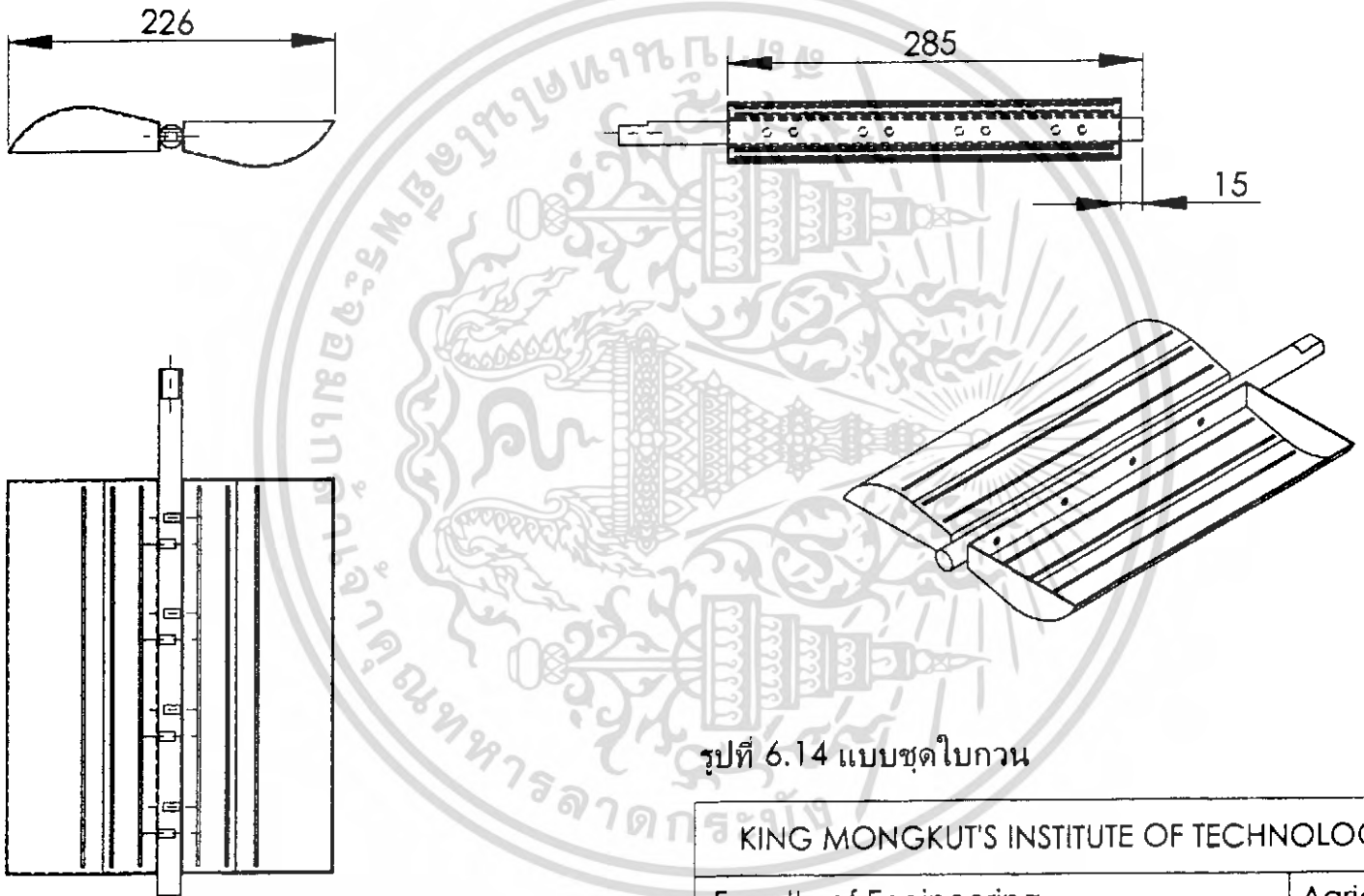
รูปที่ 6.12 แบบฮีตเตอร์

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบฮีตเตอร์		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:1	
	Date:2/21/2006	



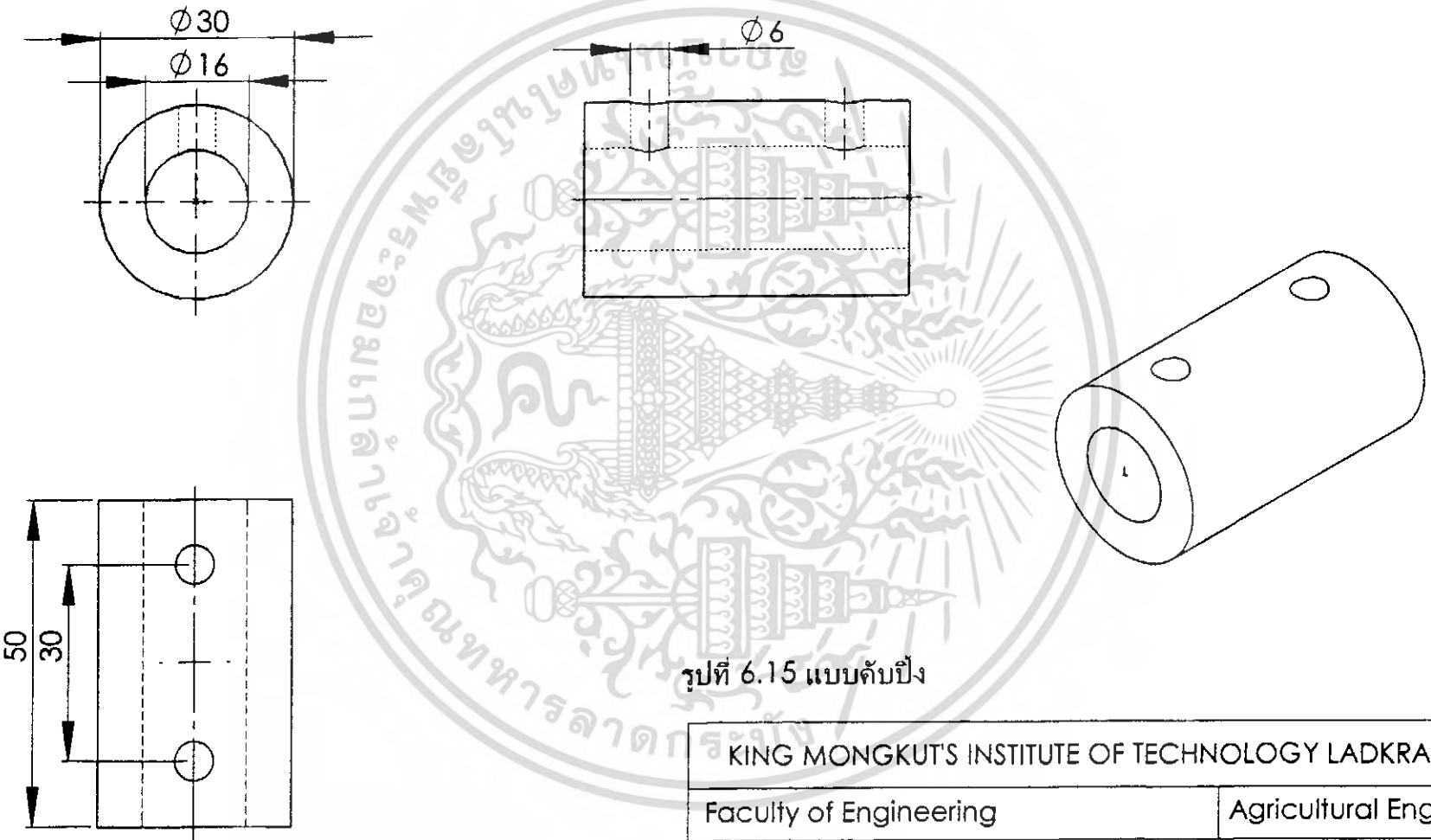
รูปที่ 6.13 แบบใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบใบกวนแบบกระบวยเซาะร่อง		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:1	
	Date:2/21/2006	



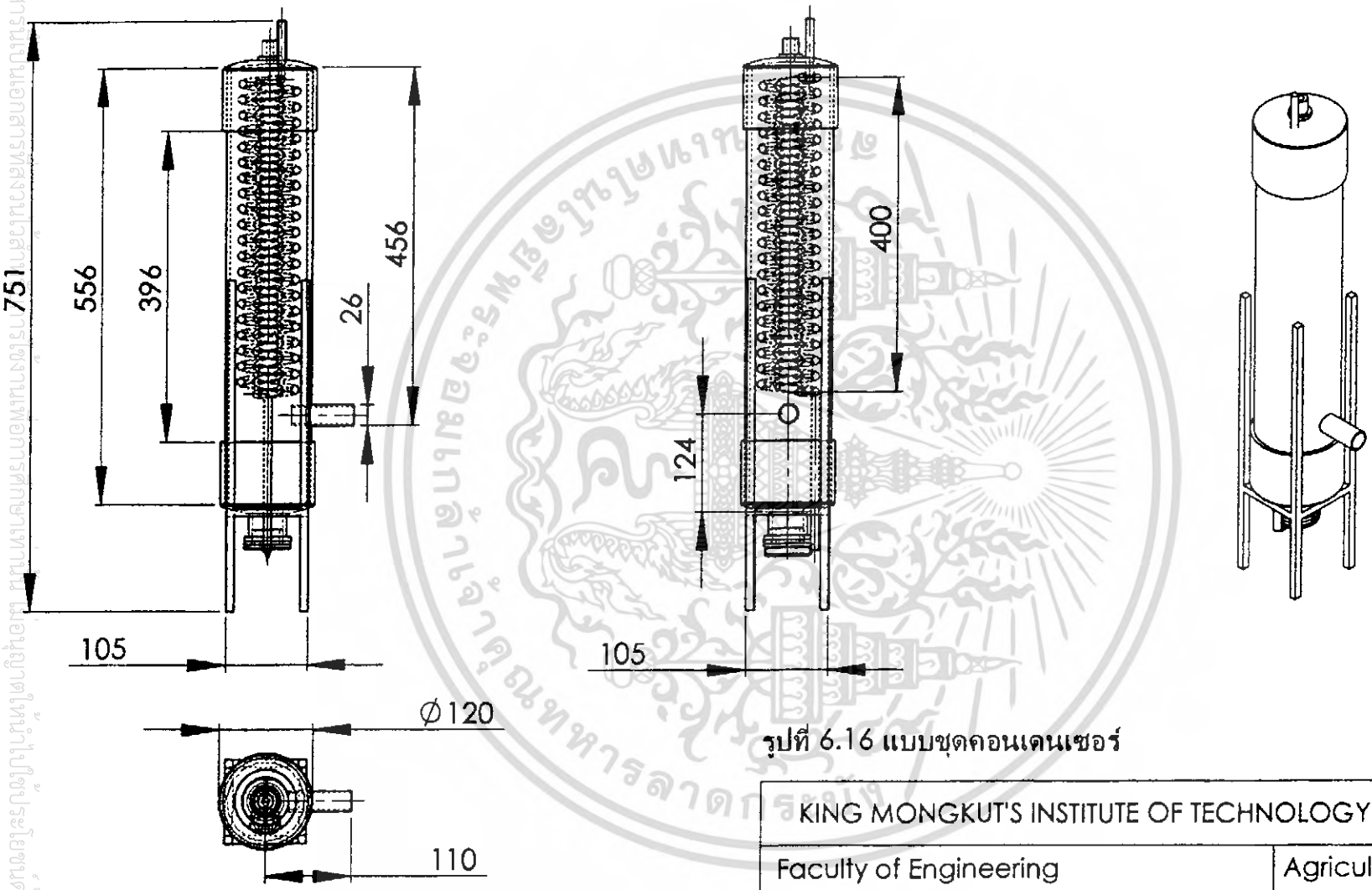
รูปที่ 6.14 แบบชุดใบกวน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบชุดใบกวน		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale:1:1	
	Date:2/21/2006	



รูปที่ 6.15 แบบดับปิ๋ง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบดับปิ๋ง		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 2:1	
	Date:2/21/2006	



รูปที่ 6.16 แบบชุดคอนเดนเซอร์

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG		
Faculty of Engineering	Agricultural Engineering	
แบบชุดคอนเดนเซอร์		No.
Concentrated Coconut Milk Project	Scale: 1:1	
	Date:2/21/2006	

บทที่ 7

วิธีการทดลอง การคำนวณและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

7.1 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำระเหยน้ำกะทิ

7.1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่เครื่องสามารถทำได้ ในการทำระเหยน้ำกะทิ โดยใช้คุณ สมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิหลังการทดลองเป็นตัวชี้วัด โดยจะใช้วิธีการหาคุณสมบัติทางกายภาพ 4 วิธี คือ

(1) การวัดค่า สี โดยใช้เครื่อง COLORMETER

(2) การวัดค่า viscosity โดยใช้เครื่อง VISCOMETER

(3) การวัดค่า total soluble solids โดยใช้เครื่อง REFRACTOMETER

(4) วัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันของน้ำกะทิโดยวิธี Gerber Method

7.1.2 วัสดุ และอุปกรณ์

(1) บีกเกอร์ ขนาด 2000 ml 2 ใบ ขนาด 1000 ml 1 ใบ

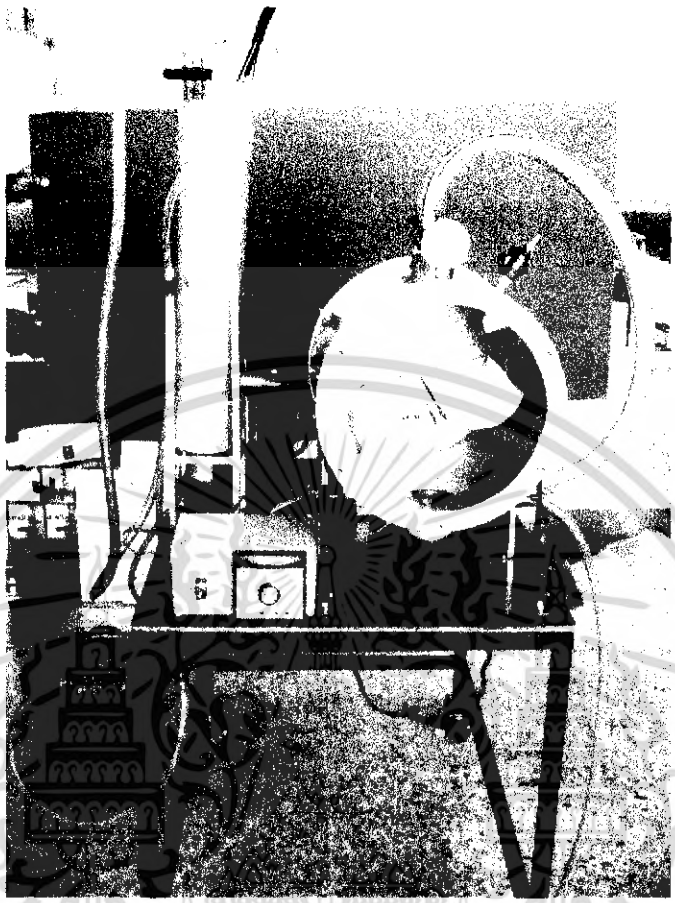
(2) เทอร์โมมิเตอร์

(3) น้ำกะทิ (หัวกะทิ) 5 ลิตรต่อครั้ง

รูปที่ 7.1 น้ำกะทิ (หัวกะทิ) ปริมาตร 5 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ(รูปที่ 7.2)



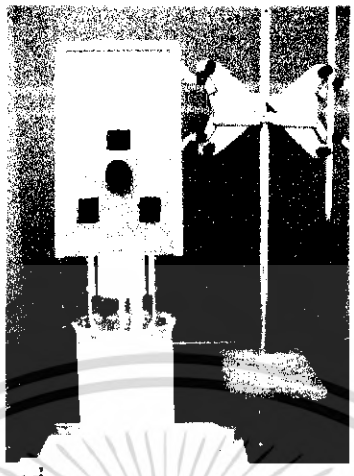
รูปที่ 7.2 เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

(5) เครื่องวัดค่าสี Color meter รุ่น Miniscan XE Plus 45/0 LAV (Reston, USA.) (รูปที่7.3)

รูปที่ 7.3 เครื่อง Color meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) เครื่องวัดค่าความหนืด เครื่อง Rotational Viscometer รุ่น LVDV-E (Brookfield, USA.), Spindle No. s61, s62 พร้อม บีกเกอร์ทรงเตี้ยขนาด 600 ml 3 ใบ (รูปที่ 7.4)

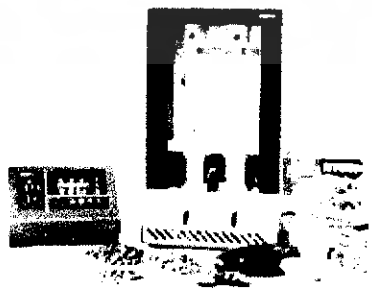


รูปที่ 7.4 Rotational Viscometer

(7) เครื่องวัดค่า total soluble solids เครื่อง Pocket Refractometer รุ่น PAL-1 (Atago, Japan) (รูปที่ 7.5)

รูปที่ 7.5 Refractometer

(8) เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมัน โดยวิธี Gerber method (รูปที่ 7.6)



รูปที่ 7.6 เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.3 วิธีการทดลอง

- เริ่มทำการทดลองที่สภาวะที่ 1 ความดัน 80 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 40-42 องศาเซลเซียส

(1) เตรียมตัวอย่างน้ำกะทิ (หัวกะทิ) มากกว่า 5 ลิตร สำหรับการทดลอง

(2) ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิเริ่มต้น โดยทำ 3 ซ้ำ

- วัดค่าสีของน้ำกะทิโดยเครื่อง Color meter
- วัดค่าความหนืดของน้ำกะทิโดยเครื่อง Rotational Viscometer
- วัดค่า total soluble solids ของน้ำกะทิโดยเครื่อง Refractometer
- วัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันของน้ำกะทิโดยวิธี Gerber Method

(3) เทน้ำกะทิลงในเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ จำนวน 5 ลิตร

(4) ให้ความร้อนแก่น้ำกะทิโดย Heater พร้อมกับเริ่มหมุนใบกวนที่ความเร็วรอบ 10 รอบ/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกะทิสูงขึ้นจนถึง 40 องศาเซลเซียส

(5) เริ่มทำการดูดอากาศออกเพื่อลดความดันในถังลงจนความดันภายในถังอยู่ที่ 80 มิลลิเมตร-ปรอท

(6) เริ่มจับเวลา โดยจะแบ่งน้ำกะทิออกมาจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ยกเว้นความหนืด ทุกๆ 30 นาที จนครบ 120นาที หรือ 2 ชั่วโมง

(7) บันทึกค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิ

- การทดลองที่สภาวะที่ 2 ความดัน 50 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส

(1) ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ของ Condition ข้างต้น

(2) ให้ความร้อนแก่น้ำกะทิโดย Heater พร้อมกับเริ่มหมุนใบกวนที่ความเร็วรอบ 10 รอบ/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกะทิสูงขึ้นจนถึง 30 องศาเซลเซียส

(3) เริ่มทำการดูดอากาศออกเพื่อลดความดันในถังลงจนความดันภายในถังอยู่ที่ 50 มิลลิเมตรปรอท

(4) เริ่มจับเวลา โดยจะแบ่งน้ำกะทิออกมาจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อวัดคุณสมบัติทางกายภาพครั้งแรกที่ 30 นาที จากนั้นจึงแบ่งน้ำกะทิออกมาวัดคุณสมบัติทางกายภาพทุก 15 นาทีจนครบ 120 นาที หรือ 2 ชั่วโมง

(5) บันทึกค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิเพื่อเป็นข้อมูล

- การทดลองที่สภาวะที่ 3 ความดัน 40 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียส

(1) ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ของ Condition ข้างต้น

(2) ให้ความร้อนแก่น้ำกะทิโดย Heater พร้อมกับเริ่มหมุนใบกวนที่ความเร็วรอบ 10 รอบ/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกะทิสูงขึ้นจนถึง 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) เริ่มทำการดูดอากาศออกจากถังน้ำกะทิจนความดันภายในถังอยู่ที่ 40 มิลลิเมตรปรอท ขณะน้ำกะทิเดือด อุณหภูมิต่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 20-25 องศาเซลเซียส

(4) เริ่มจับเวลา โดยจะแบ่งน้ำกะทิออกมาจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อวัดคุณสมบัติทางกายภาพครั้งแรกที่ 30 นาที จากนั้นจับเวลาทุก 15 นาทีจนครบ 120นาที หรือ 2 ชั่วโมง

(5) บันทึกค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิเพื่อเป็นข้อมูล

จากขั้นตอนการทดลองทั้ง 3 ครั้งจะเห็นได้ว่า ในครั้งที่ 2 และ 3 มีการนำตัวอย่างน้ำกะทิออกมาวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ทุก ๆ 15 นาที ซึ่งต่างจากการทดลองที่ 1 ที่มีการนำน้ำกะทิออกมาวัดค่าทุก ๆ 30 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจาก ต้องการที่จะได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องมากขึ้นนั้นเอง

ในการทดลองสภาวะที่ 3 เนื่องจากอุณหภูมิขณะที่น้ำกะทิเกิดการเดือดลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้กะทิเกิดการจับตัวเป็นไข จึงต้องให้อุณหภูมิน้ำกะทิเริ่มต้นขึ้นไปถึง 30 องศาเซลเซียส ก่อนแล้วจึงค่อยทำการลดความดันในถังลง

7.1.4 วิธีการวัดคุณสมบัติทางกายภาพ

- การใช้เครื่องวัดค่าสี เครื่อง Color meter รุ่น Miniscan XE Plus 45/0 LAV (Reston, USA.)

(1) ติดตั้ง software สำหรับการแสดงค่าสี ที่ Computer เพื่อใช้ในการอ่านค่าสีที่ส่งมาจากตัวเครื่อง Color meter

(2) ทำการ Standardize เครื่อง คือ การกำหนดค่าเริ่มต้น เพื่อ Set ค่าต่ำสุดและสูงสุดเพื่อการทำงานที่ถูกต้องและแม่นยำ (การ Calibrate) โดย วางแผ่นดำ (แผ่นสีมาตรฐานที่มากับตัวเครื่อง) บนช่องที่ใช้วัด แล้ววัดค่า จากนั้นวางแผ่นขาวแล้วทำการวัดเช่นกัน เครื่องจะทำการเก็บข้อมูลไว้เป็นมาตรฐานเอง

(3) นำวงยางสีดำใส่ลงในถ้วยแก้ว โดยดันลงไปให้สนิทกับพื้นด้านล่างของถ้วย

(4) เทน้ำกะทิลงไปในถ้วยแก้วโดยให้พอดีกับขอบด้านบนของยางสีดำ

(5) วางแผ่นก้านเซรามิคสีขาวลงบนขอบยางสีดำให้สนิท โดยสังเกตดูว่าไม่ให้เกิดฟองอากาศที่ด้านล่าง

(6) นำถ้วยแก้วไปวางบนช่องที่ใช้วัด จากนั้นนำฝาครอบสีดำวางครอบถ้วยแก้วให้สนิท

(7) ทำการวัดค่าสีของน้ำกะทิ จากนั้นบันทึกค่าสีที่ได้ โดยจะทำการวัดค่า 3 ซ้ำต่อครั้ง

- เครื่องวัดค่าความหนืด เครื่อง Rotational Viscometer รุ่น LVDV-E (Brookfield,USA.)

(1) ติดตั้งเครื่อง Viscometer ให้ได้ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) แบ่งน้ำกะทิเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 500 ml. บรรจุในบีกเกอร์ทรงเตี้ยขนาด 600 ml

(3) ติดตั้ง Guardleg และ ติดตั้ง Spindle โดยเลือกจาก s61 - s64 เข้ากับเครื่อง แล้วจุ่ม Spindle ลงในน้ำกะทิที่จะทำการวัดค่า

(4) ปรับค่าของ Spindle ให้ตรงกับ Spindle ที่เลือกติดตั้ง และปรับค่าความเร็วรอบของ Spindle ตามความต้องการ คือ 20, 30, 50, 60, 100 รอบต่อนาที

(5) ต้องกำหนดอุณหภูมิของน้ำกะทิก่อนที่จะทำการวัดมีค่า 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ก่อนทำการวัดทุกครั้ง

(6) เปิดให้ Motor On สังเกตค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของเครื่อง จะต้องอยู่ในช่วง 10-100% torque เท่านั้น ถ้าไม่ได้ให้เปลี่ยน Spindle แล้วทดลองอีกครั้ง

(7) วัดค่า Viscosity โดยการวัดค่าแต่ละครั้งจะต้องรอจนครบ 1 นาที แล้วค่อยบันทึกค่า 5 ค่าที่ปรากฏบนเครื่องติดต่อกัน

(8) ทำการวัดค่า Viscosity ของน้ำกะทิ จากนั้นบันทึกค่า Viscosity ที่ได้ โดยจะทำการวัดค่า 3 ซ้ำ ต่อครั้ง

- เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ Brix เครื่อง Pocket Refractometer รุ่น PAL-1 (Atago, Japan)

(1) ทำการ Set ค่าเริ่มต้น โดยการนำน้ำกลั่นหยดลงบริเวณช่องที่ใช้วัด จากนั้น Set zero เพื่อที่จะใช้ค่าของน้ำกลั่นเป็นค่าเริ่มต้น (การ Calibrate)

(2) ทำการวัดค่า โดยหยดน้ำกะทิลงบริเวณช่องที่ใช้วัดค่า แล้ววัดค่าเปอร์เซ็นต์ Brix

(3) ทำการวัดค่า Brix ของน้ำกะทิ จากนั้นบันทึกค่า Brix ที่ได้ โดยจะทำการวัดค่า 3 ซ้ำ ต่อ 1 ตัวอย่าง

- การวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันโดยวิธี Gerber method (ส่งให้โรงงาน food merit จ.ชลบุรี ทำการวัด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้)

(1) ขั้นแรกให้เติมกรดซัลฟุริคเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ลงในขวด Gerber

(2) ปิเปท (เฉพาะ)น้ำกะทิ 10.94 มิลลิลิตร ลงในขวด Gerber โดยค่อยให้น้ำกะทิไหลลงผสมกับกรด สังเกตว่าน้ำกะทิจะแยกอยู่เป็นชั้นๆ

(3) เติมไอโซเอมิล แอลกอฮอล์ 1 มิลลิลิตร

(4) ปิดจุกขวดให้แน่นแล้วพลิกขวดกลับด้านหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งกรดย่อยสลายน้ำกะทิหมดได้ส่วนผสมสีม่วงแกมดำ

(5) นำเข้าเหวี่ยงใสประมาณ 5 นาที และอ่านค่าบันทึกผล

7.1.5 ผลการทดลอง

(1) สี (color) ค่าเฉลี่ยของสี ของน้ำกะทิจากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 7.1-7.3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 ค่าสีเฉลี่ยของ สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C ตามเวลา

เวลา(นาที)	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	88.23	-0.25	5.38		46.54
30	87.76	-0.33	6.10	0.87	41.93
60	86.92	-0.28	6.80	1.93	36.55
90	84.65	-0.19	8.03	4.46	25.10
120	80.70	-0.20	9.53	8.60	8.29

ตารางที่ 7.2 ค่าสีเฉลี่ยของ สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C ตามเวลา

เวลา(นาที)	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	88.30	-0.30	5.58		45.72
30	87.82	-0.31	6.50	0.76	41.83
45	87.51	-0.28	6.50	1.21	39.40
60	87.19	-0.26	6.85	1.69	36.92
75	86.74	-0.25	7.21	2.26	34.07
90	86.03	-0.24	7.69	3.10	30.07
105	84.80	-0.27	8.26	4.41	24.32
120	82.55	-0.28	9.13	6.76	14.60

ตารางที่ 7.3 ค่า สี เฉลี่ยของสภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C ตามเวลา

เวลา(นาที)	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	88.63	-0.39	5.47		47.02
30	87.04	-0.39	6.32	2.06	39.15
40	86.96	-0.46	6.75	2.36	36.87
60	84.90	-0.61	8.00	4.76	25.81
75	83.47	-0.37	8.49	6.22	20.00
90	77.67	-0.28	10.19	12.16	-2.16
105	61.43	-0.63	11.84	28.18	-47.24
120	55.20	-0.77	11.50	34.20	-58.22

จากตารางที่ 7.1-7.3 ค่าสีของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C

L* เปลี่ยนจาก 88.23 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 80.70 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a* เปลี่ยนจาก -0.25 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น -0.20 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

b* เปลี่ยนจาก 5.38 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 9.53 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

DE* มีค่าเท่ากับ 8.60

WICIE เปลี่ยนจาก 46.54 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 8.29 ที่น้ำกะทิหลังกาทดลอง

- สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg อุณหภูมิ 30-35 °C

L* เปลี่ยนจาก 88.30 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 82.55 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

a* เปลี่ยนจาก -0.30 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น -0.28 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

b* เปลี่ยนจาก 5.58 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 9.13 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

DE* มีค่าเท่ากับ 6.76

WICIE เปลี่ยนจาก 45.72 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 14.60 ที่น้ำกะทิหลังกาทดลอง

- สภาวะที่ 3 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 15-20 °C

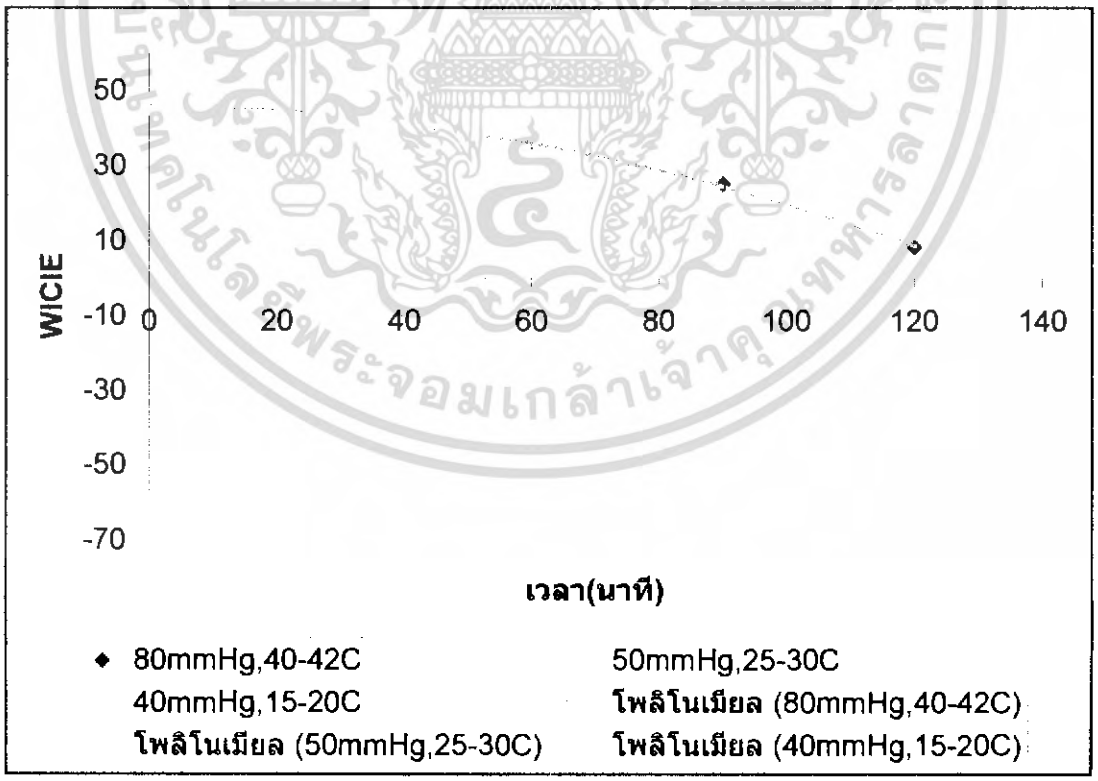
L* เปลี่ยนจาก 88.63 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 55.20 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

a* เปลี่ยนจาก -0.39 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น -0.77 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

b* เปลี่ยนจาก 5.47 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 11.50 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

DE* มีค่าเท่ากับ 34.20

WICIE เปลี่ยนจาก 47.02 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น -58.22 ที่น้ำกะทิหลังกาทดลอง



รูปที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงของค่า WICIE ของน้ำกะทิที่สภาวะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.7 จะเห็นได้ว่า สีจากสภาวะที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าสภาวะที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสภาวะที่ 1 สูงกว่า สภาวะที่ 2 ส่วนในสภาวะการทดลองที่ 3 สาเหตุที่สีมีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด อาจเนื่องมาจากผลของความดันที่ต่ำมีผลมากกว่าอุณหภูมิ โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากกะทิเริ่มต้น สภาวะที่ 1 มีความแตกต่าง 82.19% สภาวะที่ 2 มีความแตกต่าง 68.1% สภาวะที่ 3 มีความแตกต่าง 223.82%

(2) ความหนืด (viscosity) ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 7.4-7.6 ดังนี้

ตารางที่ 7.4 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 1

ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)	
(rpm)	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
20	26.42	255.27
30	23.35	233.33
50	19.53	211.23
60	18.35	202.63
100	17.31	183.45

ตารางที่ 7.5 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 2

ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)	
(rpm)	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
20	26.60	313.40
30	23.72	276.53
50	20.30	233.25
60	19.41	218.32
100	17.98	183.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.6 ค่า viscosity เฉลี่ยของสภาวะการทดลองที่ 3

ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C

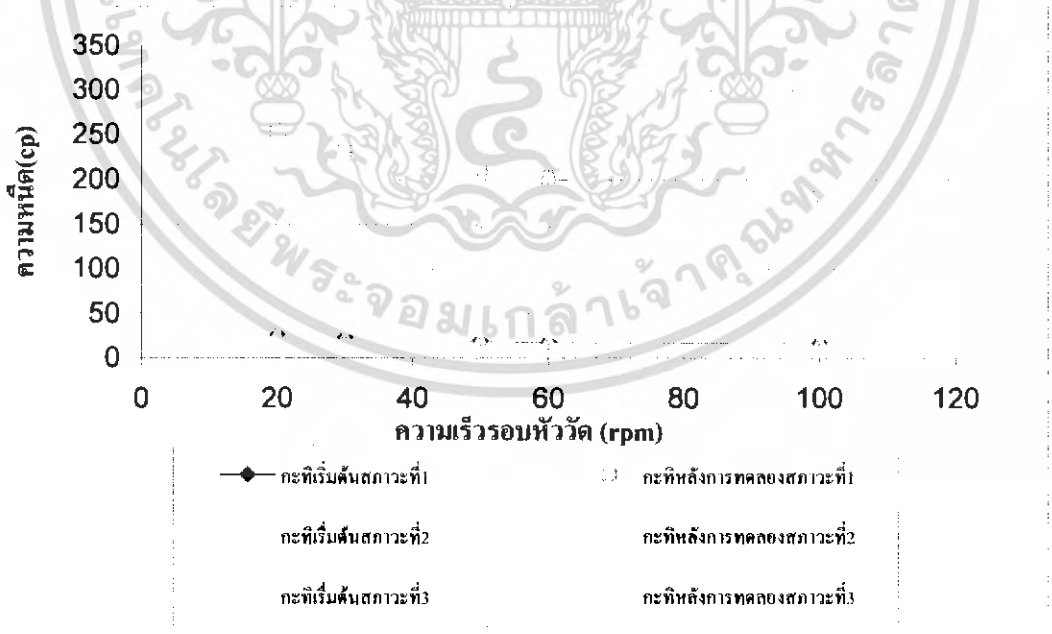
ความเร็วรอบ	viscosity (cp)	
(rpm)	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
20	27.72	147.13
30	24.40	152.00
50	20.65	150.63
60	19.38	148.73
100	18.04	146.26

จากตารางที่ 7.4-7.6 ความหนืด (viscosity) มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ความเร็วรอบ 100 rpm เพราะว่า ความหนืดเริ่มมีค่าคงที่

- สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C ความหนืดของน้ำกะทิเพิ่มจาก 17.31 cp เป็น 183.45 cp ที่ 100 rpm

- สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg อุณหภูมิ 30-35 °C ความหนืดของน้ำกะทิเพิ่มจาก 17.98 cp เป็น 183.51 cp ที่ 100 rpm

- สภาวะที่ 3 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 15-20 °C ความหนืดของน้ำกะทิเพิ่มจาก 18.04 cp เป็น 146.26 cp ที่ 100 rpm



รูปที่ 7.8 การเปรียบเทียบค่าความหนืด ก่อน และ หลังการทดลองและเปรียบเทียบความหนืดที่สภาวะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่า น้ำกะทิหลังการทดลองมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น โดยดูจากที่ความเร็วรอบเดียวกัน ซึ่งในที่นี้ใช้ความเร็วรอบ 100 rpm มาทำการพิจารณา เนื่องจาก ค่าความหนืดเริ่มคงที่ จะเห็นได้ว่า ค่า viscosity จากสภาวะการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่า viscosity จากสภาวะการทดลองที่ 3 มีค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด และ เมื่อดูจากเส้นกราฟรวมทั้งหมดของน้ำกะทิหลังการทดลองจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของสภาวะการทดลองที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วรอบการกวนเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากกะทิเริ่มต้นโดยคิดที่ 100 rpm แล้ว สภาวะที่ 1 มีความแตกต่าง 90.56% สภาวะที่ 2 มีความแตกต่าง 90.2% สภาวะที่ 3 มีความแตกต่าง 87.67%

(3) total soluble solids ค่าเฉลี่ยของ total soluble solidsของน้ำกะทิ ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 7.7 ดังนี้

ตารางที่ 7.7 total soluble solids ของน้ำกะทิที่เวลาและสภาวะต่าง ๆ

เวลา(นาที)	ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C	ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C	ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C
0	12.82	13.24	13.50
30	14.83	14.73	16.10
45	-	17.57	31.67
60	17.33	20.40	23.23
75	-	21.27	27.80
90	26.27	23.70	35.37
105	-	26.87	*
120	36.73	31.57	*

* ค่า Brix มากกว่า 53%

- ไม่มีการนำตัวอย่างน้ำกะทิออกมาวัดค่า

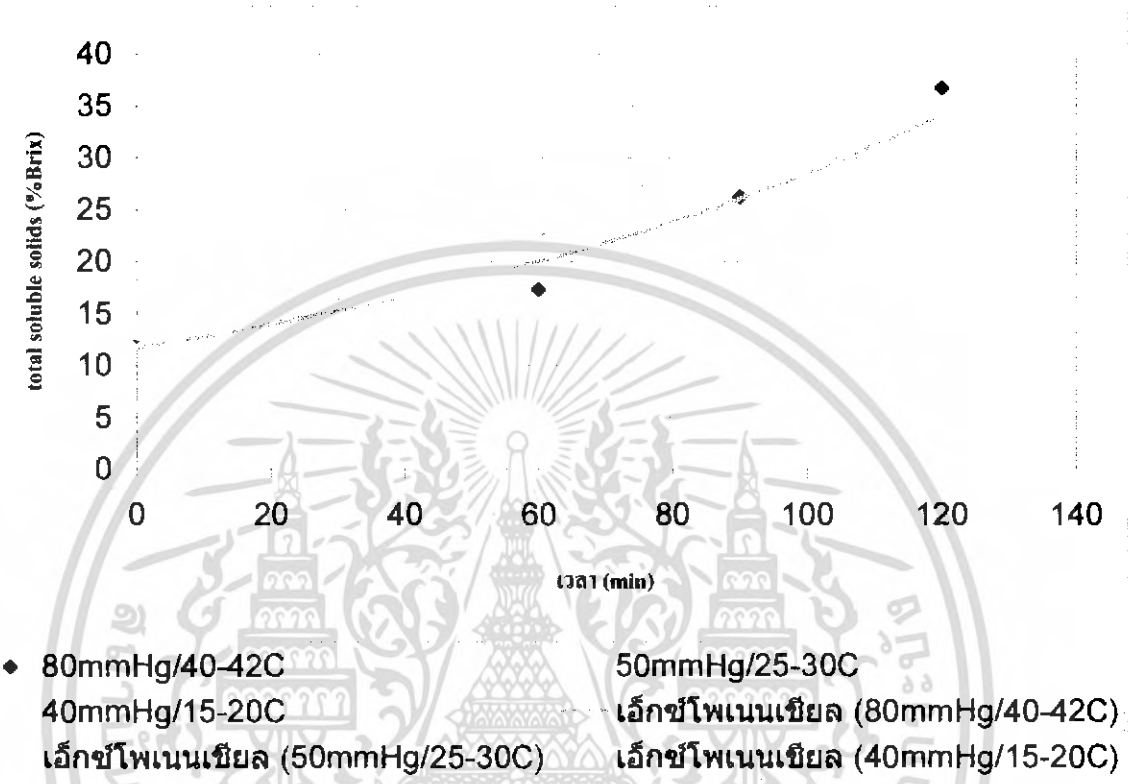
จากตารางที่ 7.7 total soluble solidsของน้ำกะทิ มีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C total soluble solidsของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นจาก 12.82 %Brix เป็น 36.73 %Brix

สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg อุณหภูมิ 30-35 °C total soluble solidsของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นจาก 13.24 %Brix เป็น 31.57 %Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 3 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 15-20 °C total soluble solidsของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นจาก 13.50 %Brix เป็น มากกว่า53 %Brix



รูปที่ 7.9 การเพิ่มขึ้นของค่า total soluble solids เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ที่สภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 7.9 จะเห็นได้ว่าค่า total soluble solids จากผลการทดลองที่ 3 เกิดความไม่แน่นอนขึ้น จึงไม่นำมาพิจารณา ซึ่งจากผลการทดลองในสภาวะที่ 1 และ 2 นั้นจะเห็นได้ว่าในสภาวะการทดลองที่ 1 ให้ค่า total soluble solids ที่ดีกว่าสภาวะการทดลองที่ 2 และยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้นอีกด้วย โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากกะทิเริ่มต้น สภาวะที่ 1 มีความแตกต่าง 65.1% สภาวะที่ 2 มีความแตกต่าง 58.1% สภาวะที่ 3 มีความแตกต่าง 61.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) การหาค่า fat concentration ค่าเฉลี่ยของ %fat ของน้ำกะทิ ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ถูกแสดงใน ตารางที่ 7.8 ดังนี้

ตารางที่ 7.8 ค่า fat concentration เฉลี่ยของน้ำกะทิที่สภาวะต่าง ๆ

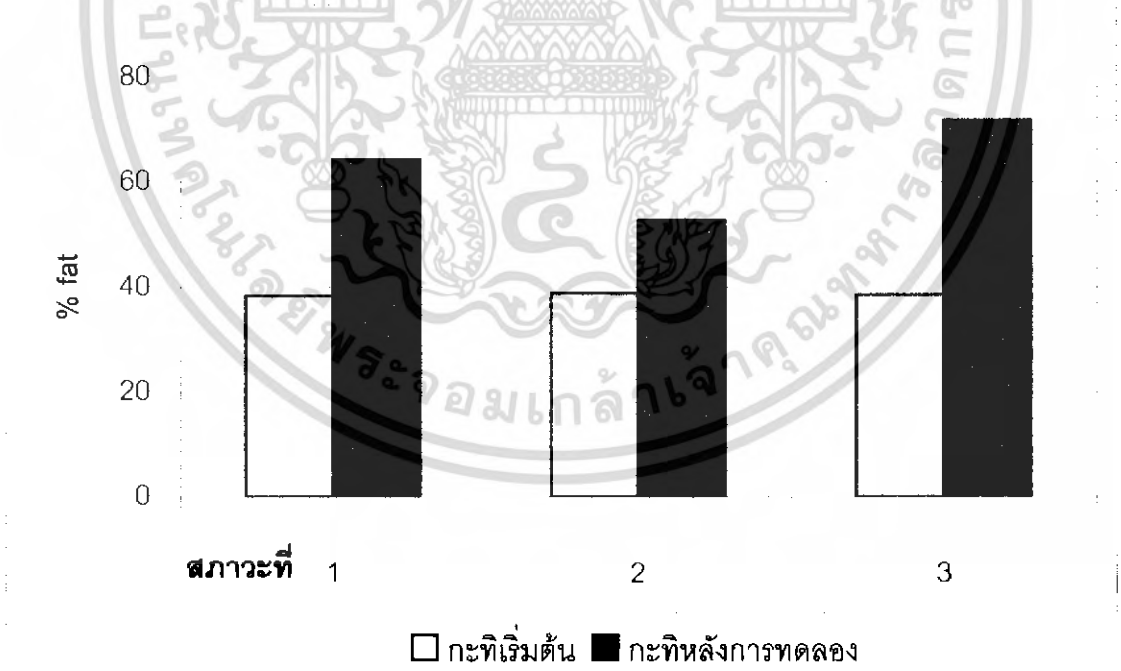
สภาวะที่	fat concentration (%)	
	กะทิเริ่มต้น	กะทิหลังการทดลอง
1	38.33	64.30
2	38.83	52.67
3	38.50	71.83

จากตารางที่ 7.8 - fat concentration ของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C fat concentration ของน้ำกะทิมีเพิ่มขึ้นจาก 38.33 เป็น 64.30 % fat

สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg อุณหภูมิ 30-35 °C fat concentration ของน้ำกะทิมีเพิ่มขึ้นจาก 38.83 เป็น 52.67 % fat

สภาวะที่ 3 ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 15-20 °C fat concentration ของน้ำกะทิมีเพิ่มขึ้นจาก 38.50 เป็น 71.83 % fat



รูปที่7.10 การเปลี่ยนแปลงของ %fat ที่สภาวะต่างๆ

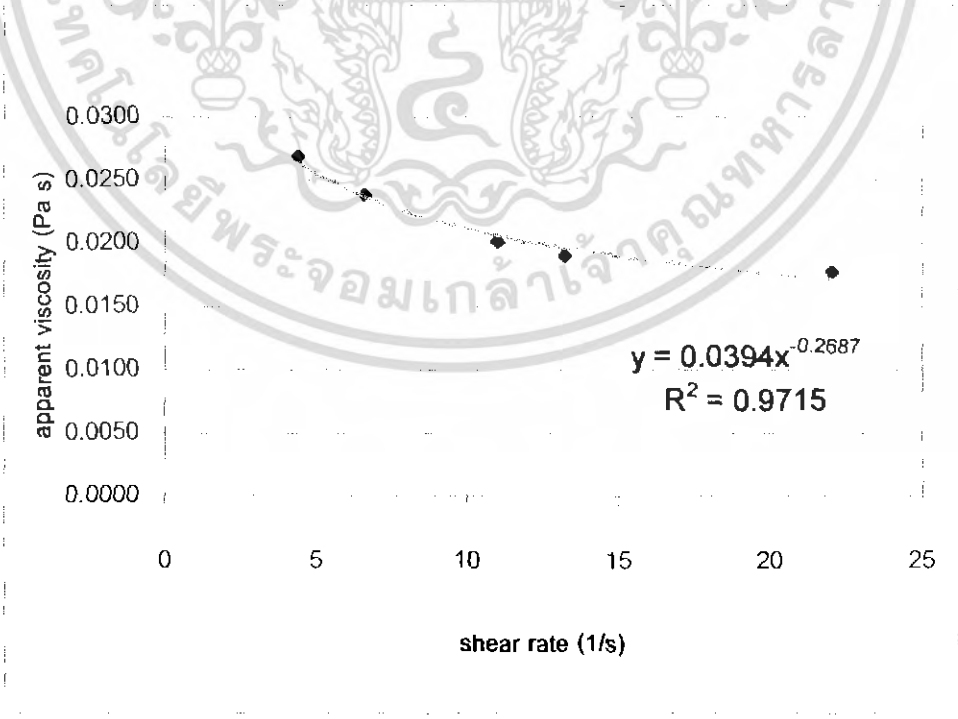
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่าค่า %fat จากสภาวะที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดแต่เมื่อพิจารณาจากสีและความหนืดแล้ว สภาวะที่ 3 สีมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ความหนืดเปลี่ยนไปน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะที่ 1 และ 2

- การหาค่า flow behavior index (n) และค่า consistency index (k) ของน้ำกะทิเริ่มต้น โดยนำค่า viscosity เฉลี่ยที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ของน้ำกะทิเริ่มต้นจากทั้ง 3 สภาวะการทดลองมาคำนวณดังนี้

ตารางที่ 7.9 ค่า apparent viscosity ที่ shear rate ต่าง ๆ

ความเร็วรอบ (rpm)	viscosity (cp) เฉลี่ยของน้ำกะทิก่อนการทดลอง	shear rate (1/s)	viscosity (pa s)
20	26.91	4.4	0.0269
30	23.82	6.6	0.0238
50	20.16	11	0.0202
60	19.05	13.2	0.0190
100	17.78	22	0.0178



รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง apparent viscosity ของน้ำกะทิเริ่มต้น กับ shear rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.11 แสดงว่า น้ำกะทิเป็นของเหลวชนิด Non-Newtonian ประเภท Pseudoplastic และจากสมการในรูปที่ 7.3 ค่า consistency index (k) = 0.0394 Pa s^n ค่า n – 1 = -0.2687 เพราะฉะนั้น ค่า flow behavior index (n) = 0.7313

7.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของสี ได้นำค่า WICIE มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยนำค่า mean (ภาคผนวก ค.) มาทำการเปรียบเทียบโดยวิธี Independent-Samples T Test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ข้อมูล 2 ชุด ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของค่าสีของน้ำกะทิ ก่อนการทดลองและ จากการทดลองที่เวลาต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 7.11 ดังนี้ (วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 7.10 ค่า mean และค่า standard deviation ของค่า WICIE และความแตกต่างของสีกะทิก่อนและหลังการทดลองที่ช่วงเวลาต่างๆ

สภาวะ	กะทิเริ่มต้น	เวลา(นาที)			
		30	60	90	120
P80mmHg,T40-42°C	46.54 ± 0.96	41.93 ± 0.99*	36.55 ± 0.91*	25.10 ± 0.53*	8.29 ± 0.14*
P80mmHg,T40-45°C	45.75 ± 1.16	41.83 ± 0.35*	36.92 ± 0.07*	30.07 ± 0.18*	14.60 ± 0.15*
P80mmHg,T40-45°C	47.02 ± 1.86	39.15 ± 0.39*	25.81 ± 1.55*	- 2.16 ± 0.53*	- 58.22 ± 3.61*

* หมายถึง สีของกะทิเกิดความแตกต่างจากสีของกะทิเริ่มต้น ที่ความน่าเชื่อถือมากกว่า 95%(ภาคผนวก ง.)

จากตาราง จะเห็นได้ว่าเกิดความแตกต่างระหว่างสีของน้ำกะทิเริ่มต้น กับน้ำกะทิที่ผ่านกระบวนการทำระเหย โดยที่เวลาผ่านไป 30 นาที กะทิก็มีการเปลี่ยนสีไปจากเดิมแล้วไม่ว่าจะเป็นที่สภาวะใด ๆ ก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิที่ได้ทำการทดลองมาทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศเครื่องนี้สามารถทำได้คือ การระเหยที่สภาวะความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C จึงใช้สภาวะการทดลองนี้ในการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไป

7.2 การทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไปและอัตาการระเหยจากน้ำกะทิโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทำระเหย

7.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ระเหยไป อัตราการระเหย และคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิที่สภาวะที่ดีที่สุดที่เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นจะสามารถทำได้ คือ ที่ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

7.2.2 วัสดุและอุปกรณ์

- ใช้วัสดุและอุปกรณ์เช่นเดียวกันกับ หัวข้อ 7.1.2

7.2.3 วิธีการทดลอง

- ทำการทดลองที่สภาวะ ความดัน80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C

(1) เตรียมตัวอย่างน้ำกะทิ (หัวกะทิ) 5 ลิตร สำหรับการทดลอง

(2) ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิเริ่มต้น คือ

- วัดค่าสีของน้ำกะทิโดยเครื่อง Color meter
- วัดค่าความหนืดของน้ำกะทิโดยเครื่อง Rotational Viscometer
- วัดค่า total soluble solids ของน้ำกะทิโดยเครื่อง Refractometer
- วัดค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันของน้ำกะทิโดยวิธี Gerber Method

(3) เทกะทิ 5 l ลงในเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

(4) แยกส่วนถังของเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศไปชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกผล แล้วติดตั้งกลับที่เดิม

(5) ให้ความร้อนแก่น้ำกะทิโดย Heater พร้อมกับ เริ่มหมุนใบกวนที่ความเร็วรอบ 10รอบ/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกะทิสูงขึ้นจนถึง 40 °C

(6) เริ่มทำการดูดอากาศออกจากถังเพื่อลดความดัน จนความดันภายในถังอยู่ที่ 80 mmHg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) เริ่มจับเวลาจนครบ 120 นาที หรือ 2 ชั่วโมง โดยไม่มีการนำตัวอย่างน้ำกะทิออกจากถังเพื่อทำการวัดค่าคุณสมบัติทางกายภาพแต่อย่างใด ทุกๆ15นาที หยุดไบกวน อ่านระดับน้ำกะทิและบันทึกผล

(8) แยกส่วนถังของเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศไปชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกผล

(9) ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิหลังการทดลอง

(10) บันทึกค่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิ

7.2.4 ผลการทดลอง เปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหยไปและอัตราการระเหย

การหาเปอร์เซ็นต์น้ำที่หายไปสามารถหาได้จาก การวัดระดับน้ำกะทิที่เหลือในถัง หรือจากน้ำหนักที่หายไป โดยจะแสดงวิธีหาทั้ง 2 แบบ คือ

(1) หาจากการวัดระดับน้ำกะทิในถังที่เวลาต่าง ๆ โดยในเบื้องต้นได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรน้ำกะทิกับระดับน้ำกะทิในถัง ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

ตารางที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรน้ำกะทิกับระดับน้ำกะทิในถัง

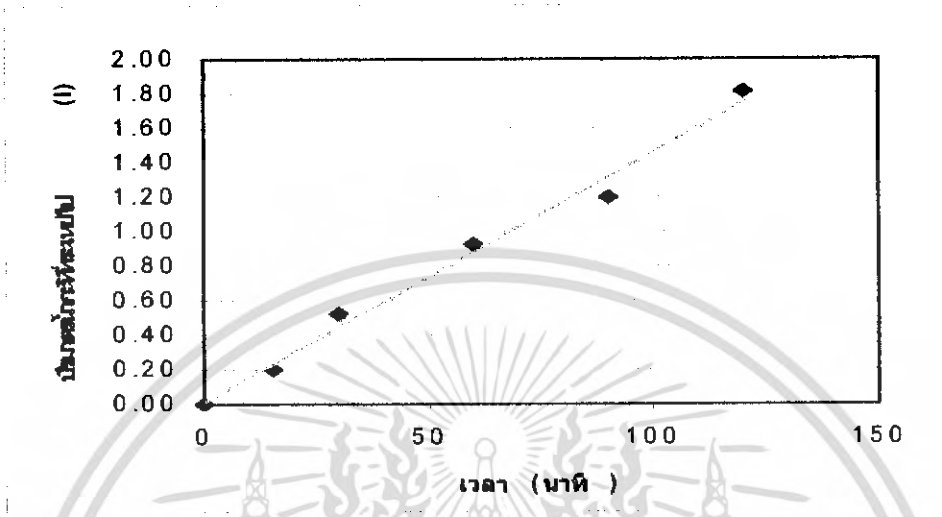
ปริมาตรน้ำกะทิ(l)	ระดับน้ำกะทิในถัง (cm)
1	3
2	4.8
3	6.3
4	7.8
5	9.05

ตารางที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับน้ำกะทิในถัง กับปริมาตรของน้ำกะทิที่ระเหยไปที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	ระดับน้ำกะทิ (cm)	ปริมาตร (l)	ปริมาตรน้ำกะทิที่ระเหยไป (l)
0	9.05	5.00	0.00
15	8.8	4.80	0.20
30	8.4	4.48	0.52
60	7.9	4.08	0.92
90	7.5	3.80	1.20
120	6.59	3.19	1.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 7.12 ที่เวลา 2 ชั่วโมง น้ำกะทิมีปริมาตร 3.33 ลิตร จากปริมาตรเริ่มต้น 5 ลิตร น้ำกะทิหายไป 1.81ลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำกะทิที่หายไปได้เท่ากับ 36.2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7.12 ปริมาณน้ำกะทิที่ระเหยไปเทียบกับเวลา

(2) หาจากน้ำหนักน้ำกะทิที่หายไป โดยทำการชั่งน้ำหนักถังรวมกับน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลองแล้วคำนวณหาปริมาตรน้ำกะทิที่หายไปได้ ดังนี้ เนื่องจากสิ่งที่ระเหยไปคือน้ำ จึงต้องใช้ค่าความหนาแน่นของน้ำมาคำนวณ

- น้ำหนักถัง + น้ำกะทิก่อนการทดลอง 20.11 kg
- น้ำหนักถัง + น้ำกะทิหลังการทดลอง 18.31 kg
- คิดเป็นน้ำหนักน้ำกะทิที่หายไป 1.8 kg
- ค่าความหนาแน่นของน้ำ โดยประมาณ 1 kg/l

นำค่าความหนาแน่นของน้ำ หารกับ น้ำหนักน้ำกะทิที่หายไป 1.8 / 1 = 1.8 (l) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำที่ระเหย $\frac{1.8}{5} \times 100 = 36\%$

คิดอัตราการระเหยจาก ใช้เวลาน้ำการทำการระเหย 2 ชั่วโมง น้ำกะทิหายไปประมาณ 1.81 ลิตร เพราะฉะนั้น อัตราการระเหยมีค่าเท่ากับ 0.91 ลิตร ต่อ ชั่วโมง

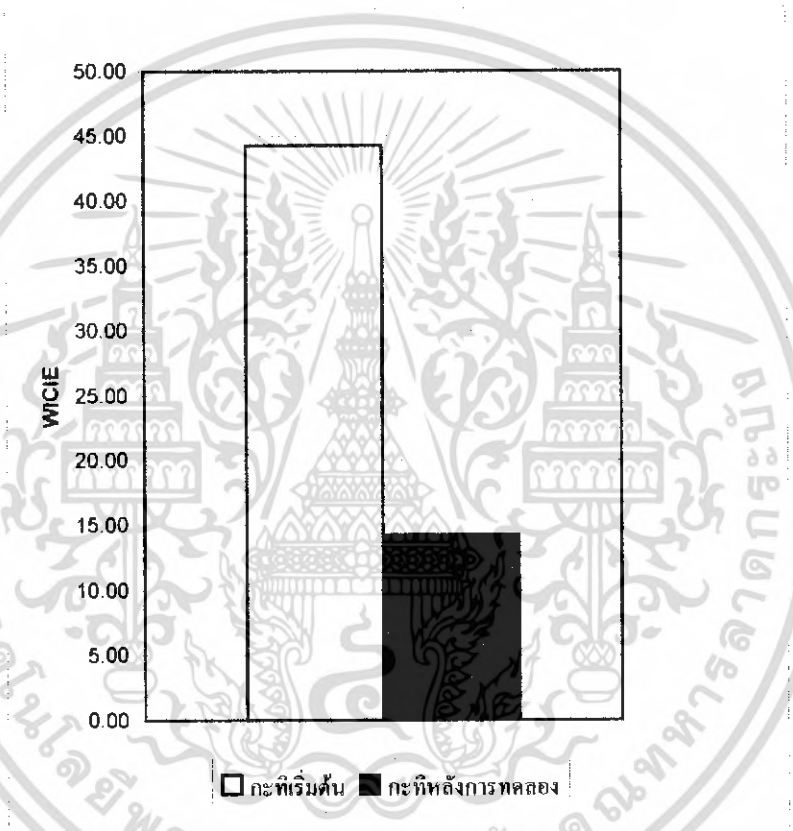
7.2.5 ผลการทดลอง ลักษณะทางกายภาพของน้ำกะทิ

(1) สี ค่าเฉลี่ยของค่า WICIE ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง ถูกแสดงในตารางที่ 7.12 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.13 การเปรียบเทียบค่าสี ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

น้ำกะทิ	L*	a*	b*	DE*	ค่าเฉลี่ยWICIE
เริ่มต้น	88.36	-0.41	5.90		44.28
หลังการทดลอง	83.02	-0.36	9.41	7.04	14.27
% ความแตกต่าง	6.04%	13.89%	37.3%		67.77%



รูปที่ 7.13 ค่า WICIE ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

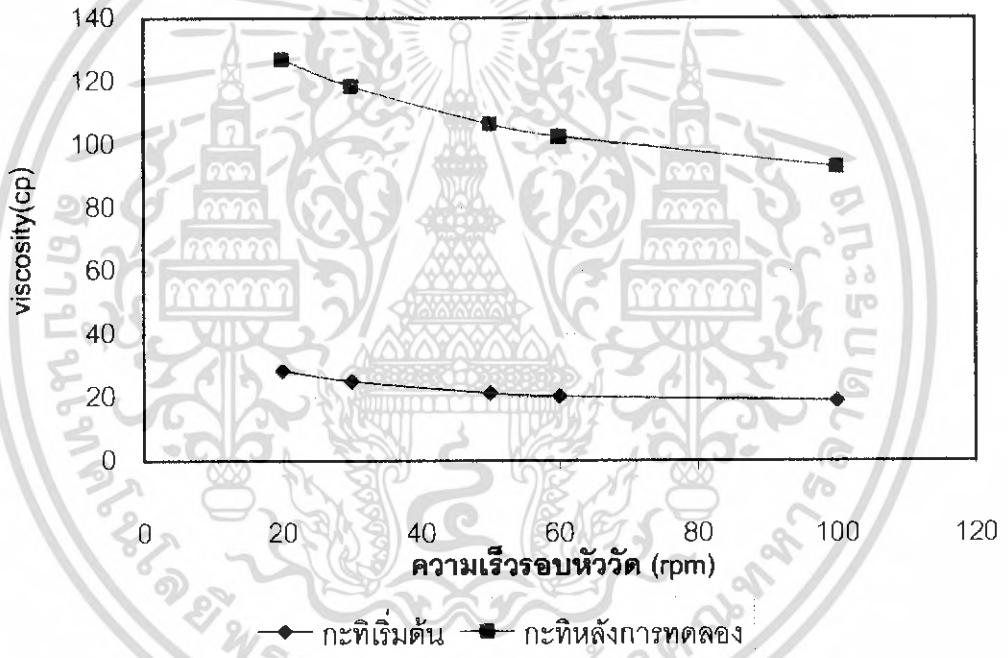
จากรูปที่ 7.12 ค่า WICIE ของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงจาก 44.28 ไปเป็น 14.27 คิดเป็น 67.77%

(2) **ความหนืด (viscosity) ค่า viscosity เฉลี่ยของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง** แสดงในตารางที่ 7.13 **ดังนี้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.14 การเปรียบเทียบค่า Viscosity ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

ความเร็วรอบ	Viscosity (cp)	
(rpm)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง
20	28.44	126.93
30	25.16	118.47
50	21.46	106.47
60	20.38	102.51
100	18.96	92.99



รูปที่ 7.14 ค่า Viscosity ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลองที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

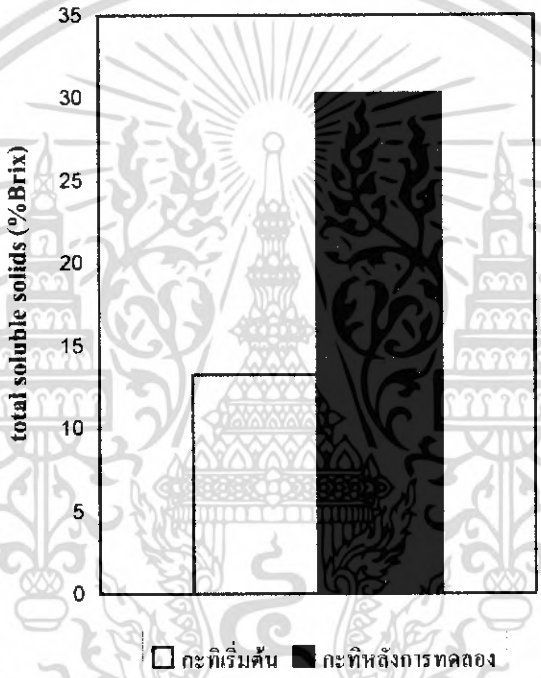
จากรูปที่ 7.14 ที่ความเร็วรอบหัววัด 100 rpm ค่า Viscosity เปลี่ยนแปลงจาก 18.96 ไปเป็น 92.99 cp คิดเป็น 79.61 %

(3) total soluble solids ค่าเฉลี่ยของ total soluble solids ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง แสดงในตารางที่ 7.15 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.15 การเปรียบเทียบค่า total soluble solids ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

	total soluble solids (%Brix)
น้ำกะทิเริ่มต้น	13.28
น้ำกะทิหลังการทดลอง	30.27
% ความแตกต่าง	56.13%



รูปที่ 7.15 ค่า total soluble solids ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

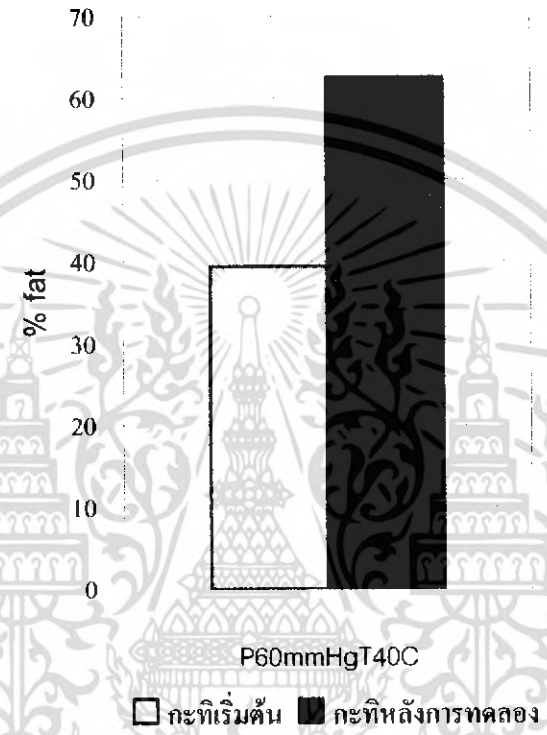
จากรูปที่ 7.15 ค่า total soluble solids มีการเปลี่ยนจาก 13.28 เป็น 30.27 %Brix คิดเป็น 56.13 %

(4) fat concentration ค่าเฉลี่ยของ %fat ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง แสดงในตารางที่ 7.16 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.16 ค่า fat concentration ของน้ำกะทิก่อนและหลังการทดลอง

สภาวะที่	fat concentration (%)	
	กะทิเริ่มต้น	กะทิหลังการทดลอง
P80mmHg,T40-42°C	39.42	62.5



รูปที่7.16 ค่า %fat ก่อนและหลังการทดลอง

จากรูปที่ 7.16 ค่า fat concentration ของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงจาก 39.42 ไปเป็น 62.5 % คิดเป็น 36.92 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุป และ วิจารณ์ผล

8.1 สรุปเกี่ยวกับชุดเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

ในการทำน้ำกะทิเข้มข้นแต่ละครั้งสามารถใส่น้ำกะทิเริ่มต้นครั้งละ 5 l มอเตอร์สามารถทำความเร็วในการหมุนใบกวนได้ที่ความเร็วรอบ 5, 10 และ 50 rpm ฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนแก่ระบบมีขนาดกำลังไฟ 1000 W ปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ MAKASHI รุ่น FY-1.5A สามารถลดความดันได้ตั้งแต่ 760 – 40 mmHg ความเร็วในการดูดอากาศ 4.5 m^3/hr หรือ 2 ft^3/min มอเตอร์ขนาด ¼ HP ชุดCondenser มีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 5 l/min น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิ 1-3 °C มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน 0.248 m^2

ในการทำงานของเครื่องสามารถที่จะปรับใช้ความเร็วรอบของใบกวน ปรับค่าความร้อนที่ให้แก่ระบบ และปรับความดันในการทำงาน ให้เหมาะสมกับสภาวะที่กำหนดตามสมรรถนะของเครื่องที่สามารถจะทำได้

ในบางครั้งที่ระบบไม่สามารถทำความดันให้เหลือ 40 mmHg อาจจะเป็นเพราะว่าเกิดการรั่วของอากาศเข้ามาในระบบ ผู้ปฏิบัติงานควรที่จะทำการตรวจสอบจุดต่อต่างๆของระบบ และขันน็อตหรือสกรูให้แน่นก็จะสามารถแก้ปัญหาได้

8.2 สรุปผลการทดลอง

8.2.1 ค่า n และค่า k ของน้ำกะทิเริ่มต้น

ค่า consistency index (k) = 0.0394 Pa s^n ค่า flow behavior index (n) = 0.7313

น้ำกะทิเป็นของเหลวชนิด Non-Newtonian ประเภท Pseudoplastic

8.2.2 การทดลองโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทำระเหย

จากการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่เครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศเครื่องนี้ จะสามารถทำได้ ระยะเวลาในการทำระเหย 2 ชั่วโมง ที่สภาวะการทดลอง ความดัน 80 mmHg อุณหภูมิ 40-42 °C

- เปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ระเหยไป 36.2 % โดยปริมาตร
- อัตราการระเหย 0.91 l/hr
- ค่าสีของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

L* เปลี่ยนจาก 88.36 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 83.02 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

a* เปลี่ยนจาก -0.41ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น -0.36 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b* เปลี่ยนจาก 5.90 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 9.41 ที่น้ำกะทิหลังการทดลอง

DE* มีค่าเท่ากับ 7.04

WICIE เปลี่ยนจาก 44.28 ที่น้ำกะทิเริ่มต้น เป็น 14.27 ที่น้ำกะทิหลังกาทดลอง

- ความหนืด (viscosity) มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ความเร็วรอบ 100 rpm เพราะว่า ความหนืดเริ่มมีค่าคงที่

ความหนืดของน้ำกะทิเพิ่มจาก 18.96cp เป็น 92.99 cp ที่ 100 rpm

- total soluble solidsของน้ำกะทิ มีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

total soluble solidsของน้ำกะทิเพิ่มขึ้นจาก 13.28 %Brix ไปเป็น30.27 %Brix

- fat concentration ของน้ำกะทิมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

fat concentration ของน้ำกะทิมีเพิ่มขึ้นจาก 39.42 เป็น 62.5 % fat

8.3 ข้อเสนอแนะ

8.3.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับ ชุดเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

(1) ในการออกแบบชุดถัง การใช้งานยังมีความยุ่งยากในการถอดประกอบ และการล้างทำความสะอาดจำเป็นต้องถอดยกชุดถังออกและถอดฮีตเตอร์ จึงควรที่จะปรับปรุงและแก้ไขลักษณะการจับยึดของถังให้มีการถอดและประกอบได้สะดวกขึ้น

(2) เนื่องจากตัวเครื่องนั้นมีการประกอบจากหลายชิ้นส่วน ทำให้มีจุดต่อของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นหลายจุด เช่น ฝาอุดด้ายล่างด้านบน ฝาหน้าและฝาหลังของตัวเครื่อง วาล์วน้ำกะทิออก เป็นต้น จึงทำให้อาจจะเกิดการรั่วของอากาศเข้าสู่ระบบได้ง่าย จึงควรลดการต่อของชิ้นส่วนลงและปรับปรุงจุดต่อต่างๆให้สามารถป้องกันการรั่วและบริเวณข้อต่อสายอากาศควรปรับปรุงให้ถอด- ต่อ ได้สะดวกขึ้น

(3) การให้ความร้อนของฮีตเตอร์แก่ระบบ ยังไม่สามารถที่จะกำหนดอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการเพราะว่าฮีตเตอร์มีกำลังวัตต์ไม่เพียงพอ จึงควรที่จะเพิ่มขนาดกำลังวัตต์ของฮีตเตอร์เพิ่มพื้นที่ของฮีตเตอร์ให้สัมผัสกับถังให้มากขึ้นอีกและควรที่จะมีการหุ้มฉนวนฮีตเตอร์เพื่อป้องกันอันตรายจากความร้อนของฮีตเตอร์ขณะปฏิบัติงาน

(4) เนื่องจากไม่สามารถที่จะคุมอุณหภูมิของน้ำเย็นในระบบคอนเดนเซอร์ให้คงที่ตลอดเวลาจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์ ควรที่จะปรับปรุงชุดการทำน้ำเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำเข้าให้คงที่ และแก้ไขทางระบายน้ำ Condensate ให้สามารถทำได้สะดวกขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับผลการทดลอง

อัตราการระเหยที่เครื่องสามารถทำได้ยังมีค่าน้อยเกินไป เพื่อให้ได้น้ำกะทิเข้มข้นที่มีคุณสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการต้องใช้เวลาในการทำระเหยนานมาก คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำกะทิเกิดการเปลี่ยนแปลงไปมากเกิน จึงควรปรับปรุงให้สามารถทำการระเหยได้ในอัตราที่สูงกว่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ชัยวิทย์ ศิลาวัชนาไนย. 2526. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.
2. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. 2537. การออกแบบเครื่องจักรกล. เล่มที่ 1 พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : บริษัท เอช.เอ็น. กรุ๊ป จำกัด.
3. บรรจบ อรชร. 2541. กลศาสตร์ของแข็ง. กรุงเทพฯ : บริษัทพิมพ์ดีจำกัด
4. บรรเลง ศรนิล และ ประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์. 2524. ตารางงานโลหะ. กรุงเทพฯ : สภาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
5. William C. Whitman and William M. Johnson. 1995. Refrigerant & Air conditioning Technology. 3rd Edition. U.S.A : Delmar Publishers™.
6. ฉันทกร สุวรรณบริรักษ์. 2545. "ผลของสารทำให้คงตัวต่อคุณสมบัติการไหลของน้ำกะทิที่อุณหภูมิต่างๆ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. วิชัย แตงขจิตเพชร์,เชิดชัย ล้อธรรมคุณ,สุเวช กลมกลาง. 2537. "การออกแบบและสร้างเครื่องทำระเหยแบบสุญญากาศขนาดทดลอง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. จิตติวัฒน์ สิทธิโชค,ปณิธิ ศรีสุวรรณ,สมโชติ หมู่คำล้า. 2547. "การศึกษาการกวนกะทิด้วยความร้อนเพื่อให้ได้น้ำกะทิเข้มข้น." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
9. SWASTIK FOILS. 2005. swastikbrochure.pdf. [Online]. Available : http://www.swastikfoils.com
10. Yunus A. Cengel and Michael A. Boles.2003. Thermodynamics Thai Edition .Thai translation by McGraw-Hill International Enterprises. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด
11. Hunter Lab. 2002. User Manual Version 2.5. Virginia.USA : Hunter Associates Laboratory.
12. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร. "เอกสารการทดลอง เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับความหนืดโดยใช้ Rotational Viscometer." คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
13. LAB.TODAY (Technique:Technology:Management). Refractometer ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายได้. [Online]Thaiscience.com/lab_vol/p16/18refrac.htm Available : http://www.thaiscience.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. LAB.TODAY (Technique:Technology:Management).วิธีการใช้งานอุปกรณ์วิทยาศาสตร์การวิเคราะห์ไขมัน. [Online] .thaiscience.com/index.asp
Available : http://www.thaiscience.com

15. วสุ อุดมเพทายกุล. 2548. "เอกสารประกอบการสอน วิชา สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีวะวัสดุ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

Boiling point of water – pressure/temperature relationship table [5]

Water Temperature		Absolute Pressure			
°F	°c	lb/in^2	kN/m^2	in.Hg	mm.Hg
10	-12.22	0.031	0.213745	0.063	1.6002
20	-6.67	0.05	0.34475	0.103	2.6162
30	-1.11	0.081	0.558495	0.165	4.191
32	0.00	0.089	0.613655	0.18	4.572
34	1.11	0.096	0.66192	0.195	4.953
36	2.22	0.104	0.71708	0.212	5.3848
38	3.33	0.112	0.77224	0.229	5.8166
40	4.44	0.122	0.84119	0.248	6.2992
42	5.56	0.131	0.903245	0.268	6.8072
44	6.67	0.142	0.97909	0.289	7.3406
46	7.78	0.153	1.054935	0.312	7.9248
48	8.89	0.165	1.137675	0.336	8.5344
50	10.00	0.178	1.22731	0.362	9.1948
60	15.56	0.256	1.76512	0.522	13.2588
70	21.11	0.363	2.502885	0.739	18.7706
80	26.67	0.507	3.495765	1.032	26.2128
90	32.22	0.698	4.81271	1.422	36.1188
100	37.78	0.95	6.55025	1.933	49.0982
110	43.33	1.275	8.791125	2.597	65.9638
120	48.89	1.693	11.67324	3.448	87.5792
130	54.44	2.224	15.33448	4.527	114.9858
140	60.00	2.89	19.92655	5.881	149.3774
150	65.56	3.719	25.64251	7.573	192.3542
160	71.11	4.742	32.69609	9.656	245.2624

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boiling point of water – pressure/temperature relationship table (con.)

Water Temperature		Absolute Pressure			
°F	°c	lb/in^2	kN/m^2	in.Hg	mm.Hg
170	76.67	5.994	41.32863	12.203	309.9562
180	82.22	7.512	51.79524	15.295	388.493
190	87.78	9.34	64.3993	19.017	483.0318
200	93.33	11.526	79.47177	23.468	596.0872
210	98.89	14.123	97.37809	28.754	730.3516
212	100.00	14.696	101.3289	29.921	759.9934

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางประกอบการคำนวณ ส่วนของวงกลมในหน่วยวงกลม

(ตัดมาบางส่วนมาจากตารางงานโลหะ[4])

มุมรอบศูนย์กลาง α	ความยามส่วนโค้ง l_{ci}	ขนาดในส่วนตัด		
		ความกว้าง b_1	ความยาว l_1	พื้นที่ A_1
136	2.3736	0.6254	1.8544	0.83949
137	2.3911	0.6335	1.8608	0.85455
138	2.4086	0.6416	1.8672	0.86971
139	2.4260	0.6498	1.8733	0.88497
140	2.4435	0.6580	1.8794	0.90034
141	2.4609	0.6662	1.8853	0.97580
142	2.4784	0.6744	1.8910	0.93135
143	2.4958	0.6827	1.8966	0.94700
144	2.5133	0.6910	1.9021	0.96274
145	2.5307	0.6993	1.9074	0.97858

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ตารางบันทึกข้อมูลจากการทดลอง

ตาราง ค.1 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่าสี เพื่อเปรียบเทียบค่า WICIE

สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

เวลา(นาที)	ซ้ำที่	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	1	88.23	-0.25	5.38		46.63
0	2	88.23	-0.25	5.38		45.54
0	3	88.23	-0.25	5.38		47.45
30	1	87.76	-0.33	6.10	0.87	40.94
30	2	87.76	-0.33	6.10	0.87	41.93
30	3	87.76	-0.33	6.10	0.87	42.92
60	1	86.92	-0.28	6.80	1.93	35.64
60	2	86.92	-0.28	6.80	1.93	36.55
60	3	86.92	-0.28	6.80	1.93	37.46
90	1	84.55	-0.19	8.11	4.58	24.5
90	2	84.70	-0.19	7.99	4.39	25.46
90	3	84.69	-0.18	8.00	4.41	25.35
120	1	80.90	-0.22	9.59	8.45	8.43
120	2	80.70	-0.19	9.53	8.60	8.27
120	3	80.50	-0.19	9.46	8.75	8.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 ° C

เวลา(นาที)	ซ้ำที่	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	1	88.55	-0.32	5.48		46.80
0	2	88.36	-0.32	5.56		45.95
0	3	88.00	-0.25	5.69		44.50
30	1	87.74	-0.39	6.12	0.79	41.76
30	2	87.66	-0.25	6.14	0.85	41.52
30	3	88.05	-0.28	6.18	0.65	42.21
45	1	87.47	-0.29	6.48	1.23	39.38
45	2	87.53	-0.28	6.48	1.18	39.55
45	3	87.52	-0.27	6.53	1.23	39.26
60	1	87.12	-0.27	6.82	1.72	36.88
60	2	87.29	-0.24	6.89	1.65	37.00
60	3	87.15	-0.26	6.84	1.71	36.88
75	1	86.73	-0.26	7.22	2.27	34.02
75	2	86.81	-0.25	7.21	2.21	34.25
75	3	86.68	-0.24	7.21	2.30	33.94
90	1	86.01	-0.23	7.72	3.14	29.86
90	2	86.07	-0.26	7.69	3.07	30.18
90	3	86.00	-0.23	7.65	3.10	30.16
105	1	84.87	-0.27	8.30	4.38	24.29
105	2	84.75	-0.28	8.19	4.41	24.52
105	3	84.79	-0.25	8.29	4.43	24.14
120	1	82.64	-0.29	9.14	6.69	14.75
120	2	82.65	-0.28	9.18	6.70	14.61
120	3	82.35	-0.28	9.07	6.90	14.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C

เวลา(นาที)	ซ้ำที่	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	1	88.19	-0.46	5.70		44.88
0	2	88.87	-0.37	5.38		48.00
0	3	88.82	-0.35	5.32		48.18
30	1	87.43	-0.40	6.42	1.77	39.60
30	2	86.84	-0.38	6.27	2.20	38.93
30	3	86.84	-0.38	6.27	2.20	38.93
45	1	86.23	-0.47	6.89	3.03	34.44
45	2	87.22	-0.51	6.93	2.28	36.57
45	3	87.43	-0.40	6.42	1.77	39.60
60	1	85.12	-0.55	8.09	4.62	25.88
60	2	84.87	-0.65	7.68	4.61	27.33
60	3	84.71	-0.64	8.22	5.04	24.23
75	1	83.57	-0.36	8.77	6.28	18.82
75	2	83.36	-0.42	8.30	6.22	20.70
75	3	83.49	-0.32	8.41	6.16	20.48
90	1	77.99	-0.28	10.42	11.97	-2.67
90	2	77.51	-0.35	10.02	12.24	-1.62
90	3	77.52	-0.22	10.13	12.28	-2.18
105	1	62.95	-0.44	12.68	26.90	-49.36
105	2	61.94	-0.59	12.10	27.72	-47.94
105	3	59.40	-0.86	10.74	29.92	-44.42
120	1	56.36	-0.61	12.01	33.14	-59.36
120	2	55.83	-0.60	12.10	33.68	-61.12
120	3	53.41	-1.09	10.38	35.77	-54.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.2 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า viscosity

สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	27.60	27.30	27.00	27.60	27.30	27.36
30	23.80	24.00	23.80	23.60	24.00	23.84
50	20.20	20.00	19.80	20.00	19.90	19.98
60	18.70	18.80	18.60	18.90	19.00	18.80
100	17.40	17.46	17.40	17.34	18.40	17.60

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	26.40	26.10	26.10	25.80	26.10	26.10
30	23.00	23.20	22.80	23.00	23.00	23.00
50	19.20	19.40	19.60	19.40	19.20	19.36
60	18.00	18.20	18.40	18.10	18.30	18.20
100	17.28	17.22	17.26	17.22	17.28	17.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	26.10	25.80	25.50	26.10	25.50	25.80
30	23.20	23.00	23.40	23.00	23.40	23.20
50	19.30	19.10	19.20	19.40	19.30	19.26
60	17.90	18.10	18.20	17.90	18.20	18.06
100	17.40	17.10	17.04	16.98	16.92	17.09

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	255.00	257.00	252.00	255.00	251.00	254.00
30	230.00	231.00	231.00	230.00	231.00	230.60
50	208.20	209.40	208.80	208.20	208.80	208.68
60	201.00	200.00	201.50	200.00	200.50	200.60
100	181.80	181.80	182.10	181.80	181.50	181.80

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	258.00	257.00	260.00	257.00	258.00	258.00
30	234.00	235.00	236.00	235.00	236.00	235.20
50	213.60	212.40	212.40	211.80	212.40	212.52
60	203.50	203.00	203.00	203.50	204.00	203.40
100	184.50	185.20	184.50	184.80	184.50	184.70

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	255.00	257.00	254.00	252.00	251.00	253.80
30	234.00	235.00	234.00	234.00	234.00	234.20
50	212.20	213.00	212.40	211.80	213.00	212.48
60	204.00	204.50	203.50	204.00	203.50	203.90
100	183.90	183.60	183.60	183.90	184.20	183.84

สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 °C

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	26.40	25.50	25.80	26.40	25.80	25.98
30	23.20	23.40	23.20	23.20	23.40	23.28
50	20.00	20.40	20.20	19.90	20.40	20.18
60	19.40	19.50	19.30	19.60	19.00	19.36
100	17.70	17.70	17.64	17.64	17.64	17.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	26.40	25.80	26.10	26.40	25.80	26.10
30	23.40	23.20	23.20	23.40	23.60	23.36
50	19.70	19.80	20.00	19.60	19.80	19.78
60	18.80	18.70	18.90	19.00	18.90	18.86
100	17.70	17.64	17.52	17.46	17.52	17.57

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	27.30	27.00	27.90	28.20	28.20	27.72
30	24.60	24.40	24.60	24.20	24.80	24.52
50	20.90	21.00	20.90	21.10	20.80	20.94
60	19.80	20.20	19.90	20.10	20.10	20.02
100	18.72	18.66	18.72	18.66	18.72	18.70

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	305.00	308.00	305.00	306.00	308.00	306.40
30	271.00	271.00	270.00	272.00	272.00	271.20
50	228.60	228.00	228.60	228.60	227.40	228.24
60	214.00	213.50	213.00	212.50	211.80	212.96
100	177.60	177.00	177.30	177.60	177.30	177.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	314.00	317.00	314.00	317.00	315.00	315.40
30	275.00	276.00	275.00	277.00	276.00	275.80
50	232.20	231.80	232.80	232.20	232.80	232.36
60	217.50	216.00	217.00	217.50	218.00	217.20
100	182.70	183.00	183.30	183.70	183.30	183.20

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	315.00	318.00	320.00	321.00	318.00	318.40
30	283.00	282.00	282.00	284.00	282.00	282.60
50	238.20	238.80	239.40	240.60	238.80	239.16
60	225.00	224.50	224.00	225.00	225.50	224.80
100	189.60	189.90	190.20	190.20	189.90	189.96

สภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	29.10	29.40	28.80	29.10	29.40	29.16
30	25.60	26.20	25.80	26.00	26.20	25.96
50	22.20	22.20	22.30	21.80	21.70	22.04
60	21.10	21.00	20.90	21.00	20.90	20.98
100	19.38	19.32	19.44	19.38	19.26	19.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	26.10	25.80	26.10	25.80	26.10	25.98
30	22.80	23.20	23.00	23.20	22.80	23.00
50	19.70	19.80	19.70	19.30	19.70	19.64
60	18.10	18.30	17.90	18.10	18.30	18.14
100	17.16	17.22	17.16	17.10	17.22	17.17

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	27.90	28.50	27.60	28.20	27.90	28.02
30	24.40	24.00	24.20	24.60	24.00	24.24
50	20.20	20.00	20.30	20.40	20.40	20.26
60	19.00	18.90	19.00	19.30	18.90	19.02
100	17.64	17.70	17.58	17.58	17.52	17.60

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	161.00	159.00	161.00	162.00	162.00	161.00
30	166.00	167.00	167.00	166.00	168.00	166.80
50	163.20	162.00	163.20	162.60	162.60	162.72
60	160.50	161.00	161.00	159.50	159.00	160.20
100	158.10	157.80	158.40	158.10	158.40	158.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	131.00	135.00	132.00	134.00	135.00	133.40
30	137.00	140.00	138.00	140.00	139.00	138.80
50	139.80	140.40	139.40	140.00	141.00	140.12
60	139.00	139.50	139.00	138.50	139.00	139.00
100	136.80	137.10	137.40	136.50	136.80	136.92

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	147.00	147.00	146.00	149.00	146.00	147.00
30	150.00	149.00	151.00	152.00	150.00	150.40
50	148.80	150.00	148.20	150.10	148.20	149.06
60	148.00	146.50	146.00	147.50	147.00	147.00
100	144.00	143.70	144.00	143.70	143.10	143.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.3 การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า total soluble solids

สภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
น้ำกะทิเริ่มต้น1	13.40	11.80	12.60	12.60
น้ำกะทิเริ่มต้น2	13.40	13.40	12.40	13.07
น้ำกะทิเริ่มต้น3	13.00	12.80	12.60	12.80

เวลา(นาที)	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
0	13.27	12.67	12.53	12.82
30	14.70	15.20	14.60	14.83
60	17.40	16.30	18.30	17.33
90	26.00	26.50	26.30	26.27
120	38.40	36.50	35.30	36.73

สภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 25-30 ° C

	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
น้ำกะทิเริ่มต้น1	13.40	13.40	13.30	13.37
น้ำกะทิเริ่มต้น2	13.20	13.30	13.40	13.30
น้ำกะทิเริ่มต้น3	12.70	13.10	13.40	13.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา(นาที)	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
ค่าเฉลี่ยน้ำกะทิเริ่มต้น	13.10	13.27	13.37	13.24
30	14.40	14.30	15.50	14.73
45	16.80	18.10	17.80	17.57
60	20.40	20.50	20.30	20.40
75	21.10	20.80	21.90	21.27
90	23.70	23.50	23.90	23.70
105	26.90	26.70	27.00	26.87
120	32.10	30.90	31.70	31.57

สภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 ^{o}C

	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
น้ำกะทิเริ่มต้น1	13.20	13.70	13.80	13.57
น้ำกะทิเริ่มต้น2	13.40	13.30	13.80	13.50
น้ำกะทิเริ่มต้น3	13.50	13.20	13.60	13.43

เวลา(นาที)	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
ค่าเฉลี่ยน้ำกะทิเริ่มต้น	13.37	13.40	13.73	13.50
30	18.30	16.10	13.90	16.10
45	17.40	49.70	27.90	31.67
60	22.20	23.20	24.30	23.23
75	28.10	27.80	27.50	27.80
90	35.40	35.80	34.90	35.37
105	-	-	-	-
120	-	-	-	-

** - ค่า Brix มากกว่า 53%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.4 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า fat concentration เพื่อเปรียบเทียบค่า % fat

สภาวะ	%fat ของกะทิเริ่มต้น			%fat ของกะทิหลังการทดลอง		
	ถุงที่1	ถุงที่2	ถุงที่3	ถุงที่1	ถุงที่2	ถุงที่3
P80,T40-42	38.25	39.5	37.25	64.3	>40	>40
P50,T30-35	39	38.25	39.25	50	53	55
P40,T15-20	39.5	38	38	72.5	72.5	70.5

ตาราง ค.5 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่าสี เพื่อเปรียบเทียบค่า WICIE

สภาวะ ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

เวลา(นาที)	ซ้ำที่	L*	a*	b*	DE*	WICIE
0	1	86.95	-0.62	6.64		37.35
0	2	89.24	-0.3	5.54		48.15
0	3	88.88	-0.3	5.53		47.34
120	1	83.13	-0.39	9.36	6.91	14.8
120	2	82.94	-0.36	9.51	7.16	13.57
120	3	82.98	-0.33	9.36	7.04	14.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.6 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า viscosity

สภาวะ ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	29.10	29.40	28.80	29.10	29.40	29.16
30	25.40	25.60	25.80	26.00	25.80	25.72
50	22.10	22.40	22.30	22.20	22.20	22.00
60	20.60	20.90	20.70	21.00	21.20	20.88
100	19.14	19.20	19.08	19.20	19.14	19.15

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	28.50	28.20	28.20	28.50	28.80	28.44
30	25.20	25.20	25.40	25.60	25.40	25.36
50	21.80	22.00	21.70	21.60	21.50	21.72
60	20.40	20.70	20.60	20.50	20.60	20.56
100	19.20	19.26	19.26	19.20	19.26	19.24

น้ำกะทิเริ่มต้น ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	29.10	29.40	28.80	29.10	29.40	29.16
30	25.40	25.60	25.80	26.00	25.80	25.72
50	22.10	22.40	22.30	22.20	22.20	22.00
60	20.60	20.90	20.70	21.00	21.20	20.88
100	19.14	19.20	19.08	19.20	19.14	19.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 1

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	122.00	125.00	126.00	123.00	122.00	123.60
30	116.00	114.00	115.00	116.00	115.00	115.20
50	102.60	103.00	102.00	102.60	101.40	102.32
60	97.10	96.50	96.00	95.50	96.00	96.22
100	87.90	87.30	87.90	87.60	87.30	87.60

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 2

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	120.00	119.00	117.00	119.00	120.00	119.00
30	111.00	112.00	113.00	111.00	110.00	111.40
50	101.40	100.20	100.80	102.60	101.40	101.28
60	99.00	98.50	98.00	99.50	98.50	98.70
100	90.00	89.70	90.30	89.70	89.00	89.74

น้ำกะทิหลังการทดลอง ซ้ำที่ 3

ความเร็วรอบ	viscosity (cp)					
(rpm)	อ่านค่าครั้งที่1	อ่านค่าครั้งที่2	อ่านค่าครั้งที่3	อ่านค่าครั้งที่4	อ่านค่าครั้งที่5	เฉลี่ย
20	138.00	137.00	138.00	140.00	138.00	138.20
30	129.00	128.00	130.00	128.00	129.00	128.80
50	115.80	115.20	117.00	115.20	115.80	115.80
60	112.50	113.00	112.50	113.00	112.00	112.60
100	101.70	102.00	101.40	101.40	101.70	101.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.7 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า total soluble solids

สภาวะ ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
น้ำกะทิเริ่มต้น1	13.20	13.60	13.40	13.40
น้ำกะทิเริ่มต้น2	12.50	13.20	12.60	12.77
น้ำกะทิเริ่มต้น3	13.40	14.10	13.50	13.67

เวลา(นาที)	total soluble solids (%Brix)			
	ซ้ำที่1	ซ้ำที่2	ซ้ำที่3	เฉลี่ย
ค่าเฉลี่ยน้ำกะทิเริ่มต้น	13.03	13.63	13.17	13.28
น้ำกะทิหลังการทดลอง	30.30	30.10	30.40	30.27

ตาราง ค.8 การทดลองโดยใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำระเหย การหาค่า fat concentration

สภาวะ ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C

สภาวะ	%fat ของกะทิเริ่มต้น			%fat ของกะทิหลังการทดลอง		
	ถุงที่1	ถุงที่2	ถุงที่3	ถุงที่1	ถุงที่2	ถุงที่3
P80,T40-42	39.5	39.25	39.5	57.5	69.5	60.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงการคำนวณทางสถิติของค่า WICIE โดยใช้โปรแกรม SPSS

โดยการวิเคราะห์จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ค่า WICIE ของน้ำกะทิเริ่มต้น กับค่า WICIE ของน้ำกะทิที่ผ่านกระบวนการทำระเหยที่เวลาต่าง ๆ ทั้ง 3 สภาวะที่ทำการทดลอง (ภาคผนวก ค)

วิธีการวิเคราะห์ความแตกต่างของสีจากตาราง

โดยผลการวิเคราะห์จะบอกเพียงว่ามีความแตกต่างของสีหรือไม่ โดยให้พิจารณาจากตาราง Independent Samples Test ดูที่ค่า Sig. ของ F ในคอลัมน์ Levene's Test for Equality of Variances

ถ้าค่า sig. ของ F < 0.05 เลือกดูค่า t จากคอลัมน์ t-test for Equality of Means ตัวล่าง

ถ้าค่า sig. ของ F > 0.05 เลือกดูค่า t จากคอลัมน์ t-test for Equality of Means ตัวตัวบน

จากนั้นพิจารณาค่า Sig. (2-tailed) ของ t อีกครั้ง

ถ้าค่า Sig. (2-tailed) ของ t < 0.05 แสดงว่า ต่างกัน

ถ้าค่า Sig. (2-tailed) ของ t > 0.05 แสดงว่า ไม่ต่างกัน

ส่วนตาราง Group Statistics จะใช้ค่า Mean กับค่า Std. Deviation เพื่อนำมาทำเป็นตารางแสดงผลการวิเคราะห์

การกำหนดตัวแปร

time หมายถึง เวลาในการทำระเหย

wi หมายถึง ค่า WICIE ของน้ำกะทิเริ่มต้นและน้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาต่างๆ

ตาราง ง.1 การทดลองสภาวะที่ 1 ความดัน 80 mmHg, อุณหภูมิ 40-42 °C
เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 30 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	46.54	0.96	0.55
	30.00	3.00	41.93	0.99	0.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	0.0002	0.99	5.80	4.00	0.004	4.61	0.80	2.40	6.82
	Equal variances not assumed			5.80	4.00	0.004	4.61	0.80	2.40	6.82

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 60 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	46.54	0.96	0.55
	60.00	3.00	36.55	0.91	0.53

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	0.02	0.89	13.09	4.00	0.0002	9.99	0.76	7.87	12.11
	Equal variances not assumed			13.09	3.99	0.0002	9.99	0.76	7.87	12.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 90 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	46.54	0.96	0.55
	90.00	3.00	25.10	0.53	0.30

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	0.74	0.44	33.98	4.00	0.000004	21.44	0.63	19.68	23.19
	Equal variances not assumed			33.98	3.10	0.00004	21.44	0.63	19.47	23.41

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 120 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	1.00	3.00	46.54	0.96	0.55
	120.00	3.00	8.29	0.14	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	3.82	0.12	68.46	4.00	0.000003	38.25	0.56	36.70	39.80
	Equal variances not assumed			68.46	2.08	0.00016	38.25	0.56	35.94	40.57

ตาราง ง.2 การทดลองสภาวะที่ 2 ความดัน 50 mmHg, อุณหภูมิ 30-35 °C
เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 30 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	45.75	1.16	0.67
	30.00	3.00	41.83	0.35	0.20

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	2.99	0.16	5.59	4.00	0.01	3.92	0.70	1.97	5.87
	Equal variances not assumed			5.59	2.36	0.02	3.92	0.70	1.30	6.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 60 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	45.75	1.16	0.67
	60.00	3.00	36.92	0.07	0.04

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	5.86	0.07	13.13	4.00	0.00	8.83	0.67	6.96	10.70
	Equal variances not assumed			13.13	2.01	0.01	8.83	0.67	5.96	11.70

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 90 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	45.75	1.16	0.67
	90.00	3.00	30.07	0.18	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	4.62	0.10	23.09	4.00	2.09E-05	15.68	0.68	13.80	17.57
	Equal variances not assumed			23.09	2.09	0.001479	15.68	0.68	12.88	18.48

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 120 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	45.75	1.16	0.67
	120.00	3.00	14.60	0.15	0.09

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	5.05	0.09	46.01	4.00	0.00	31.15	0.68	29.27	33.03
	Equal variances not assumed			46.01	2.07	0.00	31.15	0.68	28.32	33.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.3 การทดลองสภาวะที่ 3 ความดัน 40 mmHg, อุณหภูมิ 15-20 °C

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 30 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	47.02	1.86	1.07
	30.00	3.00	39.15	0.39	0.22

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	9.41	0.04	7.19	4.00	0.00	7.87	1.09	4.83	10.90
	Equal variances not assumed			7.19	2.17	0.01	7.87	1.09	3.50	12.23

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 60 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	47.02	1.86	1.07
	60.00	3.00	25.81	1.55	0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	0.37	0.58	15.19	4.00	0.00	21.21	1.40	17.33	25.08
	Equal variances not assumed			15.19	3.88	0.00	21.21	1.40	17.28	25.13

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 90 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Wi	0	3.00	47.02	1.86	1.07
	90.00	3.00	-2.16	0.53	0.30

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	7.23	0.05	44.17	4.00	1.57E-06	49.18	1.11	46.09	52.27
	Equal variances not assumed			44.17	2.32	0.00	49.18	1.11	44.96	53.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างกะทิเริ่มต้น กับ น้ำกะทิจากการทดลองที่เวลาผ่านไป 120 นาที

Group Statistics

	time	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
wi	0	3.00	47.02	1.86	1.07
	120.00	3.00	-58.22	3.61	2.09

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
wi	Equal variances assumed	1.92	0.24	44.87	4.00	1.47E-06	105.24	2.35	98.73	111.75
	Equal variances not assumed			44.87	2.99	0.00	105.24	2.35	97.75	112.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้