



**ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับและขนาดของหยดของเหลว  
ที่ออกจากหัวฉีดแบบหมุนสำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย**  
The effects on the horizontal trajectory of droplet and droplet size  
leaving from the rotary atomizer used for a Spray dryer



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับและขนาดของหยดของเหลว ที่ออกจากหัวฉีดแบบ หมุนสำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

The effects on the horizontal trajectory of droplet and droplet size leaving from the rotary atomizer used for a Spray dryer

ผู้จัดทำ

- |             |           |              |          |
|-------------|-----------|--------------|----------|
| 1. กฤษฎา    | เจริญวงศ์ | รหัสประจำตัว | 45515969 |
| 2. นัทรชัย  | ดนตรี     | รหัสประจำตัว | 45515973 |
| 3. ทนงวิทย์ | ชูสุข     | รหัสประจำตัว | 45515977 |



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. วสันต์ คิ้วงำจันทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับและขนาดของหยดของเหลว ที่ออกจากหัวฉีดแบบหมุน  
สำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

กฤษฎา เจริญวงศ์ 45515969  
ฉัตรชัย คนตรี 45515973  
ทนนวิทย์ ชูสุข 45515977  
อ. วสันต์ คิ้วงำจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้มีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับของของเหลว โดยใช้หัวฉีดแบบหมุนสำหรับใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลวโดยปัจจัยที่เลือกศึกษาสำหรับการกระจายในแนวระดับของหยดของเหลวคือความเร็วรอบของหัวฉีดเท่ากับ 9000 , 10000 , 11000 รอบต่อนาที เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 30 , 50 , 70 มิลลิเมตร , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะเท่ากับ 2,3,4 มิลลิเมตรและจำนวนรูที่เจาะจำนวน 24 , 36 , 48 รู โดยใช้อัตราการป้อนสารละลายคงที่ที่ 0.015 ลิตรต่อวินาที ส่วนปัจจัยที่เลือกศึกษาสำหรับขนาดของหยดของเหลว คือ ความเร็วรอบของหัวฉีดโดยศึกษาที่ความเร็วรอบที่ 9000 , 10000 , 11000 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 , 20 , 30 % และอัตราการป้อนสารละลายเท่ากับ 0.01 , 0.015 , 0.02 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะเท่ากับ 3 มิลลิเมตรและจำนวนรูที่เจาะเท่ากับ 36 รู จากการทดลอง ได้สมการความสัมพันธ์คือ

1. สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับของของเหลว

$$D = -548.67438 + 0.14092 X_1 + 1.52191 X_2 - 21.20370 X_3 - 0.77572 X_4 - 6.97220 \times 10^{-6} X_1^2 - 0.01606 X_2^2 + 3.22222 X_3^2 + 0.00424 X_4^2$$

2. สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลว

$$d = 0.00040 - 1.55056 \times 10^{-7} X_1 + 0.00015 Y_2 + 0.09875 Y_3 + 6.32438 \times 10^{-12} X_1^2 - 3.73647 \times 10^{-6} Y_2^2 - 5.53493 Y_3^2 - 8.19139 \times 10^{-12} X_1 Y_2^2 + 0.00058 X_1 Y_3^2 + 1.55045 \times 10^{-13} Y_2 X_1^2 - 0.09516 Y_2 Y_3^2 - 8.71146 \times 10^{-10} Y_3 X_1^2 + 6.61095 \times 10^{-5} Y_3 Y_2^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The effects on the horizontal trajectory of droplet and droplet size leaving from the rotary atomizer used for a Spray dryer

Krissada Jaroenwong

Chatchai Dontree

Thanongwit Choosuk

Wasan Duangkhamchan: Adviser

**ABSTRACT**

This project is the study of the effects on the horizontal trajectory of droplet leaving from the rotary atomizer used for spray dryer under various operating conditions; speed of the rotary atomizer: 9000 rpm, 10000 rpm and 11000 rpm, diameter of atomizer: 30 mm., 50 mm. and 70 mm., diameter of hole: 2 mm., 3 mm. and 4 mm., a number of hole: 24, 36 and 48, feed rate with constant of 0.015 l/s, and the effects on the droplet size under various operating conditions; speed of the atomizer: 9000 rpm, 10000 rpm and 11000 rpm, concentration of feed stock solution: 10%, 20% and 30%, feed rate: 0.01 l/s, 0.015 l/s and 0.02 l/s. For the study of the effects on droplet size, the rotary atomizer with 50 mm. diameter, 3 mm. of hole diameter and 36 holes was used. From the results, we found that the relation of all factors are as follow:

$$1. D = -548.67438 + 0.14092 X_1 + 1.52191 X_2 - 21.20370 X_3 - 0.77572 X_4 - 6.97220 \times 10^{-6} X_1^2 - 0.01606 X_2^2 + 3.22222 X_3^2 + 0.00424 X_4^2$$

; for droplet trajectory

$$2. d = 0.00040 - 1.55056 \times 10^{-7} X_1 + 0.00015 Y_2 + 0.09875 Y_3 + 6.32438 \times 10^{-12} X_1^2 - 3.73647 \times 10^{-6} Y_2^2 - 5.53493 Y_3^2 - 8.19139 \times 10^{-12} X_1 Y_2^2 + 0.00058 X_1 Y_3^2 + 1.55045 \times 10^{-13} Y_2 X_1^2 - 0.09516 Y_2 Y_3^2 - 8.71146 \times 10^{-10} Y_3 X_1^2 + 6.61095 \times 10^{-5} Y_3 Y_2^2$$

; for droplet size

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี ถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ยวสันต์ คิวงคำจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ไชยรัตน์ เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้านเครื่องมือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบพระคุณขอขอบพระคุณอาจารย์ พรรณีภา ย้วยล และอาจารย์ พรประพา คงตระกูล ที่กรุณาให้ข้อมูล คำแนะนำ และอุปกรณ์ในการทดลอง ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการนี้

และขอขอบพระคุณ บิคา มารดา อันเป็นที่รักและเคารพ ซึ่งได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนคนละผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ คณะผู้เขียนขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กฤษฎา เจริญวงศ์  
ฉัตรชัย คนตรี  
ทงวิทย์ ชูสุข

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความสำคัญและที่มา	1
1.2. วัตถุประสงค์	2
1.3. ขอบเขตการทดลอง	2
1.4. วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	3
2.1. การอบแห้งแบบพ่นฝอย	3
2.2. ระบบของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	4
2.3. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	6
2.4. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 ทฤษฎีและการออกแบบชุดหัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	21
3.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับหัวฉีดแบบหมุน	21
3.2. การออกแบบชุดหัวฉีดแบบหมุน	21
3.3. ทฤษฎีและการคำนวณ	25
บทที่ 4 อุปกรณ์และการทดลอง	35
4.1. อุปกรณ์ในการทดลอง	35
4.2. การบันทึกข้อมูล	42
4.3. วิธีการทดลอง	45
บทที่ 5 ผลการทดลอง	51
5.1. ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลว	51
5.2. ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลว	58

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	68
6.1. การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลว	68
6.2. การทดลองเพื่อปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลว	69
6.3. ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก ตารางที่ใช้ในการออกแบบ	72
ภาคผนวก ข การออกแบบ	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3-1 แสดงขนาดของหัวฉีดแบบหมุนที่ใช้ในการทดลอง	23
ตารางที่ 3-2 ค่าตัวประกอบความล้า	33
ตารางที่ 4-1 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดหัวฉีดแบบหมุน	35
ตารางที่ 4-2 ปัจจัยที่ศึกษาการกระจายของหยดของของเหลว	45
ตารางที่ 4-3 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	45
ตารางที่ 4-4 ปัจจัยที่ศึกษาขนาดของหยดของของเหลว	49
ตารางที่ 4-5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	49
ตารางที่ 5-1 ผลการทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว	51
ตารางที่ 5-2 การวิเคราะห์การทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว	55
ตารางที่ 5-3 ค่าERRORระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว	56
ตารางที่ 5-4 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 1	59
ตารางที่ 5-5 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 2	60
ตารางที่ 5-6 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 3	61
ตารางที่ 5-7 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 4	62
ตารางที่ 5-8 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 5	63
ตารางที่ 5-9 ผลการทดลองเฉลี่ยขนาดของหยดของของเหลว	64
ตารางที่ 5-10 การวิเคราะห์การทดลองขนาดของหยดของของเหลว	66
ตารางที่ 5-11 ค่าERRORขนาดของหยดของของเหลว	67
ตารางที่ ก-1 แสดงความสามารถของวัสดุ	73
ตารางที่ ก-2 ค่าตัวประกอบความล้า	73
ตารางที่ ก-3 มิติมาตรฐานและแรงประมินของโรลลิง ( $C_0, C$ เป็น $kN$ )	74
ตารางที่ ก-4 ตัวประกอบของการกระแทก	74
ตารางที่ ก-5 ตัวประกอบ X และ Y รับบอลและโรลเลอร์เบริง	75

## สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 ระบบเปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	4
รูปที่ 2-2 ระบบปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	5
รูปที่ 2-3 ระบบกึ่งเปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	5
รูปที่ 2-4 ระบบปลอดเชื้อของการอบแห้งแบบพ่นฝอย	6
รูปที่ 2-5 การไหลสวนทางกัน	8
รูปที่ 2-6 การไหลไปในทิศทางเดียวกัน	8
รูปที่ 2-7 การไหลในทิศทางผสมกัน	9
รูปที่ 2-8 หอบแห้งชนิด Merrell-Soule Plant	11
รูปที่ 2-9 หอบแห้งชนิด Krause Plant	11
รูปที่ 2-10 หอบแห้งชนิด Roges Plant	12
รูปที่ 2-11 หอบแห้งชนิด Gray-Jensen Plant	12
รูปที่ 2-12 ลักษณะของหัวฉีดแบบของไหลสองชนิด	13
รูปที่ 2-13 ลักษณะของหัวฉีดแบบของไหลสองชนิด	14
รูปที่ 2-14 ลักษณะของหัวฉีดแบบใช้ความดัน	14
รูปที่ 2-15 ลักษณะของหัวฉีดแบบหมุน	15
รูปที่ 2-16 ลักษณะของไซโคลน	16
รูปที่ 3-1 การออกแบบชุดรองรับหัวฉีด	21
รูปที่ 3-2 ชุดรองรับหัวฉีด	21
รูปที่ 3-3 การออกแบบหัวฉีด	22
รูปที่ 3-4 การเจาะรูด้านข้าง	22
รูปที่ 3-5 หัวฉีดขนาดต่างๆ	24
รูปที่ 3-6 ชุดป้อนสารละลายยวดยิ่ง(ด้านหน้า)	24
รูปที่ 3-7 ชุดป้อนสารละลายยวดยิ่ง(ด้านหลัง)	25
รูปที่ 3-8 ส่วนต่างๆของเจอร์นัลแบร์ริง	25
รูปที่ 3-9 ตัวอย่างของ เจอร์นัลแบร์ริง	26
รูปที่ 3-10 ส่วนประกอบของคลัทช์ลูกปืน	26
รูปที่ 3-11 บอลแบร์ริง	27

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 4-1 ส่วนประกอบของชุดหัวฉีดแบบหมุน	35
รูปที่ 4-2 ระบบป้อนสารละลาย	36
รูปที่ 4-3 ภาพขณะทำการบรรจุวัตถุดิบ	36
รูปที่ 4-4 ปุ่ม	37
รูปที่ 4-5 วาล์วปรับอัตราการป้อนสารละลาย	37
รูปที่ 4-6 ชุดหัวฉีด	38
รูปที่ 4-7 มอเตอร์ความเร็วรอบสูง	38
รูปที่ 4-8 เพลาส่งกำลัง	38
รูปที่ 4-9 โครงสร้างชุดหัวฉีด	39
รูปที่ 4-10 ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับโครงสร้างชุดหัวฉีด	39
รูปที่ 4-11 เสื่อเบร้ง	40
รูปที่ 4-12 เบร้ง	40
รูปที่ 4.13 สวิตช์ควบคุมมอเตอร์	41
รูปที่ 4-14 แผงยึดฉลาก	41
รูปที่ 4-15 โครงยึดชุดหัวฉีด	42
รูปที่ 4-16 เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นสารละลาย(Hand-Held Refractometer)	42
รูปที่ 4-17 เครื่องวัดความเร็วรอบ	43
รูปที่ 4-18 ขนาดพื้นที่ในแผ่นใส	43
รูปที่ 4-19 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัด	44
รูปที่ 4-20 กล้องจุลทรรศน์	44
รูปที่ ข-1 โครงยึดชุดหัวฉีด	77
รูปที่ ข-2 โครงยึดชุดหัวฉีด	77
รูปที่ ข-3 โครงยึดชุดหัวฉีด	78
รูปที่ ข-4 โครงยึดชุดหัวฉีด	78
รูปที่ ข-5 แก๊สซึม	79
รูปที่ ข-6 แก๊สซึม	79
รูปที่ ข-7 โครงสร้างชุดหัวฉีด	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ ข-8 โครงสร้างชุดหัวฉีด	80
รูปที่ ข-9 ฉากยึดมุม	81
รูปที่ ข-10 ฉากยึดมุม	81
รูปที่ ข-11 ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับ โครงสร้างชุดหัวฉีด	82
รูปที่ ข-12 ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับ โครงสร้างชุดหัวฉีด	82
รูปที่ ข-13 เพลาส่งกำลัง	83
รูปที่ ข-14 เพลาส่งกำลัง	83
รูปที่ ข-15 เสือแบร์ริง	84
รูปที่ ข-16 เสือแบร์ริง	84
รูปที่ ข-17 หัวฉีด	85
รูปที่ ข-18 หัวฉีด	85



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทยมีสภาพดินฟ้าอากาศเหมาะสำหรับการทำเกษตร โดยเฉพาะการเพาะปลูกผลไม้ เช่น ทุเรียน มังคุด เงาะ กล้วยเล็บมือนาง โดยเฉพาะกล้วยเล็บมือนาง เป็นผลไม้ที่มีชื่อเสียงของจังหวัดชุมพร ซึ่งเป็นจังหวัดที่ตั้งของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร แต่ในบางครั้งหรือบางฤดูกาลเมื่อถึงเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิต ผลผลิตที่ได้จะมีมากจนเกินความต้องการของตลาด เพื่อที่จะไม่ให้ผลผลิตเสียหายเนื่องจากการออกจำหน่ายไม่ทัน ดังนั้น กลุ่มเกษตรกรจึงได้มีการนำผลผลิตที่ได้ไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปในแบบต่างๆ ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรออกไปได้ในหลายวิธี เช่น การตากแห้ง การนำไปทอด การกวน การอบแห้ง โดยเฉพาะการอบแห้ง ในปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีทางการอบแห้งมาใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เช่น เครื่องอบแห้งประเภทใช้ลมร้อน การอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีการอบแห้งเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณภาพดีสามารถเก็บไว้ได้นาน ดังนั้น จึงต้องมีเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลผลิตทางการเกษตร

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปผงละเอียด ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นส่วนผสมในการประกอบอาหาร หรือขงเป็นเครื่องดื่มได้ ซึ่งในปัจจุบันนี้ นิยมนำเทคโนโลยีนี้มาใช้สำหรับผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น สาหร่ายสาไปรู โกลน่า หรือสมุนไพรผงชนิดต่างๆ เพราะการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีข้อดีคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการน้อย เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งน้อย องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน ก็จะเกิดการสูญเสียน้อยเช่นเดียวกัน และนอกจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเป็นผงที่มีขนาดของอนุภาคที่เท่ากัน นำผลผลิตที่ได้มาใช้ได้ทั้งหมดและคุณภาพดีอีกด้วย แต่เนื่องจากการอบแห้งชนิดนี้จะมีข้อเสียคือ การใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดหัวฉีดแบบโรตารี (rotary atomizer) นั้นจะพบปัญหาซึ่งเกิดมาจากการกระจายตัวของละอองวัตถุไปติดอยู่ตรงผนังด้านในของหอบแห้ง เมื่อปะทะกับลมร้อน จึงทำให้เกิดการไหม้ติดอยู่ที่ผนังของหอบแห้งทำให้เกิดสูญเสียผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเกาะติดที่ผนังของหอบแห้ง

ดังนั้น โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดแบบโรตารี เพื่อที่จะนำไปสู่การออกแบบขนาดของหอบแห้งที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เกิดการเกาะติดของผลิตภัณฑ์ที่ผนังของหอบแห้ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อระยะเวลาการเคลื่อนที่ในแนวระดับที่มากที่สุดของหยดของของเหลว

1.2.2 ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดของหยดของเหลว

1.2.3 หาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองสำหรับการออกแบบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่น้อยที่สุด ที่จะไม่ทำให้หยดของของเหลวเกาะติดกับผนังของหอบแห้ง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างชุดหัวฉีดแบบ โรตารี เพื่อใช้ในการทดลองการกระจายของหยดของของเหลว

1.3.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของหยดของของเหลวที่มากที่สุดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู จำนวนรู และความเร็วรอบของหัวฉีดแบบ โรตารี

1.3.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหยดของของเหลวกับอัตราการป้อนสาร ความเข้มข้นของสารละลายและความเร็วรอบของหัวฉีด

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ซึ่งมีเรื่องหลักๆ อยู่ 2 เรื่องด้วยกัน คือ ลักษณะของการอบแห้ง และลักษณะของหัวฉีด ซึ่งมีรายละเอียดดังบทที่ 2 จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้ศึกษาทั้งหมดมาออกแบบของชุดหัวฉีด ขั้นตอนการสร้างชุดหัวฉีดและหัวฉีด ซึ่งมีรายละเอียดดังบทที่ 3

จากนั้นเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนในการทดลองและการบันทึกข้อมูล โดยมีรายละเอียดในบทที่ 4 ซึ่งได้กล่าวถึงอุปกรณ์ และขั้นตอนในการทดลองทั้งหมด สำหรับในบทที่ 5 ก็จะเป็นผลการทดลองทั้งหมดและบทที่ 6 เป็นบทสุดท้ายที่กล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ผลที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ และข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการนี้เพิ่มเติม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการแปรรูปวัตถุดิบ เพื่อเพิ่มมูลค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะผลิตผลทางการเกษตร เทคโนโลยีการอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบันมีมากมาย ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

#### 2.1 การอบแห้งแบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการอบแห้งที่ประยุกต์ใช้กับการแปรรูปอาหารได้ทุกประเภท ซึ่งอาหารที่ต้องการอบแห้งจะต้องอยู่ในสภาพของสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันหรือสารละลายที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่อยู่ในรูปของสารละลายของผสมระหว่างของแข็งและของเหลว (slurry) หรือของเหลวกับของเหลว (emulsion) หลักการทำแห้งจะดำเนินการโดยการนำสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวหรืออาจอยู่ในสภาพของสารละลาย เจล (gel) จะถูกดูดโดยปั๊มส่งผ่านไปที่หัวฉีดซึ่งหัวฉีดหมุนอยู่ทำให้ของเหลวที่ออกจากหัวฉีดแตกตัวเป็นอนุภาค (particle) หรือละอองฝอย (droplets) จะกระจายตัวอยู่ในหอบแห้งและจะมีลมร้อนไหลผ่านมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารทำให้เกิดการระเหยของน้ำบนผิวของอนุภาคได้รวดเร็วซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นในช่วงประมาณ 1-10 วินาทีเท่านั้น ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ออกมาในสภาพเป็นเม็ดเล็กๆหรือเป็นผงการอบแห้งแบบนี้จะได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ดีหรือไม่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการทำของเหลวแตกตัวเป็นละอองเล็กๆและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับอากาศเป็นสำคัญ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำของเหลวแตกตัวคือหัวฉีด(atomizer)ซึ่งมีหลายแบบ เช่น สเปรย์นอซเซิล (spray nozzle) และหัวฉีดแบบใช้แรงเหวี่ยง (centrifugal atomizer) เป็นต้น (Foust, et. Al.1980)

ประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบพ่นฝอยนอกจากจะขึ้นกับความสามารถในการทำของเหลวแตกตัวได้ดีแค่ไหน ลักษณะและทิศทางของการสัมผัสระหว่างละอองของเหลวกับก๊าซร้อนก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นกับจุดประสงค์ของการอบแห้งแบบพ่นฝอยและลักษณะของสารที่จะอบแห้ง การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงมาก ถ้าทิศทางการไหลของก๊าซเหมาะสมก็จะทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดได้เร็วขึ้น ทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซภายในห้องอบแห้งแบ่งออกได้ 5 แบบคือ

1. เคลื่อนที่ขนานตามแนวราบกับละอองของเหลว (Horizontal cocurrent) ก๊าซร้อนจะถูกพ่นออกจากด้านข้างส่วนบนของหอบแห้งพร้อมกับละอองของเหลว
2. เคลื่อนที่ลงขนานตามแนวตั้งกับละอองของเหลว (Vertical downward cocurrent) ก๊าซร้อนและละอองของเหลวถูกพ่นออกจากด้านบนของหอบแห้งแล้วไหลออกทางด้านล่าง
3. เคลื่อนที่ขึ้นขนานตามแนวตั้งกับละอองของเหลว (Vertical upward cocurrent) ก๊าซร้อนและละอองของเหลวถูกพ่นออกจากด้านล่างของหอบแห้ง ก๊าซร้อนขึ้นจะไหลออกทางด้านบนส่วนผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ตกลงมาออกทางด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เคลื่อนที่สวนทางตามแนวตั้งกับละอองของเหลว(Vertical counter co-current) ละอองของเหลวจะถูกพ่นออกด้านบนของหอบแห้ง ส่วนก๊าซร้อนถูกพ่นออกจากด้านล่างของหอบแห้ง ส่วนก๊าซร้อนถูกพ่นออกทางด้านล่าง ไหลสวนทางกับละอองของเหลวก๊าซร้อนขึ้นจะไหลออกทางด้านบน ส่วนผลิตภัณฑ์จะออกทางด้านล่าง

5. เคลื่อนที่แบบผสม(Mixed flow หรือ Complex vertical downward co-current) พ่นก๊าซร้อนเข้าทางด้านข้างก่อนไปทางส่วนบนของหอบแห้ง ละอองของเหลวถูกพ่นออกจากด้านบนมีเครื่องดูดอากาศออกทางด้านบนทำให้ก๊าซร้อนเกิดการผสมวนเวียนกับละอองภายในหอบแห้ง (พรศักดิ์และสมยศ, 2533)

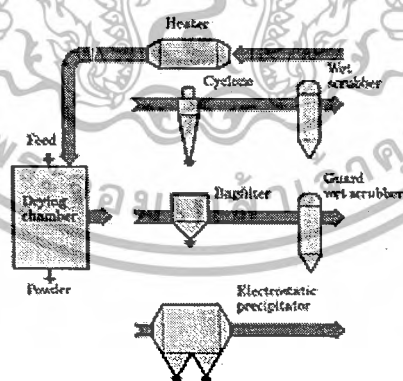
อย่างไรก็ตาม การเลือก ภาวะการอบแห้งจะต้องพิจารณาถึงสภาวะที่มีการผลิตที่ประหยัด คุ่มค่าต่อการลงทุนและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามต้องการ หรืออีกในหนึ่งคือ ต้องให้มีอัตราการระเหยที่สูงสุดมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงสุดและต้องสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคให้มีขนาดที่เท่ากันได้ตามต้องการด้วย นอกจากนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วย

## 2.2 ระบบของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ระบบของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท

### 2.2.1 ระบบเปิด

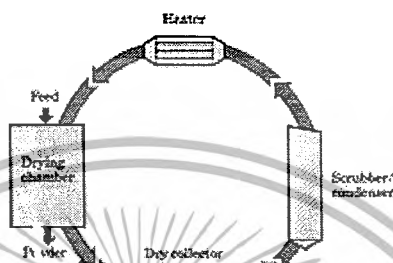
เป็นระบบที่อากาศที่ใช้ในการอบแห้งถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก (รูปที่ 2-1) เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในระดับโรงงานส่วนใหญ่จะใช้ระบบเปิด โดยที่การทำความร้อนของอากาศใช้ทั้งแบบทำความร้อนโดยตรงและทางอ้อม ซึ่งก่อนที่จะปล่อยออกสู่ภายนอกระบบ อากาศขาออกจะต้องผ่านการทำความสะอาดหรืออุปกรณ์แยกผงด้วยไซโคลน กุ้งลม หรือเครื่องดักเก็บฝุ่น



รูปที่ 2-1 ระบบเปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.2.2 ระบบปิด

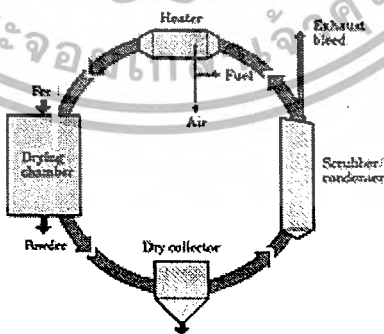
ระบบการอบแห้งประเภทนี้จะใช้อากาศหมุนเวียน โดยไม่ให้ออกสู่บรรยากาศภายนอก (รูปที่ 2-2) ดังนั้น อากาศที่ใช้ในการอบแห้งจึงใช้ก๊าซจำพวกก๊าซเฉื่อยเช่น ก๊าซไนโตรเจน เป็นต้น ระบบการอบแห้งแบบนี้ใช้สำหรับอบแห้งวัสดุที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์หรือวัสดุจำพวกที่ไม่สามารถสัมผัสก๊าซออกซิเจนได้ในระหว่าง การอบแห้ง ระบบต้องป้องกันการรั่วไหลของก๊าซและอนุภาคผง และถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความปลอดภัยในระดับมาตรฐานอย่างเคร่งครัด



รูปที่ 2-2 ระบบปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.2.3 ระบบกึ่งเปิด

ระบบนี้ประกอบด้วยระบบหมุนเวียนบางส่วน (รูปที่ 2-3) โดยที่หมุนเวียนอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง 60% วนกลับมาใช้ใหม่ร่วมกับอากาศร้อนที่ผ่านเครื่องทำความร้อนที่ทางเข้าของหอบแห้ง ส่วนอากาศร้อนขาออกที่เหลือนั้น จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ

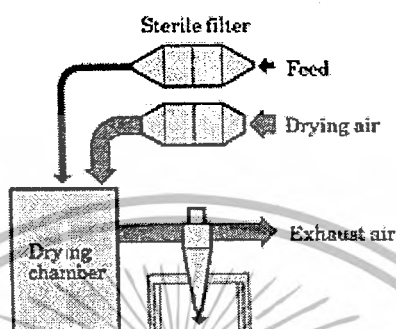


รูปที่ 2-3 ระบบกึ่งเปิดของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 ระบบปลอดเชื้อ

เนื่องจากว่าระบบนี้เป็นระบบที่ต้องการการปลอดเชื้อในกระบวนการผลิตทั้งหมด (รูปที่ 2-4) ฉะนั้น ไม่ว่าจะเป็ระบบการป้อนสาร ระบบการดูดอากาศภายนอกจะต้องผ่านการฆ่าเชื้อก่อน กระบวนการสร้างเครื่องก็ต้องอยู่ภายใต้มาตรฐานอย่างเคร่งครัด



รูปที่ 2-4 ระบบปลอดเชื้อของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

## 2.3 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.3.1 หลักการพื้นฐานของการอบแห้งแบบพ่นฝอย

เมื่ออาหารเหลวถูกฉีดเป็นละอองและสัมผัสกับอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งจะทำให้ น้ำในอาหารระเหยไปอย่างรวดเร็ว จากนั้นผงของอาหารแห้งจะตกลงมาแล้วถูกแยกออกจากลมร้อนเพื่อนำไปบรรจุต่อไป กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

#### 2.3.1.1 การทำของเหลวให้มีอนุภาคขนาดเล็กหรือหยดของเหลว (atomization)

การทำของเหลวให้มีอนุภาคเล็กๆ หรือหยดของเหลวเป็นหัวใจหลักของการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพราะจะเป็นตัวทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการระเหยเพิ่มมากขึ้นซึ่งถ้ามีพื้นที่ผิวสูงก็จะสามารถระเหยน้ำออกจากอาหารได้รวดเร็ว และเป็นตัวทำให้เกิดอนุภาคเล็กๆ ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเฉพาะทั้งขนาด รูปร่าง ตลอดจนความหนาแน่น เมื่อของเหลวมีขนาดเล็กลงจะเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนได้มาก ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

หน้าที่ของการอะตอมไมเซชันคือ ก่อให้เกิดหยดเล็กๆ (small droplets) ซึ่งจะได้พื้นที่ผิวสำหรับการระเหยความชื้นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ไปยังเครื่องอบแห้ง ตัวอะตอมไมเซอร์จะส่งของเหลวไปยังกระแสอากาศในลักษณะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และให้ขนาดของหยดของเหลวที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้ขนาดของอนุภาคผลิตภัณฑ์แห้งตามต้องการหลังสิ้นสุดกระบวนการ ตัวอะตอมไมเซอร์ที่ใช้ในเครื่องอบแห้งมีหลายชนิด Tate(1965) ได้จำแนกออกเป็น 4 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) เซนทรีฟิวกัลปี เพรสเชอร์ โนซเว็ด (centrifugal pressure nozzles) จำเป็นต้องใช้ความดันในการอัดของเหลวผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ (orifice) แล้วเกิดแผ่นของเหลวขึ้นซึ่งจะแตกออกเป็นหยดเล็ก ๆ ตามต้องการสำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องโนซเซิลนี้จะทำให้เกิดแผ่นของเหลวลักษณะเป็นกรวย ซึ่งเกิดจากการบีบของเหลวให้ไหลผ่านช่องเปิดวงแหวนแคบๆ ซึ่งเป็นแบบ สเวิร์ล สเปรย์ โนซเซิล (swirl spray nozzle)

(2) แฟน-สเปรย์ โนซเซิล (fan-spray nozzle) ใช้ทำให้เกิดหยดของเหลวโดยการกระทบกระแทกของเหลวบนช่องเปิดเล็ก ๆ (orifice) ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้เกิดแผ่นของเหลวในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของกระแสของเหลว แผ่นบางๆของของเหลวจะเกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นหยดของเหลว แฟน-สเปรย์ โนซเซิล จะทำงานได้ดีที่สุดที่ความดันสูง และมีมุมของการพ่นกว้างมาก

(3) ทู-ฟลูอิด อะตอมไมเซอร์ (two-fluid atomizer) จะใช้กระแสก๊าซความร้อนสูงเพื่อให้เกิดการกระทบกระแทกของเหลวความเร็วต่ำ แล้วแตกออกเป็นหยดของเหลวเล็ก ๆ การกระทบ (impingement) ของของเหลวในกระแสก๊าซจริงๆอาจเกิดขึ้นในตัวอะตอมไมเซอร์ โดยทั่วไปตัวอะตอมไมเซอร์เหล่านี้ มักจะใช้มากและอาจจะไม่ประหยัดก็ความจุ (capacities) สูง หยดของเหลวละเอียดเล็ก ๆ สามารถขึ้นที่อัตราการไหลต่ำและใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง

(4) ตัวอะตอมไมเซอร์แบบโรตารี (rotary atomizers) จะใช้แรงเหวี่ยงให้เกิดแผ่นของเหลว ซึ่งแตกออกเป็นหยดตามต้องการ ของเหลวจะส่งเข้าไปยังผิวที่หมุนและเคลื่อนผ่านผิวเพื่อให้เกิดแผ่นบางที่เส้นรอบวง เนื่องจากแรงที่ทำให้เกิดแผ่นของเหลวขึ้นกับความเร็วของการหมุนโดยตรง ตัวอะตอมไมเซอร์ชนิดนี้สามารถใช้กับอัตราป้อน และคุณสมบัติของเหลวต่างๆได้ในช่วงกว้างขนาดของหยดของเหลวจริงๆจะขึ้นกับความเร็วของจานและอัตราการป้อน

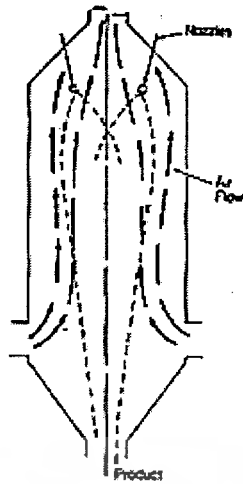
### 2.3.1.2 การสัมผัสระหว่างละอองหยดของเหลวกับอากาศร้อน

ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิของอาหารจะสัมผัสกับอากาศร้อนหรือตัวกลางที่จะให้ความร้อนเพื่อให้น้ำในอาหารเหลวรับความร้อนจากอากาศร้อนทำให้เกิดการระเหยน้ำออกไป การกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงมาก ถ้าทิศทางการไหลของอากาศเหมาะสมก็จะทำให้การอบแห้งคุณภาพและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การสัมผัสระหว่างอนุภาคอาหารกับอากาศร้อนแบ่งได้ 4 แบบคือ

#### (1) ชนิดกระแสสวนทางกัน(counter-current)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดกระแสสวนทางกัน ของเหลวจะถูกพ่น (atomized) ไกลกับส่วนบนของห้องอบแห้ง (drying chamber) และตกลงมา ขณะที่อากาศจะนำเข้าสู่เครื่องใกล้กับด้านล่างของห้องอบแห้ง และเคลื่อนสู่ด้านบนผ่านหยดของเหลว (liquid droplets) ผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะออกจากด้านล่างของห้อง ขณะที่อากาศจะถูกจำกัดใกล้ส่วนบนของห้องอบแห้ง อากาศที่เข้าซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง จะสัมผัสโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ซึ่งแห้งหรือเกือบแห้ง แต่ข้อเสียของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงเนื่องจากความร้อนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ อัตราการไหลของอากาศต้องค่อนข้างต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงผลิตภัณฑ์ติดไปกับอาหาร ในปริมาณมาก เมื่ออากาศถูกกำจัดออกไปที่ด้านบนของห้องอบแห้ง

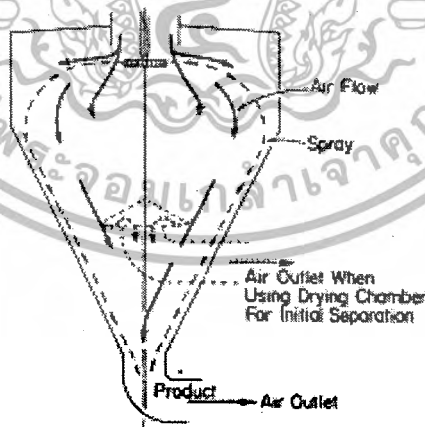
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-5 การไหลสวนทางกัน

(2) ชนิดกระแสตามกัน (co-current spray dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดกระแสตามกัน จะมีการผสมอากาศที่เข้ากับหยดของเหลวที่เกิดขึ้นใหม่ที่เครื่องอะตอมไมเซอร์ (atomizer) หลังจากการผสมตอนต้นแล้ว ผลิตภัณฑ์และอากาศจะเคลื่อนไปทิศทางเดียวกันขณะที่ขบวนการทำแห้งดำเนินต่อไป ผลิตภัณฑ์และอากาศส่วนใหญ่จะออกจากห้องอบแห้งที่ทางออกด้านล่างและเคลื่อนไปยังระบบแยก (separation system) การจับตัวเช่นนี้จะดีที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวความร้อน เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหลวจะสัมผัสกับอากาศเข้าที่อุณหภูมิสูงและผลิตภัณฑ์แห้งจะสัมผัสกับอากาศหลังจากอุณหภูมิลดลงอย่างมาก



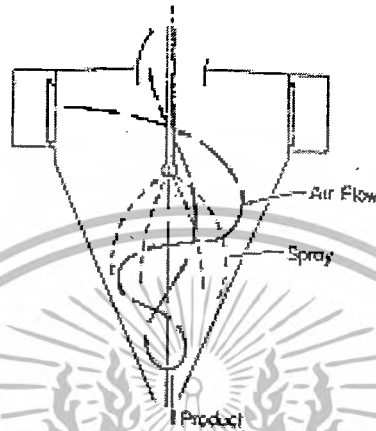
รูป 2-6 การไหลไปในทิศทางเดียวกัน

(3) ชนิดที่มีการไหลผสมกัน (mixed flow pattern)

การไหลของผลิตภัณฑ์และอากาศผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดที่มีการผสมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่องด้วยอะตอมไมเซอร์ที่อยู่ใกล้กับศูนย์กลางของห้องอบแห้ง อากาศที่เข้าส่วนบนจะเคลื่อนลงมาด้านล่างของห้องอบแห้ง ซึ่งจะสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนไปยังช่องอากาศออก ผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องทางออกใกล้กับส่วนล่างของห้องอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องสูงอาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงนี้แต่ระบบนี้จะมีสามารถในการระเหยต่อหน่วยปริมาณสูง



รูปที่ 2-7 การไหลในทิศทางผสมกัน

#### (4) ชนิดการไหลขนานกัน (parallel flow)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีการไหลขนานกัน การไหลของผลิตภัณฑ์และอากาศค่อนข้างจะเป็นเส้นสม่ำเสมอ จากด้านบนสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งที่แคบ ผลิตภัณฑ์และอากาศจะออกจากห้องอบแห้งด้วยกัน แล้วเคลื่อนไปยังส่วนที่แยกของระบบ ลักษณะของเครื่องอบแห้งนี้จะแตกต่างจากชนิดกระแสไหลตามกันคือความเร็วลมที่ใช้สูง ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่เข้าสูง ความเร็วลมนี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 2-3 เมตร/วินาที

#### 2.3.1.3 การระเหย

การระเหยของน้ำออกจากอนุภาคอาหารที่ถูกพ่นฝอยเกิดขึ้นจะมีการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร การระเหยน้ำจะเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่เป็นส่วนมาก กระบวนการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นคั้งนี้คือ อนุภาคถูกทำให้ร้อนขึ้นหรืออุณหภูมิสูงขึ้นโดยการนำความร้อนและการพาความร้อนที่ผิวของอนุภาคแล้วเปลี่ยนอยู่ในรูปของความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ จากนั้นส่วนของไอน้ำจะถูกถ่ายโอนมวลให้อากาศโดยการแพร่และโดยการพาออกไปจากผิวหนังของอนุภาคไปกับความร้อน อัตราการระเหยน้ำจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศร้อน ความชื้นสัมพัทธ์หรือความดันไอ และคุณสมบัติในการถ่ายโอนของอากาศ ขนาดอนุภาค อุณหภูมิของอนุภาค ความเร็วลมของอากาศร้อน ตลอดจนคุณลักษณะหรือองค์ประกอบของส่วนประกอบที่เป็นของแข็งในอนุภาคด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marshall (1997) อธิบายกลไกการถ่ายโอนความร้อนและการสลายไออนมวลสารที่เกิดขึ้นที่รอบผิวหน้าของอนุภาคในขณะเกิดการระเหยน้ำ โดยแสดงอยู่ในรูปของตัวเลขไร้มิติของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสารขณะที่อนุภาคทรงกลมอยู่นิ่ง ดังนี้

$$Nu = 2.0 \quad (2-1)$$

$$Sh = 2.0 \quad (2-2)$$

แต่ในสภาพความเป็นจริง การเกิดการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อนจะเกิดในสภาพอากาศร้อนที่ไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) รอบๆอนุภาค ดังนั้น อัตราการระเหยจะแปรผันตามความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคกับอากาศ ซึ่งเนื่องมาจากเกิดการพาความร้อนที่เกิดขึ้นกับระบบอนุภาคนั้นด้วย ดังนั้น ตัวเลขไร้มิติจึงแสดงตามสมการที่

$$Nu = 2 + K_1 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2-3)$$

$$Sh = 2 + K_2 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2-4)$$

เมื่อ

$K_1, K_2$  = ค่าคงที่มีค่าตั้งแต่ 0.3-0.6

แรงขับเคลื่อน (driving force) ของความชื้นที่ระเหยในบริเวณผิวที่อิมตัวของอนุภาคจะเท่ากับความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำที่อุณหภูมิที่ผิวของอนุภาคกับความดันย่อยของไอน้ำในอากาศที่อยู่รอบๆอนุภาค ( $P_{ws} - P_w$ ) แรงขับเคลื่อนนี้แสดงได้ในเทอมความชื้นที่ผิวที่อิมตัว ( $H_{sat}$ ) กับความชื้นของอากาศ  $H_a$  ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นที่ผิวที่อิมตัวคือ

$$\frac{dW}{dt} = k_g A_p (H_{sat} - H_a) \quad (2-5)$$

หรือ

$$\frac{dW}{dt} = k_g A_p (P_{ws} - P_w) \quad (2-6)$$

สำหรับสมดุลพลวัต (dynamic equilibrium) อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลสารคูณกับความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอ ( $\lambda$ ) ดังนั้นความสัมพันธ์ของสมการที่

$$\frac{dQ}{dt} = hA_p (T_a - T_w) = \left(\frac{dW}{dt}\right) \lambda \quad (2-7)$$

### 2.3.1.4 การแยกอาหารผงจากระบบทำแห้ง (dry product recovery)

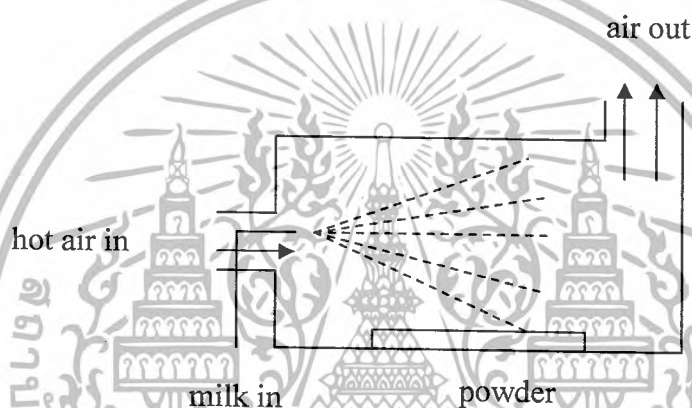
หลังจากอาหารผงตกสู่พื้นล่างของห้องอบแห้ง อนุภาคจะมีน้ำหนักเบาและจะถูกดูดออกไปโดยแรงจากพัดลมส่งออกมาตามท่อลมขาออก อาหารแห้งนี้สามารถแยกออกจากอากาศร้อนด้วยเครื่องคัดแยกด้วยระบบไซโคลน (cyclone separator) ซึ่งสามารถแยกเอาอากาศกับอนุภาคของแข็งออกจากกันได้ โดยอาศัยแรงเหวี่ยงและการถ่ายโอนโมเมนตัม ข้อดีของวิธีนี้คือมีการสูญเสียผลิตภัณฑ์น้อย การปนเปื้อนจากอากาศภายนอกมีน้อยสามารถใช้ได้ดีทุกๆอุณหภูมิ ต้นทุนต่ำและการดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก

## 2.3.2 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

### 2.3.2.1 หอบแห้ง

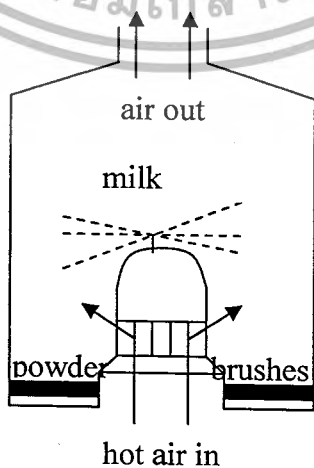
หอบแห้งเป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย การออกแบบขนาดและรูปร่างต้องพิถีพิถันให้ได้พอเหมาะกับการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างอากาศร้อนกับละอองของเหลวต้องมีระยะทางที่อากาศร้อนจะสัมผัสละอองของเหลวพอดีที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแห้งพอดี ทางเข้าและทางออกของอากาศร้อนและของเหลวที่จะอบแห้งจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยตัวอย่างของหอบแห้งประเภทที่แบ่งตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนแสดงดังต่อไปนี้

(1) **Merrel-Soule Plant** ลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า อากาศร้อนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ขนานกับระอองของเหลว อากาศร้อนขึ้นจะไหลออกทางด้านตรงข้ามทางส่วนบนของห้อง ส่วนผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ออกจากด้านล่างของหอบแห้ง ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 หอบแห้งชนิด Merrel-Soule Plant

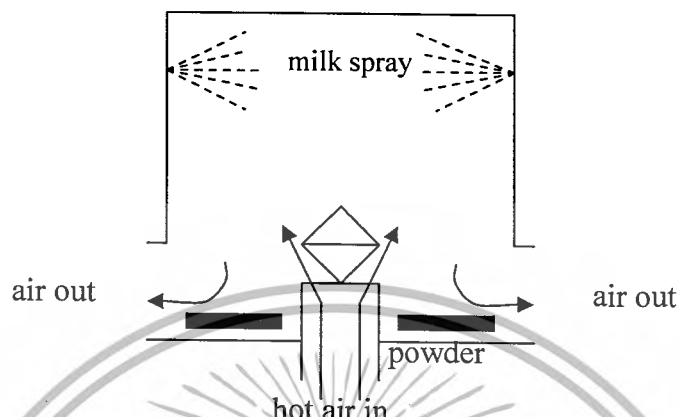
(2) **Krause Plant** ลักษณะของหอบแห้งจะคล้ายรูปประฆัง การเคลื่อนที่ของอากาศร้อนจะขนานกับละอองของเหลวเช่นกัน แต่จะเป็นแบบที่ขึ้นตามแนวตั้ง โดยอากาศร้อนและละอองของเหลวถูกพ่นออกจากส่วนล่างของหอบแห้ง อากาศร้อนขึ้นไหลออกทางด้านข้างส่วนล่างของหอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 หอบแห้งชนิด Krause Plant

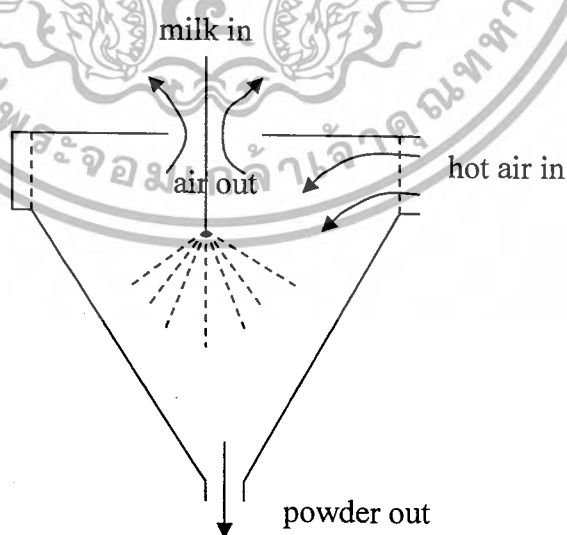
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) **Roges Plant** ลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า หัวฉีดละอองของเหลวอยู่ทางด้านข้างส่วนบนของห้อง อากาศร้อนพุ่งขึ้นจากส่วนล่างของห้องไหลสวนทางกัน อากาศร้อนขึ้นไหลออกทางด้านข้างส่วนล่างของห้องคองแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 หอบแห้งชนิด Roges Plant

(4) **Gray-Jensen Plant** ลักษณะหอบแห้งเป็นรูปกรวย หัวฉีดอยู่ส่วนบนของหอบแห้ง อากาศร้อนเข้าทางด้านข้างส่วนบนไหลขนานกับละอองของเหลวและอากาศร้อนขึ้นถูกดูดออกตรงกลางด้านบนของห้องเกิดผสมกัน ดังรูปที่ 2-11



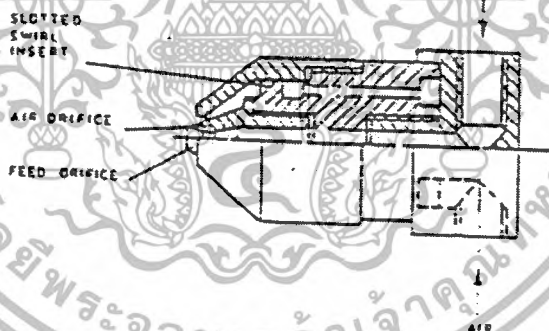
รูปที่ 2-11 หอบแห้งชนิด Gray-Jensen Plant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

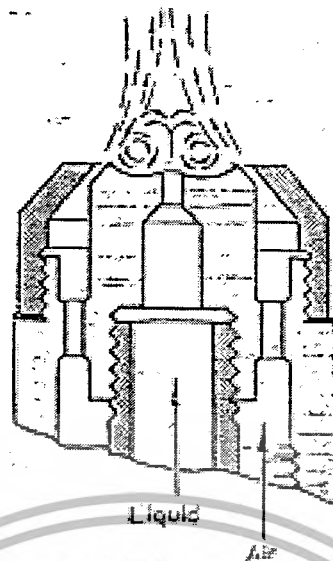
### 2.3.2.2 หัวฉีด (Atomizer)

หัวฉีดเป็นส่วนประกอบที่เป็นหัวใจหลักในการอบแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะอาศัยหลักการของการถ่ายโอนอย่างรวดเร็วให้กับละอองของเหลว ดังนั้น หัวฉีดจะต้องทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อที่จะทำให้พื้นที่ผิวของของเหลวสัมผัสกับอากาศร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้การอบแห้งเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและได้ผลิตภัณฑ์ผงที่มีคุณภาพดี หัวฉีดที่ใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งต้องมีคุณสมบัติเฉพาะตัวหลายประการและต้องมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งหัวฉีดที่ใช้ในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยทั่วไปแบ่งออกได้ดังนี้

(1) หัวฉีดแบบของไหลสองทาง (two-fluid nozzle) ดังแสดงในรูปนิยามใช้กับการอบแห้งที่ต้องการอัตราการอบแห้งต่ำๆ การแตกตัวของของเหลวโดยหัวฉีดแบบนี้อาศัยการแตกตัวโดยการอัดอากาศภายใต้ความดันเข้าไปตีให้ของเหลวเกิดแตกตัวซึ่งโดยทั่วไปหัวฉีดแบบนี้จะประกอบไปด้วย 2 หัวฉีดย่อยคือ หัวฉีดอากาศ และหัวฉีดของเหลว ลักษณะทำงานในกรณีความดันของอากาศต่ำๆ ประมาณ 10 psig อากาศจะแทรกตัวไปในลำของเหลวทำให้เกิดฟองเล็กๆและแตกตัวเป็นละอองหรือหยดเล็กๆส่วนที่กรณีที่มีความดันสูงๆ ประมาณ 60 psig ของเหลวจะถูกพ่นออกเป็นลำเล็กๆ ซึ่งเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีความดันสูงจะทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองเล็กๆมากมาย โดยทั่วไปความดันอากาศในหัวฉีดอากาศจะใช้กันที่ 30 psig หัวฉีดแบบนี้นิยมใช้ในการอบแห้งพวกผลิตภัณฑ์ยา และเซรามิก เป็นต้น

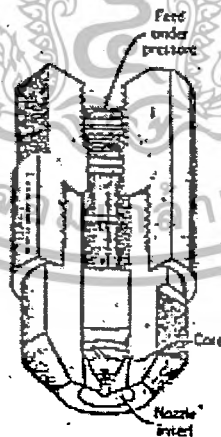


รูปที่ 2-12 ลักษณะของหัวฉีดแบบของไหลสองชนิด



รูปที่ 2-13 ลักษณะของหัวฉีดแบบของไหลสองชนิด

(2) หัวฉีดแบบใช้ความดัน (pressure nozzle) ดังแสดงในภาพเป็นหัวฉีดที่ใช้สำหรับการอบแห้งที่มีกำลังผลิตมากๆ และสามารถทำให้ละอองของเหลวมีขนาดสม่ำเสมอ มากกว่าหัวฉีดแบบแรก (มีขนาดตั้งแต่ 120 – 250 ไมโครเมตร) หัวฉีดแบบนี้อาศัยหลักการฉีดของเหลวภายใต้ความดันซึ่งอาจจะสูงตั้งแต่ 1,000 ถึง 7,000 psig ประกอบด้วยแกนและหัวฉีดเป็นรูเล็กๆ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-5 มิลลิเมตรของเหลวจะทำให้หมุนรอบแกนด้วยความเร็วสูงมาก ภายใต้ความดันของเหลวจะถูกเหวี่ยงออกจากหัวฉีดเป็นละอองเล็กๆ หัวฉีดแบบนี้สามารถพ่นน้ำ

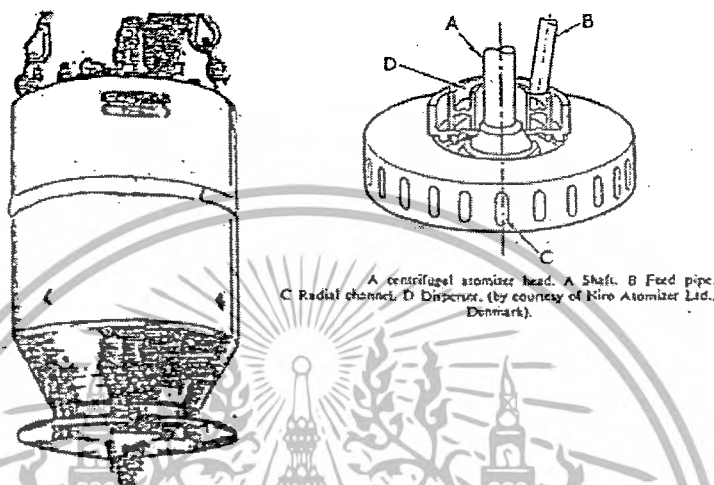


รูปที่ 2-14 ลักษณะของหัวฉีดแบบใช้ความดัน

(3) หัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer) ดังแสดงในภาพ หัวฉีด 2 แบบแรกจะประยุกต์ใช้กับของเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) แต่ในหัวฉีดแบบที่ 3 นี้สามารถประยุกต์ใช้กับของเหลวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ ลักษณะของหัวฉีดจะคล้ายกับจานหมุน ซึ่งสามารถหมุนด้วยความเร็ว 6,000-20,000 รอบต่อนาที จะให้ละอองที่มีขนาดเดียวกัน โดยไม่ต้องใช้ความดันสูง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหัวฉีดแบบนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของเหลวที่ต้องการอบแห้งด้วยเช่น ความหนืด หรือความเข้มข้นของของเหลว เป็นต้น ของเหลวจะถูกทำให้มีความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ บนจานหมุนจนมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเกินขอบเขตก็ จะถูกเหวี่ยงหลุดออกจากจานหมุนเป็นละอองเล็กๆ (ขนาดประมาณ 30-120 ไมโครเมตร)



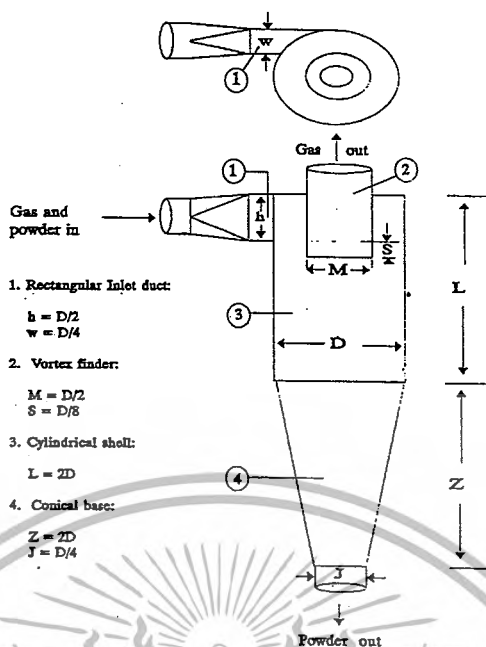
รูปที่ 2-15 ลักษณะของหัวฉีดแบบหมุน

### 2.3.2.3 แหล่งให้ความร้อน

แหล่งให้ความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีอยู่หลายลักษณะด้วยกันอาทิ เช่น การให้อากาศหรือของไหลตัวกลางไหลผ่านขดลวดความร้อนทำให้อากาศมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือการให้อากาศไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนกระทั่งอากาศมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

### 2.3.2.4 อุปกรณ์กักแยกด้วยไซโคลน

หลักการทำงานของไซโคลน (ภาพที่ 2-16) คือ เมื่อมีอากาศร้อนและผลิตภัณฑ์ผงไหลเข้าสู่ไซโคลนด้วยความเร็วสูงจะเกิดแรงเหวี่ยงไปกระทำต่ออนุภาคของผลิตภัณฑ์ผง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นเกลียวรอบๆ แกนกลางของไซโคลน อนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ด้วยแรง 2 อย่างคือ แรงเหวี่ยงที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนออกไปหาผนังของไซโคลนและขณะเดียวกันก็จะมีแรงชักนำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของการหมุนด้วยแรงนี้ก็คือ แรงสู่ศูนย์กลางนั่นเอง



รูปที่ 2-16 ลักษณะของไซโคลน

เมื่ออนุภาคและอากาศเข้าไปอยู่ในไซโคลนแล้ว ความเร็วจะค่อยๆ ลดลง ทำให้มีการหมุนเป็นเกลียวลงมายังด้านล่างจนถึงส่วนล่างของกรวย เมื่อความเร็วลดลงมากๆ จะทำให้อนุภาคตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักในตัวเองและถูกรวบรวมออกไปทางช่องทางด้านล่างนั้น ส่วนกระแสอากาศที่แยกอนุภาคออกไปแล้วก็จะรวมตัวกันหมุนวนกลับขึ้นไปข้างบนตามแกนของไซโคลนแล้วออกไปช่องทางอากาศออก ลักษณะการหมุนทั้ง 2 แบบนี้จะเป็นในแนวเดียวกัน ทำให้สามารถแยกอนุภาคและอากาศออกจากกัน

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีตัวแปรที่สามารถเลือกสภาวะการใช้งานได้หลายค่าทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่มีคุณภาพแตกต่างกันไป เพื่อให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตรงตามความต้องการ ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.3.3.1 การทำให้เกิดอนุภาค

การทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราการป้อนคงที่สามารถทำได้โดยการเพิ่มพลังงานเข้าไปยังระบบ อาทิเช่น เพิ่มความเร็วรอบของหัวฉีด เพิ่มความดันของอากาศ เพิ่มอัตราส่วนการไหลระหว่างอากาศกับของเหลวในหัวฉีด ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กละเอียดมากๆ ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่น

สูง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดช่องว่างได้น้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

### 2.3.3.2 คุณสมบัติของอาหารเหลว

ในสภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่ ถ้าปริมาณของแข็งในอาหารเหลวเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ เมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการระเหยของน้ำคงที่ ทำให้อัตราส่วนความชื้นต่อของแข็งที่เหลืออยู่จะน้อยกว่ากรณีที่อาหารเหลวมีปริมาณของแข็งน้อย ผลที่ได้ตามมาก็คือ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นลดลง ของแข็งที่ป้อนต้องมีปริมาณที่เหมาะสม ถ้ามากเกินไปก็อาจจะไม่สามารถพ่นฝอยได้ หรือไม่สามารถคู่ผ่านเครื่องปั๊มของเหลวได้ อาจจะทำให้เกิดการเกาะติดที่ผนังหอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมสภาพ ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวที่ป้อนจะช่วยลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ลงได้

### 2.3.3.3 อัตราการป้อน

การเพิ่มอัตราการป้อนในขณะที่สภาวะของหัวฉีดคงที่ มีผลทำให้อนุภาคที่พ่นฝอยมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดอนุภาคใหญ่และมีความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ต่ำ ในขณะเดียวกัน การเพิ่มอัตราการป้อนในขณะที่อัตราการไหลของอากาศร้อนขาเข้าและปริมาณความร้อนที่ให้ระบบคงที่มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากตัวอย่างเพิ่มขึ้นในขณะที่ระบบสามารถระเหยน้ำออกไปได้ในอัตราคงเดิม

### 2.3.3.4 ชนิดของหัวฉีด

หัวฉีดชนิดจานหมุนและหัวฉีดชนิดใช้ความดันที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการออกแบบและลักษณะเฉพาะของการใช้งาน อย่างไรก็ตามหัวฉีดชนิดจานหมุนจะสามารถใช้งานได้ทั่วไปคือ สามารถผลิตอนุภาคได้ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการผลิตได้สูงมากกว่า 5 ตันต่อชั่วโมง ส่วนหัวฉีดชนิดใช้ความดันสามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ในหัวฉีดแต่ละชนิดจะมีอุปกรณ์หลายส่วนที่สามารถออกแบบให้ใช้งานได้แตกต่างกันไป และทำให้ได้ลักษณะของอนุภาคที่พ่นฝอยที่แตกต่างกันเช่น หัวฉีดแบบหมุนสามารถออกแบบระยะห่างของครีบบ จำนวนครีบบ ความสูง ความกว้างของครีบบ เป็นต้น

### 2.3.3.5 การไหลของอากาศ

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศมีผลกระทบต่อเวลาของอนุภาคที่อยู่ในหอบแห้งหรือเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยตรง ถ้าลดอัตราการไหลของอากาศลงจะทำให้เวลาที่อนุภาคอยู่ในหอบแห้งเพิ่มขึ้นหรือเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น และทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้มีสภาวะอัตราการไหลของอากาศต่างๆ ช่วยทำให้การแยกผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

### 2.3.3.6 อุณหภูมิในการอบแห้ง

อุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอุณหภูมิของอากาศออกคือที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศคงที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอนุภาคที่จะระเหยออกไป ทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง หรืออีกนัยหนึ่งปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 1 กิโลกรัมมีค่าลดลง

#### 2.4. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Kessler (1967) ได้ศึกษาการหาขนาดหอบแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า การคำนวณหาขนาดที่ถูกต้องของหอบแห้งแบบพ่นฝอยทำได้ลำบาก ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1-0.5 เมตรต่อวินาที โดยอนุภาคที่ถูกพ่นฝอยออกมาจะต้องไม่เกาะติดผนังของหอบแห้ง ขนาดของความสูงของหอบแห้งหาได้จากการประมาณเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยการประมาณค่าความเร็วสัมพัทธ์ของอนุภาคกับอากาศในหอบแห้งและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกพ่นฝอยเพิ่มขึ้น ขนาดความสูงของหอบแห้งจะมากขึ้นด้วย

Gauvin, Katta (1976) ได้ศึกษาแนวความคิดพื้นฐานในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการทดลองเก็บข้อมูลกับแนวความคิดทางทฤษฎี เสนอเป็นวิธีการพัฒนาในการออกแบบ โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งคูณความสูงเท่ากับ 1.22x1.81 เมตร ผลของการทดลองในหอบแห้งเป็นสหสัมพันธ์ที่ได้จากพื้นฐานการออกแบบของวิธีการคำนวณวิถีโคจรของอนุภาคที่ถูกพ่นฝอย และการทำนายขนาดของหอบแห้งที่พอเหมาะและเงื่อนไขการทำงานที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดและ/หรือต้นทุนการทำงานที่ต่ำที่สุด ได้นำหลักการพื้นฐานนี้ไปใช้ออกแบบในขนาดอุตสาหกรรม

Narkpravit (1981) ได้ทำการทดลองผลิตมะพร้าวผงเพื่อใช้สำหรับเป็นส่วนผสมของอาหารแทนน้ำมันพร้าวสดในการประกอบอาหารประเภทของหวาน โดยใช้กรรมวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าอัตราส่วนของน้ำกับเนื้อมะพร้าวในการเตรียมสารละลายวัตถุดิบที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ต่อ 4 ความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบที่เหมาะสมเท่ากับ 30-40% และอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเท่ากับ 150-200 องศาเซลเซียส

Vinh (1994) ได้ทดลองผลิตมะขามผงโดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ กัน เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะขาม จากการศึกษานี้ ได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3x3 แฟกทอเรียล (3x3 factorial) เพื่อแสดงว่าอากาศร้อนขาเข้า ความเร็วของอากาศ และความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.31 เมตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบเท่ากับ 7%

เรียวโซ โทเอ (2529) ได้กล่าวถึงการคำนวณออกแบบหอบแห้งแบบพ่นฝอย สรุปว่าเรื่องที่ไม่รู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิและการกระจายความเร็วของลมร้อน ตลอดจนสภาวะการสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับลมร้อนภายในหอบแห้งแบบพ่นฝอยยังมีอีกมาก ดังนั้น จึงยังไม่มีวิธีการคำนวณออกแบบที่ถูกต้องที่สุดในทฤษฎี อย่างไรก็ตาม การคำนวณออกแบบหอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถกระทำได้โดยคำนวณหาระยะทางวิ่งในแนวระดับของหยดของเหลวที่ลื่นออกมา โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับ



เทคนิคการพ่นฝอย แล้วกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของหอบแห้ง ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรคำนวณหาปริมาตรของหอบแห้งที่ต้องใช้ แล้วคำนวณหาความสูงของหอบแห้งโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งที่ได้มา

Bhandari et al., (1993) ได้ทดลองผลิตผลิตภัณฑ์ผงจากน้ำผลไม้หลายชนิด คือ น้ำแบล็คเคอร์แรนท์ น้ำลูกเกด และน้ำแรชเบอร์รี่ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 2 เครื่อง ซึ่งการเตรียมสารละลายวัตถุดิบที่ความเข้มข้นต่างกันั้น ใช้วิธีการเติมมอลโตเดกซ์ทริน (maltodextrin) สำหรับการศึกษานี้ ได้พิจารณาถึงส่วนประกอบของน้ำผลไม้และปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่ใช้เติม ซึ่งพบว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำผลไม้และมอลโตเดกซ์ทรินที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลายวัตถุดิบที่ทำให้ได้ผลดีที่สุดคือ 65/35, 60/40 และ 55/45 สำหรับน้ำแบล็คเคอร์แรนท์ น้ำลูกเกด และน้ำแรชเบอร์รี่ ตามลำดับ และอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอบแห้งอยู่ในช่วง 90-160 องศาเซลเซียส

จินตนา ศรีสุข (2537) ได้ศึกษาสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่อสารชีวภาพได้แก่ ยีสต์ขมปังและสาหร่ายเกลียวทอง โดยได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยระดับต้นแบบที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับสาหร่ายเกลียวทองนั้น ปัจจัยที่ได้ศึกษาคือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ 11.9 14.9 19.8 และ 29.8 วินาที อัตราการป้อนเท่ากับ 1.5 3.0 และ 4.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบของหัวฉีดเท่ากับ 10,000 15,000 และ 20,000 รอบต่อนาที ที่สภาวะอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 180 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งที่ป้อนเท่ากับ 5% จากการศึกษพบว่า ความเร็วรอบของหัวฉีดมีผลกระทบต่อคุณภาพน้อยมาก และพบว่าอัตราการป้อนสารและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีผลกระทบต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ป้อน โดยจะสามารถใช้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ป้อนเป็นตัวแปรหลัก อธิบายผลกระทบต่อคุณภาพด้านต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) และคุณภาพสีของสาหร่ายเกลียวทองที่อบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของระบบ มีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลของน้ำและการเสื่อมสลายของสารชีวภาพ สำหรับตัวอย่างยีสต์ขมปังนั้นได้ศึกษาการอบแห้ง ที่สภาวะอุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของหัวฉีด 6,500 และ 10,000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนเท่ากับ 3.2 และ 4.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณของแข็งที่ป้อน 15% เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 29.8 วินาที ได้ยีสต์แห้งที่มีปริมาณความชื้น 4-6% และมีค่าเปอร์เซ็นต์ยีสต์ที่มีชีวิตรอด 10-35%

Perez-Munoz, Flores (1997) ได้ทดลองอบแห้งนมถั่วเหลืองโดยใช้วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันคือ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าเท่ากับ 255, 265 และ 275 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายวัตถุดิบเท่ากับ 0.38 และ 0.57 ลิตรต่อนาที และอัตราการหมุนของอะตอมไมเซอร์เท่ากับ 19 300 และ 26,800 รอบต่อนาที จากการศึกษพบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนและการระเหยมีค่าเท่ากับ 65.9 และ 78.4% ตามลำดับ

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและการออกแบบชุดหัวฉีดแบบหมุน (Rotary atomizer)

### สำหรับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

#### 3.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับหัวฉีดแบบหมุน

หัวฉีดแบบหมุนใช้กับของเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถประยุกต์ใช้กับของเหลวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ ลักษณะของหัวฉีดจะคล้ายกับจานหมุน ซึ่งสามารถหมุนด้วยความเร็ว 6,000-20,000 รอบต่อนาที จะให้ละอองที่มีขนาดเดียวกันโดยไม่ต้องใช้ความดันสูง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของหัวฉีดแบบนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของเหลวที่ต้องการอบแห้งด้วย เช่น ความหนืด หรือความเข้มข้นของของเหลว เป็นต้น ของเหลวจะถูกทำให้มีความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ บนจานหมุนจนมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเกินขอบเขตก็จะถูกเหวี่ยงหลุดออกจากจานหมุนเป็นละอองเล็กๆ (ขนาดประมาณ 30-120 ไมโครเมตร) ซึ่งแตกออกเป็นหยดตามต้องการ ของเหลวจะส่งเข้าไปยังผิวที่หมุนและเคลื่อนผ่านผิวเพื่อให้เกิดแผ่นบางที่เส้นรอบวง เนื่องจากแรงที่ทำให้เกิดแผ่นของเหลวขึ้นกับความเร็วของการหมุนโดยตรง หัวฉีดชนิดนี้สามารถใช้กับอัตราป้อนและคุณสมบัติของเหลวต่างๆ ได้ในช่วงกว้างขนาดของหยดของเหลวจริงๆ จะขึ้นกับความเร็วของจานและอัตราการป้อน

#### 3.2 การออกแบบชุดหัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer)

ระบบหัวฉีดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพราะเป็นส่วนที่ทำให้สารป้อนที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือสารละลายเปลี่ยนเป็นละอองของเหลวขนาดเล็ก ซึ่งระบบหัวฉีดที่ใช้โดยทั่วไปมี 3 ชนิดดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3.2.2 ในการศึกษารั้งนี้จะเป็นการออกแบบสร้างชุดหัวฉีดแบบหมุน ที่ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งปัญหาที่พบในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดหัวฉีดแบบหมุนเกิดมาจากการกระจายตัวของวัตถุคิไปติดอยู่ตรงผนังด้านในของหอบแห้ง จึงทำให้เกิดการไหม้ติดอยู่ที่ผนังของหอบแห้งทำให้เกิดสูญเสียผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จึงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงขนาดของหอบแห้งที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเกาะติดที่ผนังของหอบแห้ง การดำเนินงานจะพิจารณาออกแบบอุปกรณ์ในส่วนที่สำคัญ คือ ชุดรองรับหัวฉีด หัวฉีด ชุดป้อนสารละลายวัตถุคิ หลังจากนั้นทำการทดสอบการทำงานของหัวฉีดเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่ในแนวระดับของละอองของเหลว ซึ่งข้อมูลของการทดลองดังกล่าวจะนำไปใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับของของเหลว

การคำนวณออกแบบขนาดชิ้นส่วนต่างๆ ของหัวฉีดแบบหมุน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

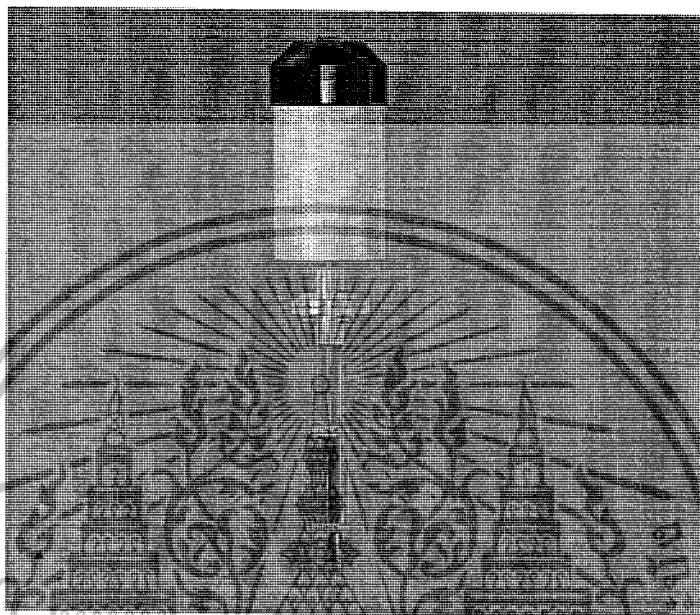
##### 3.2.1 การออกแบบชุดรองรับหัวฉีด

การออกแบบชุดรองรับหัวฉีดแบ่งออกดังนี้

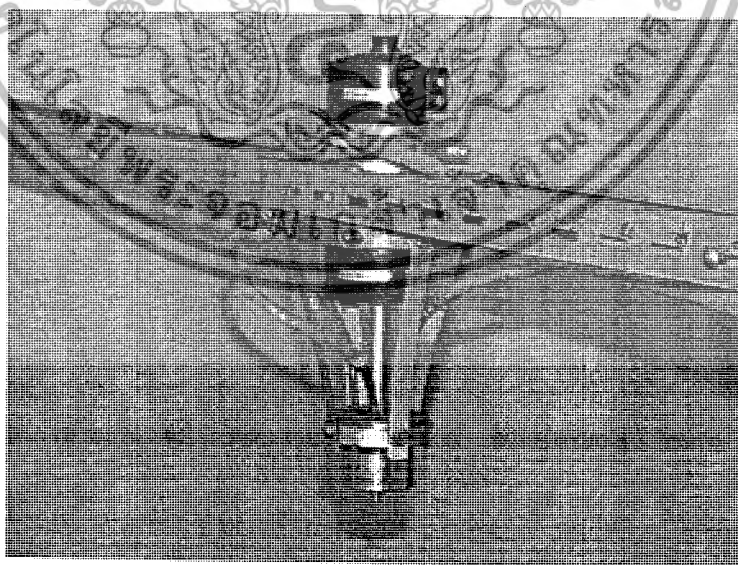
1. มอเตอร์ติดอยู่ส่วนบนของชุดหัวฉีด
2. เลี้ยวของชุดหัวฉีดเป็นรูปทรงกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ข้อต่อระหว่างเพลาดันกำลังกับเพลาส่งกำลังเป็นรูปทรงกระบอกใช้ลักษณะของการสวมอัด
4. ออกแบบเพลามีระยะการ โกงตัวให้น้อยที่สุด
5. ออกแบบเสี้อรองรับแบริ่งเพื่อรองรับแบริ่งและแรงในแนวแกนนอกจากนั้นยังเป็นที่ยึดโครงสร้างของชุดหัวฉีด



รูปที่ 3-1 การออกแบบชุดรองรับหัวฉีด

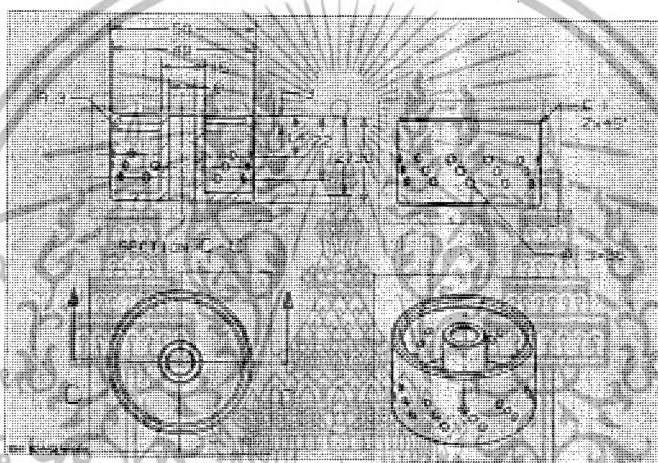


รูปที่ 3-2 ชุดรองรับหัวฉีด

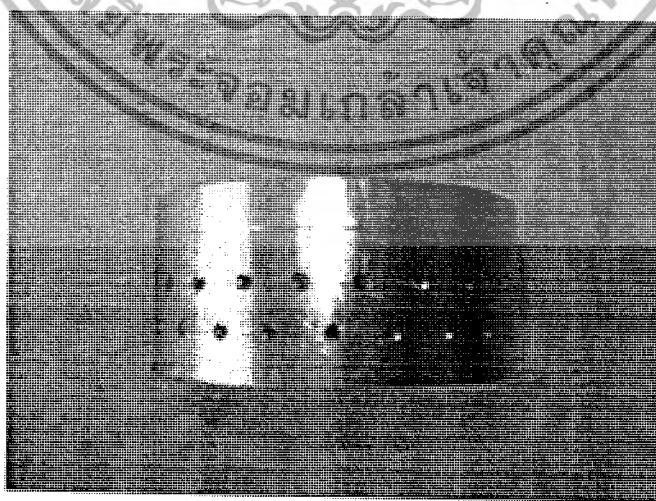
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การออกแบบหัวฉีด

หัวฉีดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นเพลากลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ข้างในกลวงรองรับสารละลายวัตถุคิบส่วนตรงกลางจะมีลักษณะเป็นแกนเพื่อใช้สำหรับสวมกับเพลลาที่ต่อมาจากมอเตอร์ ดังรูปที่ 3-3 เจาะรูด้านข้างเพื่อให้สารกระจายออกมาเป็นฝอย ดังรูปที่ 3-4 ใน การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของเหลว โครงการนี้ได้เลือกศึกษาลักษณะของหัวฉีดที่มี ขนาดแตกต่างกันคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ รวมถึงจำนวน รูเจาะ ดังนั้น จึงได้ทำการออกแบบหัวฉีดซึ่งมีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 30 มิลลิเมตร 50 มิลลิเมตร และ 70 มิลลิเมตร ซึ่งในแต่ละขนาดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะทั้งหมด 3 ขนาดคือ 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร และจำนวนรูที่เจาะคือ 24 รู 36 รู และ 48 รู โดย ขนาดหัวฉีดทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3-1



รูปที่ 3-3 การออกแบบหัวฉีด



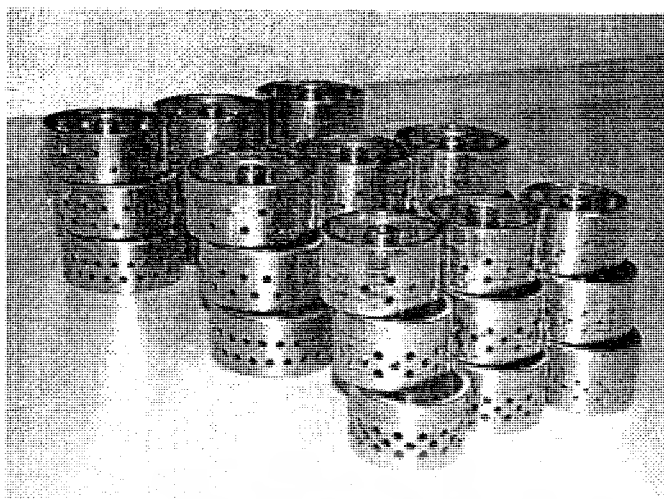
รูปที่ 3-4 การเจาะรูด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดของหัวถืด		
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	เส้นผ่านศูนย์กลางรู	จำนวนรู
1	30	2	24
2	30	2	36
3	30	2	48
4	30	3	24
5	30	3	36
6	30	3	48
7	30	4	24
8	30	4	36
9	30	4	48
10	50	2	24
11	50	2	36
12	50	2	48
13	50	3	24
14	50	3	36
15	50	3	48
16	50	4	24
17	50	4	36
18	50	4	48
19	70	2	24
20	70	2	36
21	70	2	48
22	70	3	24
23	70	3	36
24	70	3	48
25	70	4	24
26	70	4	36
27	70	4	48

ตารางที่ 3-1 แสดงขนาดของหัวถืดแบบหมุนที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

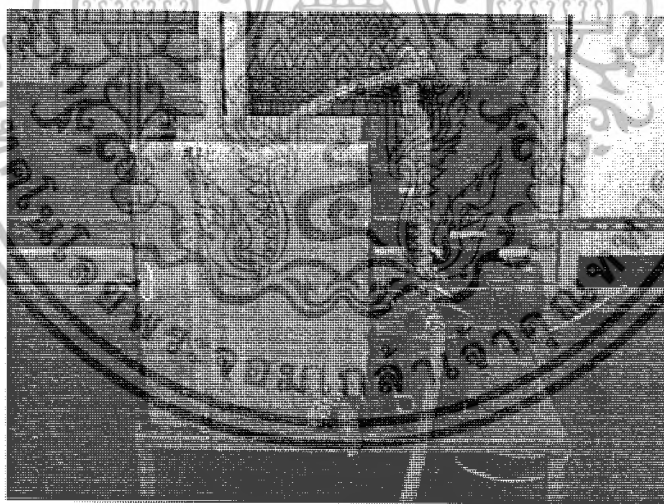


รูปที่ 3-5 หัวฉีดขนาดต่างๆ

### 3.2.3 ชุดป้อนสารละลายวัตถุคัม

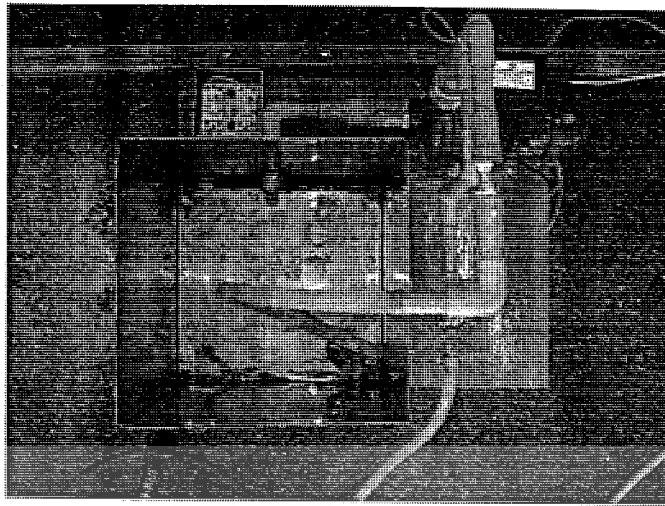
ชุดป้อนสารละลายวัตถุคัมประกอบด้วย

1. ถังบรรจุสารละลายทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดบรรจุสารละลายได้ 32 ลิตร
2. ปัมป์ใช้ในการป้อนสารละลายเพื่อป้อนไปยังหัวฉีด



รูปที่ 3-6 ชุดป้อนสารละลายวัตถุคัม (ด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-7 ชุดบ่อนสารละลายวัตถุคืบ (ด้านบน)

### 3.3 ทฤษฎีและการคำนวณ

#### 3.3.1 แบริ่ง (Bearing)

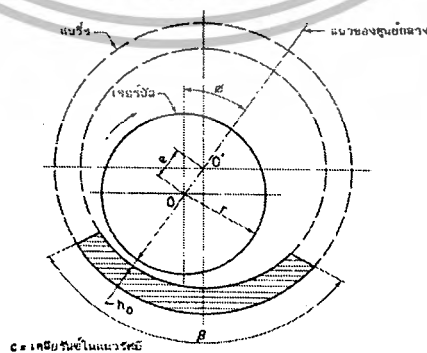
แบริ่งมีหน้าที่รับแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกน และเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการส่งกำลังทำได้โดยการให้แบริ่งมีความเสียดทานน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียพลังงานกลายเป็นความร้อนในน้ำมันให้น้อยที่สุด

แบริ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. เจอร์นัลแบริ่ง
2. โรลลิ่งแบริ่ง หรือ บอลแบริ่ง (rolling bearing)

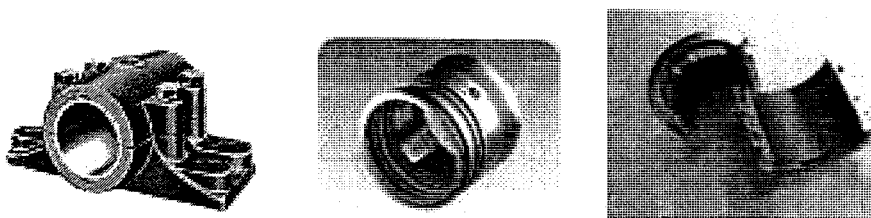
##### 3.3.1.1 เจอร์นัลแบริ่ง

เจอร์นัลแบริ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 คือ เพลาหมุนซึ่งเรียกว่า เจอร์นัลและส่วนที่รองรับเพลาเรียกว่าแบริ่ง



รูปที่ 3-8 ส่วนต่างๆของเจอร์นัลแบริ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

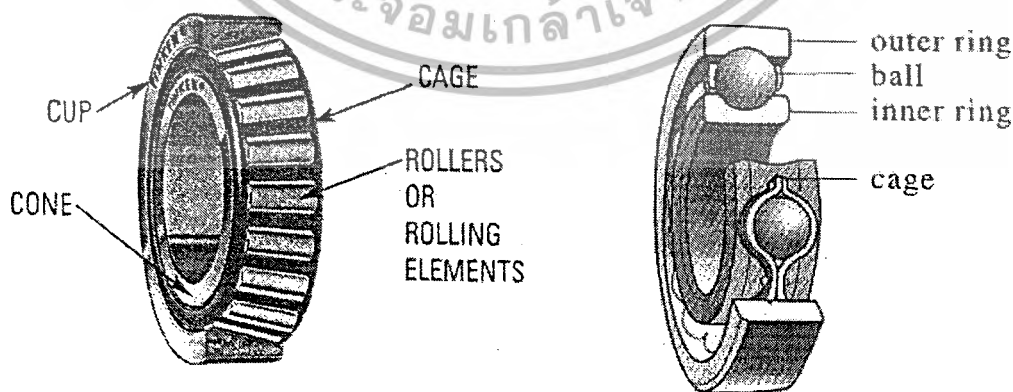


รูปที่ 3-9 ตัวอย่างของ เฮอร์นัลแบร์ริง

### 3.3.1.2 โรลลิงแบร์ริง หรือ บอลแบร์ริง (rolling bearing)

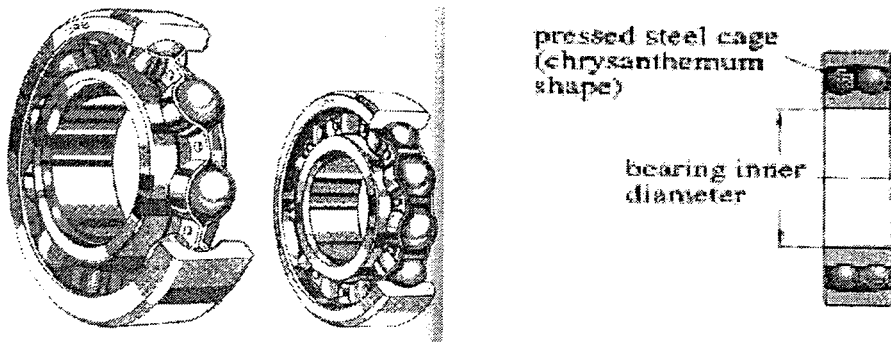
หมายถึงแบร์ริงชนิดหนึ่งที่ได้รับแรงโดยอาศัยชิ้นส่วนของแบร์ริงที่มีลักษณะเป็นผิวสัมผัสแบบกลิ้ง (rolling contact) แทนที่จะเป็นผิวสัมผัสแบบเลื่อน (sliding contact) เนื่องจากแบร์ริงแบบนี้มีค่าความเสียดทานน้อยมากดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งที่นิยมใช้กันทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมว่า แอนติฟริกชันแบร์ริง (Antifriction bearing)

เนื่องจากมีการใช้โรลลิงแบร์ริงกันอย่างแพร่หลายทั่วไป สมาคมผู้ผลิตโรลลิงแบร์ริง ( AFBMA : Anti-Friction Bearing Manufacturer Association ) จึงได้วางมาตรฐานการกำหนดขนาดและหลักเกณฑ์ที่จะใช้ในการเลือกแบร์ริงเหล่านี้ขึ้นจากมาตรฐานนี้ทำให้ผู้ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสามารถเลือกแบร์ริงจากแค็ตตาล็อกของผู้ผลิตผู้หนึ่ง และทำการเปลี่ยนแบร์ริงนี้โดยการเลือกจากอีกผู้ผลิตหนึ่งได้โดยที่แบร์ริงที่เลือกจากผู้ผลิตทั้งสองยังคงมีขนาดเท่ากันถึงแม้ว่าสมาคม AFBMA ได้วางมาตรฐานวิธีการเลือกแบร์ริงตามความต้องการของการรับแรงและอายุการใช้งานเอาไว้แต่ก็มีผู้ผลิตที่มีการวางมาตรฐานการเลือกแบร์ริงของตนเองแตกต่างออกไปจากของ AFBMA แต่อย่างไรก็ตามแค็ตตาล็อกของผู้ผลิตก็มีข้อมูลเพียงพอที่จะให้ทำการเปลี่ยนค่ามาเทียบกับค่าของ AFBMA ได้



รูปที่ 3-10 ส่วนประกอบของตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 บอลเบริง

### 3.3.1.3 อายุการใช้งานของเบริง

เบริงที่ได้รับการติดตั้งและหล่อลื่นอย่างดีตลอดจนดูแลรักษาให้ปราศจากฝุ่นหรือผงต่างๆ และไม่อยู่ภายใต้แรงกระทำที่มีค่าสูงมากจนเกินความสามารถที่เบริงจะรับไว้ได้แล้วเบริงจะเสียหายเนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นในวัสดุเบริงเท่านั้น ดังนั้นจะเห็นว่าเบริงที่เสียจะมีเศษผลโลหะหลุดออกมาเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกกลิ้งและวงแหวนมีค่าน้อยดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นในลูกกลิ้งหรือวงแหวนจึงมีค่าสูงเข้าใกล้ความเค้นของเฮิร์ซ (ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงการหาและที่มาของความเค้นของเฮิร์ซ ซึ่งต้องใช้ทฤษฎีทางอีลาสติซิตี) ในขณะที่ลูกกลิ้งหมุนไปรอบวงแหวนวัสดุที่รับแรงของเบริงจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่มีค่าเปลี่ยนจากศูนย์ไปยังค่าสูงสุดและกลับลงมาเป็นศูนย์ (repeated stress) อยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากค่าความเค้นนี้สูงกว่าขีดจำกัดความทนทาน (endurance limit) ของวัสดุเบริง ดังนั้นจึงเกิดความเสียหายขึ้นโดยความล้า ซึ่งก็แสดงว่า อายุใช้งานของเบริงมีระยะเวลาจำกัด ขึ้นอยู่กับค่าของความเค้นที่กระทำซ้ำ จากผลการทดลองของ Lundberg และ Palmgren (2) ซึ่งได้ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการประเมินค่ามาตรฐานของ AFBMA พบว่า อายุการใช้งาน  $L$  แปรผกผันเป็นสัดส่วนกลับกับแรงในแนวรัศมี  $P$  (ในกรณีที่มีทั้งแรงในแนวรัศมีและแรงรุน  $P$  จะเป็นแรงในแนวรัศมีสมมูล (equivalent radial load) ซึ่งจะได้อีกกล่าวต่อไป นั่นคือ

$$L = \frac{1}{P^k} \quad (3-1)$$

โดยที่ค่าคงที่  $k=3$  สำหรับบอลเบริง

$$K = \frac{10}{3} \approx 3.33 \text{ สำหรับโรลเลอร์เบริง}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อายุใช้งาน  $L$  นี้มักจะนับเป็นจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วรอบของเพลานิ่งหรือนับเป็นจำนวน  
 ล้อรอบ  $mr$  (equivalent radial load) จากสมการจะได้ว่า

$$\left(\frac{L_1}{L_2}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^k \quad (3-2)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าแรงลดลงหนึ่งเท่าแล้ว อายุใช้งานของบอลเบริงจะเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$\frac{L_1}{L_2} = 2^3 = 8 \text{ เท่า} \quad (3-3)$$

สำหรับโรลเลอร์เบริง อายุใช้งานจะเพิ่มขึ้นอีก

$$\frac{L_1}{L_2} = 2^{3.33} = 10.06 \text{ เท่า} \quad (3-4)$$

ดังนั้นผู้เลือกใช้โรลเลอร์เบริงจึงต้องระมัดระวังในการคำนวณหาขนาดของแรงที่กระทำต่อเบริง  
 ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุด

#### 3.3.1.4 การประเมินค่าอายุการใช้งานและแรง

ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการผลิตและควบคุมคุณภาพของโรลเลอร์เบริงอย่างทันสมัย แต่ก็ปรากฏว่าเบริง  
 ชนิดเดียวกันที่ผลิตออกมาภายใต้วิธีการและเครื่องมือชนิดเดียวกัน จะมีอายุการใช้งานแตกต่างกันไปมาก  
 ทั้งนี้อาจเนื่องจากความยากลำบากในการควบคุมความกลมของลูกกลิ้ง และความเรียบของผิวหน้าลูกกลิ้ง  
 เป็นต้น ดังนั้นอายุการใช้งานที่ทางผู้ผลิตอ้างถึงจึงมีรากฐานมาจากการใช้หลักวิชาการทางสถิติเข้าช่วย  
 ทางสมาคม AFBMA จึงได้ตั้งนิยามและจัดตั้งวิธีการเลือกเบริงขึ้น ซึ่งมีดังต่อไปนี้คือ

1. อายุการใช้งานของโรลเลอร์เบริงหมายถึงจำนวนรอบ (หรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วคงที่) ซึ่ง  
 เบริงหมุนได้ก่อนที่จะเริ่มเกิดความล้าขึ้นในวงแหวนหรือลูกกลิ้ง

2. อายุประเมิน (rating life) ของโรลเลอร์เบริงจำนวนหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ  
 หมายถึงจำนวนรอบ (หรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วคงที่) ซึ่งเบริง 90% จากจำนวนนี้สามารถหมุนได้  
 โดยไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า และใช้แทนได้ด้วยอายุใช้งาน  $L_{10}$  ผู้ผลิตบางบริษัทอาจใช้  
 อายุใช้งานเฉลี่ย (median life) เป็นอายุประเมินก็ได้ อายุใช้งานเฉลี่ยนี้หมายถึงจำนวนรอบที่ 50% ของเบ  
 ริ่งที่เหมือนกันจำนวนหนึ่งสามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความล้าขึ้น และใช้แทนด้วยอายุการใช้งาน  $L_{50}$  ซึ่ง  
 มีความสัมพันธ์กับ  $L_{10}$  โดยประมาณคือ

$$L_{50} \cong 5L_{10} \quad (3-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แรงสถิตยฺ์ประเมิน (basic static rating) หมายถึงแรงในแนวรัศมีที่ทำให้เกิดระยะยุบตัวของ ลูกกลิ้งและวงแหวนรวมกันเท่ากับ 0.0001 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง และใช้แทนด้วย  $C_0$  ค่าของ  $C_0$

4. แรงพลวัตประเมิน (basic dynamic rating) แรงพลวัตประเมิน  $C$  นี้เป็นค่าที่ใช้ในการเลือก ขนาดเลือกขนาดแบริงเพื่อให้รับแรงและมีอายุการใช้งานได้ตามต้องการ

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{10} & L_1 &= P \\ L_2 &= 1 \text{ mr} & P_2 &= C \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^k \quad (3-6)$$

ให้  $L_{10}$  เป็นอายุการใช้งานจริงซึ่งมีหน่วยเป็นล้านรอบ (mr) และ  $P$  เป็นแรงในแนวรัศมีที่แบริง จะต้องรับขณะใช้งานจริงจากสมการ (3-6) ทำให้ทราบว่าแบริงที่เลือกมาจากอายุประเมินจำนวนหนึ่งล้าน รอบนั้น จะสามารถทำงานได้ที่ล้านรอบขณะใช้งานจริง

### 3.3.1.5 แรงสมมูล

ในการใช้งานจริงโรลเลอร์แบริงอาจจะรับทั้งแรงในแนวรัศมีและแนวแกน และวงแหวนในหรือ นอกจะเป็นอันที่หมุนก็ได้ซึ่งก็แล้วแต่ผู้ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกล อีกประการหนึ่งเกิดตาคีลของผู้ผลิต จะกำหนดให้อายุประเมินในเทอมของแรงในแนวรัศมีเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนแรง และเงื่อนไขจากที่ใช้ทำงานจริงๆ มาใช้เป็นแรงในรัศมีโดยมีวงแหวนในเป็นตัวหมุน เรียกว่า แรงสมมูล เพื่อที่จะได้ใช้ในการเลือกแบริงจากแค็ตตาล็อกได้ สนมาคม AFBMA ได้กำหนดนิยามของแรงสมมูลไว้ ดังนี้

แรงสมมูลหมายถึง แรงในแนวรัศมี ซึ่งให้กระทำต่อโรลลิ่งแบริงโดยที่วงแหวนในหมุนและวงแหวนนอกอยู่นิ่งแล้วจะทำให้แบริงมีอายุการใช้งานเท่ากับอายุการใช้งานของแบริงที่รับแรงจริงซึ่งอาจจะ มีทั้งแรงในแนวรัศมีและแนวแกนพร้อมกันและให้คำนวณได้จากสมการ

$$P = XVF_r + YF_a \quad (3-7)$$

หรือ  $P = XVF_r \quad (3-8)$

โดยที่  $P =$  แรงสมมูล

$$F_r = \text{แรงในแนวรัศมี}$$

$$F_a = \text{แรงในแนวแกนหรือแรงรุน}$$

$$V = \text{ตัวประกอบการหมุน (rotation factor) มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อวงแหวนในหมุน}$$

และ 1.2 เมื่อวงแหวนนอกหมุน ถ้าเป็นบอลแบริงชนิด self aligning ให้ใช้ค่าเท่ากับ 1 เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X$  = ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี (radial load factor)

$Y$  = ตัวประกอบแรงรุน (trust load factor)

ค่าแรงสมมูลที่ใช้ในการเลือกขนาดแบร์ริงให้ได้ค่าที่ได้จากสมการ (3-7) และ (3-8) แล้วแต่ที่ว่าค่าไหนจะมากกว่า สำหรับบอลแบร์ริงกันรุนและ โรลเลอร์แบร์ริงกันรุนแล้วให้คำนวณค่าแรงสมมูลจากสมการ (3-7) โดยให้  $V=1$  ส่วน straight bearing นั้นจะใช้รับเฉพาะแรงในแนวรัศมีเท่านั้น จึงให้คำนวณแรงสมมูลจากสมการ (3-8)

### 3.3.1.6 จำนวนหาบอลแบร์ริง

ความเร็วรอบ 11000 rpm

กำลัง 0.27 kw

กำลังงานที่เพล  $W_p = 2\pi nT$  (3-9)

$$270 = 2\pi \times \left(\frac{11000}{60}\right) T$$

โมเมนต์บิด  $T = 0.234 \text{ Nm}$  หรือ  $234 \text{ Nmm}$

Safety Factor =  $234 \times 2.0 = 468 \text{ Nmm}$

จากสมการ  $T = FR$  (3-10)

$$F = \frac{T}{R} = \frac{0.234}{0.015} = 15.6 \text{ N}$$

ดังนั้นแรงในแนวแกนหรือแรงรุน ( $F_a$ ) มีค่า 15.6 N

$$F_r = 0$$

เลือกขนาด 8 มิลลิเมตร อนุกรมมิติ 02 แบบ Single Row Deep Groove

$$C_o = 1.35, C = 2.15$$

วงแหวนในหมุน  $V=1$

เป็น Single Row Deep Groove  $d=0, x=1.0$

$$P = 1 \times 15.6$$

$$= 15.6 \text{ N}$$

ใช้ค่า 156 N จำนวนหาอายุการใช้งาน

ตัวประกอบการกระแทกเล็กน้อยเท่ากับ 1.5

$$N_s = 1.5$$

$$P = 1.5 \times 0.0156$$

$$= 0.0234 \text{ kN}$$

$$L_{10} = \frac{C^k}{P} = \frac{2.15^3}{0.0234}$$

$$= 424.717 \text{ mr}$$

$$L_{10} = \frac{424.717 \times 10^6}{11000 \times 60}$$

$$= 643.51 \text{ hr}$$

ดังนั้นเลือกใช้ ball bearing ชนิด Single Row Deep Groove อนุกรมมิติ 02 ขนาดรูสวม 8 มิลลิเมตร

### 3.3.2 เพลา

#### 3.3.2.1 ทฤษฎีการออกแบบเพลา

ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลาซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตศาสตร์ (static design method) ในการหาสมการสำหรับการออกแบบเพลาให้พิจารณาเพลาโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ  $d_i$  และ  $d_o$  ตามลำดับ ความเค้นต่างๆที่เกิดขึ้นบนเพลามีดังต่อไปนี้คือ

ความเค้นดึงหรือกด 
$$\sigma_a = \frac{4F}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} \quad (3-11)$$

ความเค้นดัด 
$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{32Md}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} \quad (3-12)$$

ความเค้นเฉือน 
$$\tau_{xy} = \frac{Tr}{j} = \frac{16Td}{\pi(d_o^3 - d_i^3)} \quad (3-13)$$

ในกรณีที่เป็นแรงกด อาจเป็นผลจากการ โกงงอได้ ดังนั้นสมการจะได้

$$\sigma_a = \frac{4F}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} \quad (3-14)$$

โดยที่  $d_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน,  $d_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก, F = แรงกด

เพลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เป็นวัฏจักร ทั้งนี้เพราะเพลามุนอยู่ตลอดเวลา นอกจากนั้นแรงที่กระทำยังอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาก็ได้ ดังนั้นเพลาก็จะเกิดความเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่สำหรับวิธีการคำนวณของ ASME ใช้วิธีการแบบสถิตศาสตร์ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบ

ความล้า (fatigue factor) มาเกี่ยวข้องด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $C_m$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการคัต  
 $C_t$  = ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

ดังนั้นสมการจึงกลายเป็น

$$\sigma_b = \frac{32C_m M d}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} \quad (3-15)$$

และ

$$\tau_{xy} = \frac{16C_t T d}{\pi(d_o^4 - d_i^4)} \quad (3-16)$$

ความเค้นกดหรือความเค้นดึงรวมคือ

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_b \quad (3-17)$$

จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau = \left( \tau_{xy}^2 + \left( \frac{\sigma}{2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3-18)$$

จัดรูปใหม่ลงในสมการจะได้รูปใหม่ว่า

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau(1-k^4)} \left[ (C_t T)^2 + \left[ \frac{\alpha F d (1+k^2)}{8} + C_m M \right]^2 \right]^{1/2} \quad (3-19)$$

โดยที่  $k = d_i/d_o$ ,  $\alpha = 1$  เมื่อเป็นแรงดึง

$$\alpha = \frac{1}{1 - 0.0044(L/K)} \quad \text{เมื่อ } L/K \leq 115 \quad (3-20a)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_y (L/K)^2}{\pi^2 n E} \quad \text{เมื่อ } L/K > 115 \quad (3-20b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไม่มีแรง F กระทำอยู่ด้วยสมการจะลดรูปเหลือเพียง

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau(1-k^4)} [(C_i T)^2 + (C_m M)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3-21)$$

หรือในกรณีของเพลาดัน  $k = d_i/d_o = 0$  เมื่อแทนค่าในสมการจะได้สมการคือ

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau} [(C_i T)^2 + (C_m M)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3-22)$$

ค่าตัวประกอบความล้าสามารถเลือกใช้ตามลักษณะของแรงที่มากระทำซึ่งดูได้จากตารางที่ 3-2

ชนิดของแรง		$C_m$	$C_i$
เพลายูนิ่ง :	แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.0	1.0
	แรงกระตุก	1.5-2.0	1.5-2.0
เพลามุน :	แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.5	1.0
	แรงกระตุกอย่างเบา	1.5-2.0	1.0-1.5
	แรงกระตุกอย่าง	2.0-3.0	1.5-3.0

ตารางที่ 3-2 ค่าตัวประกอบความล้า

นอกจากนี้โค้ดของ ASME ยังได้ระบุเอาไว้ว่าเพล่าซึ่งมีใช้ในงานธรรมดาทั่วไปควรจะมีความเค้นเฉือนใช้งานดังนี้

$$\tau_d = 55 \text{ N/mm}^2 \quad \text{สำหรับเพล่าที่ไม่มีร่องลึ้ม}$$

$$\tau_d = 41 \text{ N/mm}^2 \quad \text{สำหรับเพล่าที่มีร่องลึ้ม}$$

### 3.3.2.2 จำนวนเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า

ความเร็วรอบ 11000 rpm

กำลัง 0.27 kw

กำลังงานที่เพล่า  $W_p = 2\pi mT$

$$270 = 2\pi \times \left( \frac{11000}{60} \right) T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเมนต์บิด  $T = 0.234 \text{ Nm}$  หรือ  $234 \text{ Nmm}$

Safety Factor =  $234 \times 2.0 = 468 \text{ Nmm}$

เพลามีร่องลึ้มเพื่อใช้ยึดกับแกนเพลลาของมอเตอร์

$$\tau_d = 41 \text{ N/mm}^2$$

จากสมการ

$$\tau_d = \frac{16T}{\pi d^3}$$

แทนค่าในสมการ

$$41 \text{ N/mm}^2 = \left[ \frac{16 \times 468}{\pi \times d^3} \right]$$

$$d = \left[ \frac{16 \times 468}{\pi \times 41} \right]^{1/3}$$

ดังนั้น

$$d = 3.87 \text{ mm}$$

Safety Factor = 2.0

$$d = 3.87 \times 2.0 = 7.74 \text{ mm}$$

เลือกใช้เพลานาคนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm

### 3.3.3 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ (Motor)

เนื่องจากการทดลองต้องการความเร็วรอบที่สูงสุดที่ 11000 rpm

ค่า Torque ที่ใช้ 0.234 Nm

Safety Factor = 2.0

ดังนั้นใช้ Torque =  $234 \times 2.0 = 468 \text{ Nmm}$

จากสมการ

$$W_p = \frac{2\pi nT}{60}$$

$$= \frac{2\pi(0.234)(11000)}{60}$$

$$W_p = 269.55 \text{ W}$$

จาก 1 แรงม้าเท่ากับ 746 Watt

$$W_p = \frac{269.55}{746} = 0.36 \text{ HP}$$

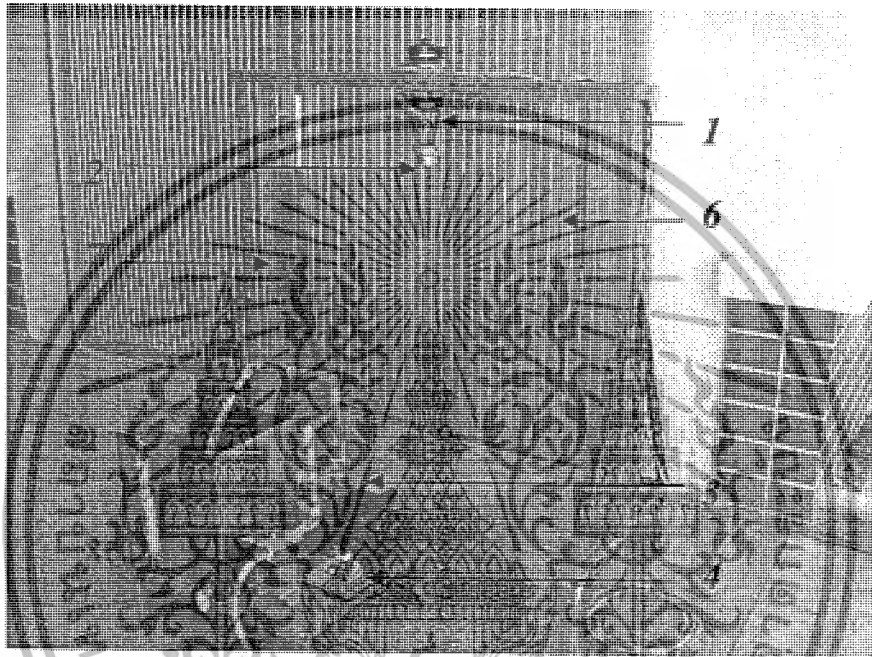
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

ในการทำการคำนวณออกแบบและสร้างชุดหัวฉีดแบบหมุน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องจากบทที่ผ่านมา ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของชุดหัวฉีดแบบหมุนแสดง ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ส่วนประกอบของชุดหัวฉีดแบบหมุน

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดหัวฉีด
1	ชุดหัวฉีด
2	หัวฉีด
3	ระบบป้อนสารละลาย
4	สวิตช์ควบคุมมอเตอร์
5	ห้องส่งสารละลาย
6	แผงยึดฉาก
7	โครงยึดชุดหัวฉีด

ตารางที่ 4-1 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดหัวฉีดแบบหมุน

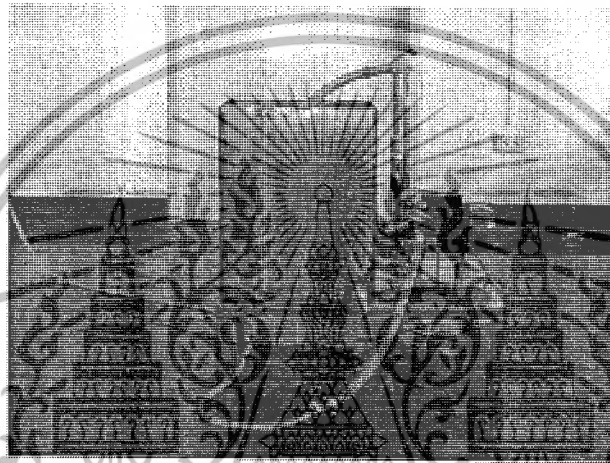
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ระบบป้อนสารละลาย

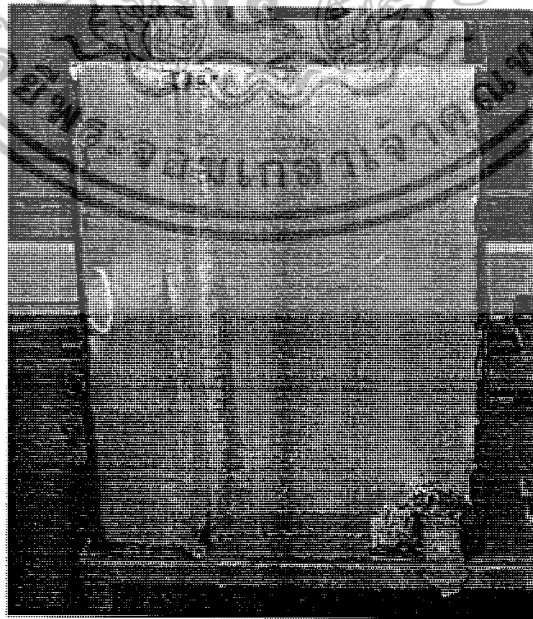
ระบบป้อนสารละลายประกอบด้วย

1. ภาชนะสำหรับบรรจุวัตถุดิบ
2. ป้อน
3. ท่อและสายยาง
4. วาล์วปรับอัตราการป้อนสารละลาย

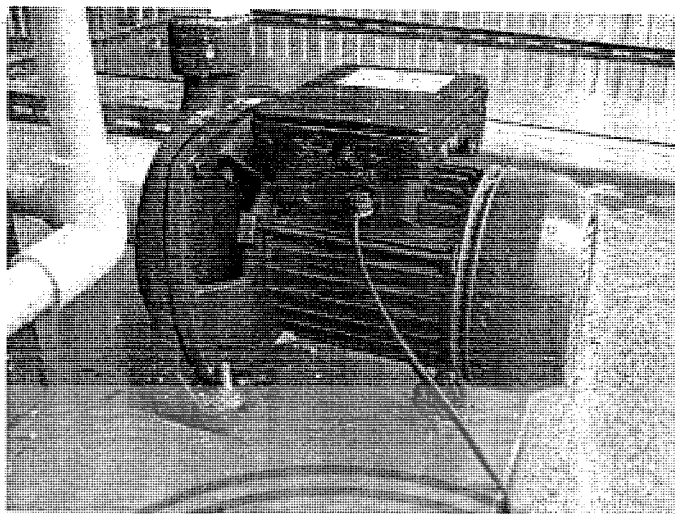
การป้อนสารละลายโดยอาศัยจากการดูดของปั๊มส่งผ่านไปยังวาล์วปรับอัตราการป้อน จากนั้นส่งผ่านท่อและเข้าไปในหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ (4-2) ถึง (4-5)



รูปที่ 4-2 ระบบป้อนสารละลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 4-3 ภาชนะสำหรับบรรจุวัตถุดิบ** เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



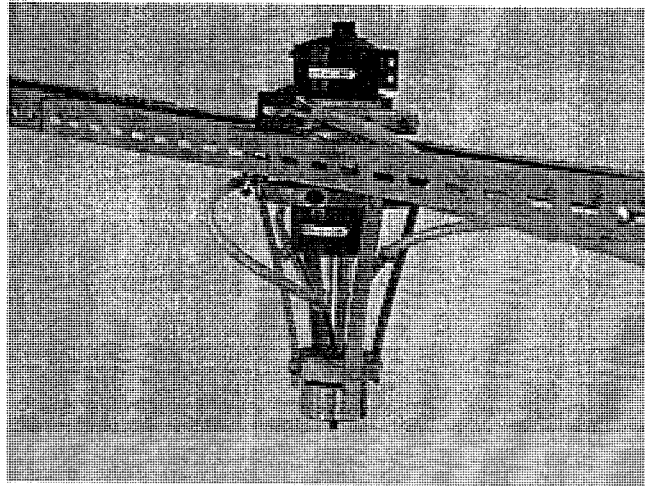
รูปที่ 4-5 วาล์วปรับอัตราการป้อนสารละลาย

#### 4.1.2 ชุดหัวฉีด

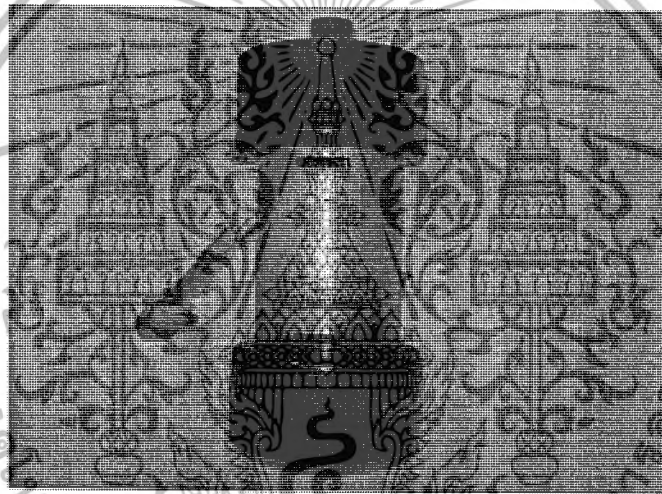
ชุดหัวฉีดมีลักษณะและส่วนประกอบดังต่อไปนี้ (แสดงดังในรูปที่ 4-6 ถึง 4-12)

1. มอเตอร์ความเร็วรอบสูง
2. เฟลาส่งกำลัง
3. โครงสร้างชุดหัวฉีด
4. ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับโครงสร้างชุดหัวฉีด
5. เสื่อแบร็ง
6. แบริ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 ชุดหัวกัด

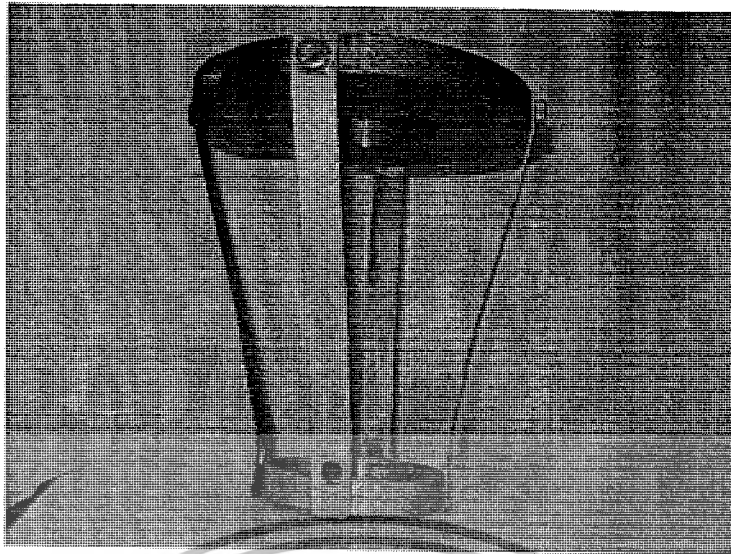


รูปที่ 4-7 มอเตอร์ความเร็วรอบสูง



รูปที่ 4-8 เพลาสั่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

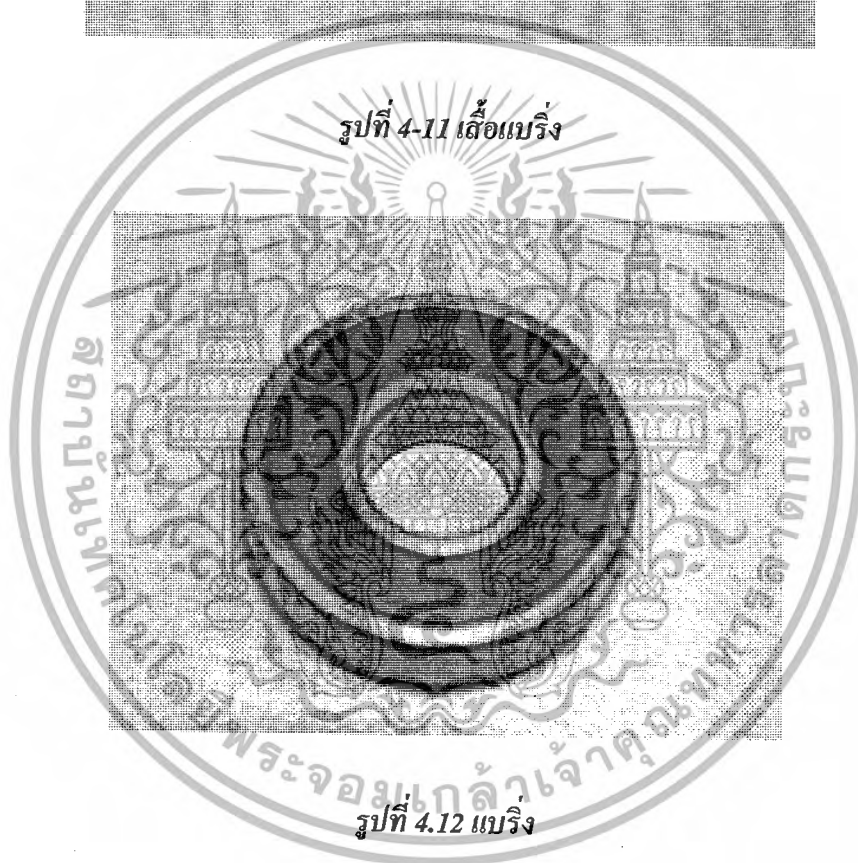
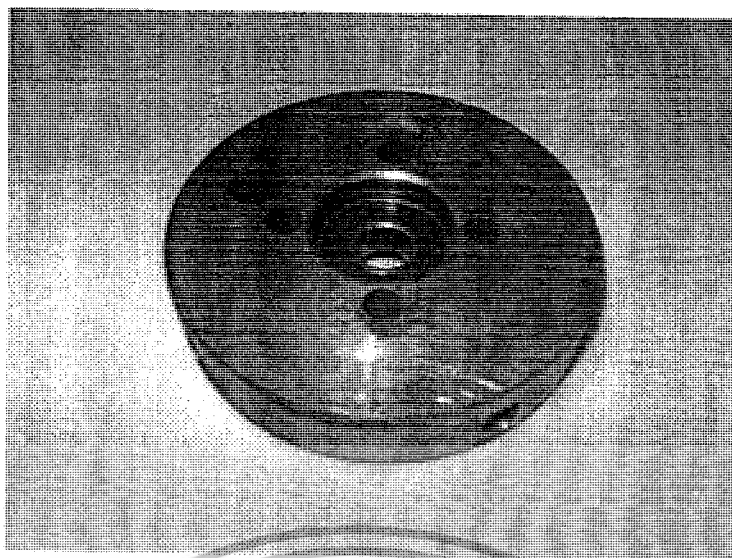


รูปที่ 4-9 โครงสร้างชุดหัวน็อค



รูปที่ 4-10 ตัวจับยี่ตระหว่างมอเตอร์กับโครงสร้างชุดหัวน็อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



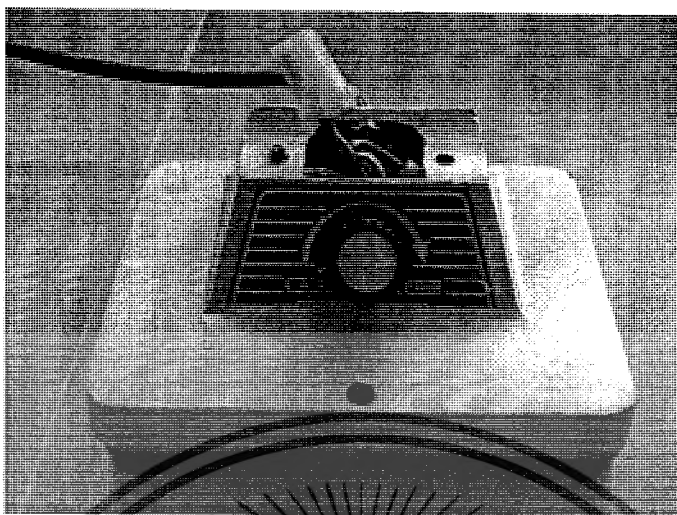
#### 4.1.3 หัวฉีด

หัวฉีดที่ใช้ในการทดลองทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันทั้งหมด จำนวน 27 หัว ดังแสดงในตารางที่ 3-1 และรูปที่ 3-5

#### 4.1.4 สวิตช์ควบคุมมอเตอร์

สวิตช์ควบคุมมอเตอร์ทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยในการศึกษารั้งนี้ได้ศึกษาที่ความเร็วรอบแตกต่างกันคือ 9000, 10000 และ 11000 รอบต่อนาที เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วของหัวฉีดที่มีต่อการกระจายตัวและขนาดของหยดของเหลว

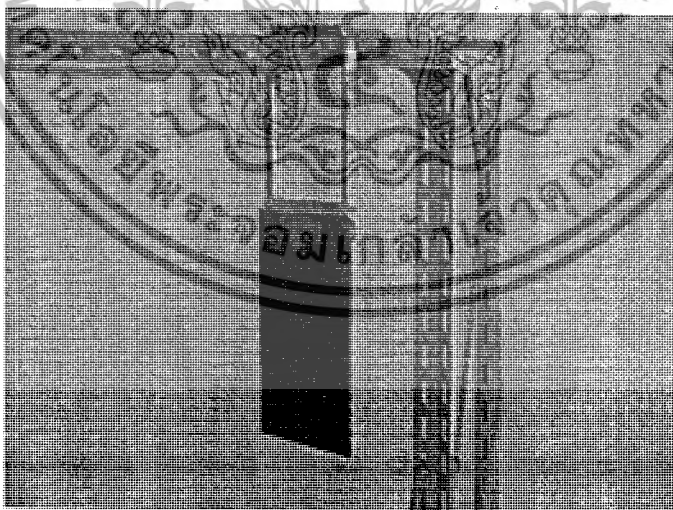
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-13 สวิทซ์ควบคุมมอเตอร์

#### 4.1.5 แผงยึดฉาก

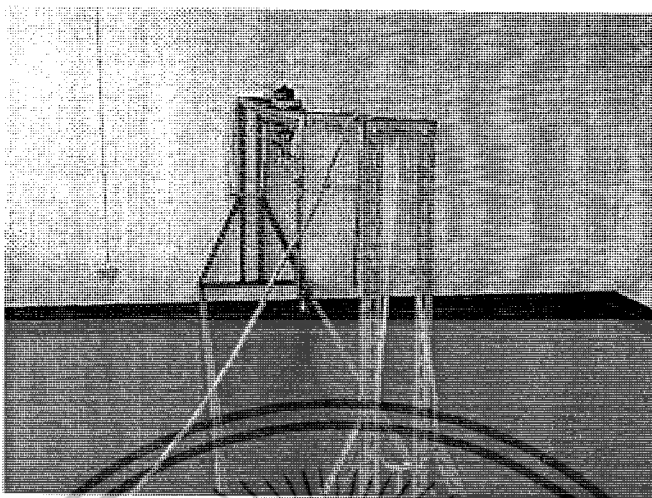
รับการกระจายตัวของสารละลายที่ออกจากหัวฉีดให้อยู่ในปริมาณที่ต้องการแล้ววัเคราะห์การกระจายโดยมีสเกลนอกระยะการกระจายอยู่ที่โครงยึดหัวฉีด



รูปที่ 4-14 แผงยึดฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 โครงยึดชุดหัวฉีด

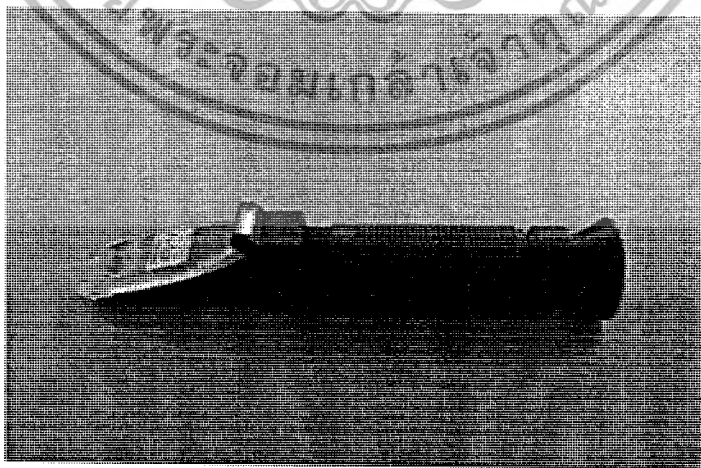


รูปที่ 4-15 โครงยึดชุดหัวฉีด

#### 4.2. การบันทึกข้อมูล

##### 4.2.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย

การวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายวัดดูคิบก่อนทำการทดสอบ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นสารละลาย (Hand-Held Refractometer) ดังรูปที่ 4-17 และบันทึกค่า

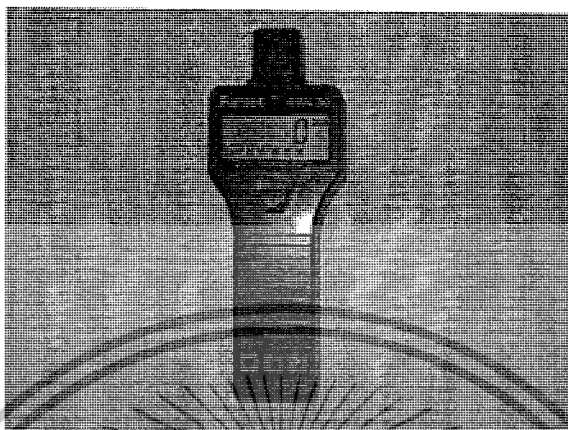


รูปที่ 4-16 เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ความเร็วรอบของหัวฉีด

การปรับความเร็วรอบของหัวฉีดสามารถทำได้โดยการหมุนปุ่มควบคุมมอเตอร์ไปที่ตำแหน่งที่ต้องการ และความเร็วของหัวฉีดสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4-18



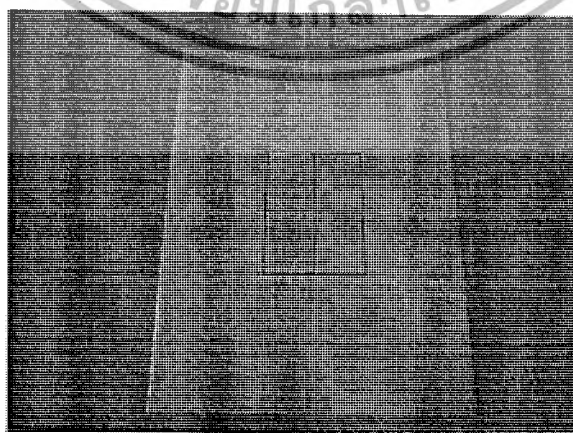
รูปที่ 4-17 เครื่องวัดความเร็วรอบ

#### 4.2.3 อัตราการป้อนสารละลาย

นำสารละลายใส่ไปในถังที่มีสเกลบอกปริมาตรที่แน่นอน ซึ่งมีหน่วยเป็นลิตร จากนั้นทำการปรับวาล์วแล้วจับเวลาเพื่อหาปริมาณของสารละลายที่ถูกป้อนต่อหน่วยเวลา

#### 4.2.4 การวัดระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลวในแนวระดับ

เมื่อหัวฉีดหมุนจะทำให้สารละลายกระจายตัว หยดของของเหลวจะกระจายไปติดกับฉาก ซึ่งใช้แผ่นใส มีขนาด  $30 \times 21$  ตารางเซนติเมตร (เท่ากับกระดาษ A4) กึ่งกลางของแผ่นกำหนดพื้นที่  $7 \times 10$  ตารางเซนติเมตร จากแนวราบและแนวตั้งฉากตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-19 เมื่อหยดของของเหลวกระจายไปติดกับแผ่นใสโดยมีจำนวนหยดในช่วง 190-230 หยดต่อพื้นที่ที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงทำการบันทึกการกระจาย

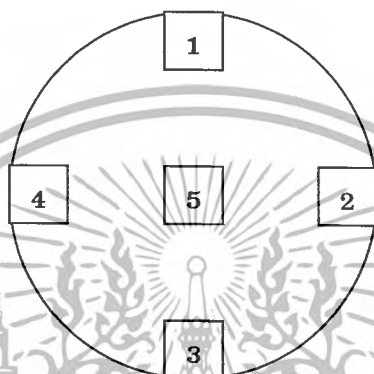


รูปที่ 4-18 ขนาดพื้นที่ในแผ่นใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 การวัดขนาดของหยดของเหลว

เมื่อสารละลายออกจากหัวฉีดที่กำลังหมุน ทำให้เกิดการกระจายตัวของหยดของเหลวมีลักษณะเป็นวงกลม การวัดขนาดของฝอยทำได้โดยใช้แผ่นพลาสติกใสรองรับหยดของเหลว ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4-20 จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์ขยายขนาดของฝอยแล้วบันทึกค่า การวัดใช้ 5 ตำแหน่งโดยตำแหน่งที่ 1-4 จะมีระยะห่างจากหัวฉีดในแนวตั้งฉากกับพื้นระยะเท่ากัน ส่วนตำแหน่งที่ 5 เป็นตำแหน่งตรงกับหัวฉีด



รูปที่ 4-19 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัด



รูปที่ 4-20 กล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3. วิธีการทดลอง

#### 4.3.1 การทดลองเพื่อหาระยะการกระจายของหยดของของเหลว

##### 4.3.1.1 วางแผนและกำหนดสภาวะทดลองต่างๆ โดยเลือกปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าของตัวแปรที่ศึกษา
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ, มิลลิเมตร	2, 3, 4
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด, มิลลิเมตร	30, 50, 70
จำนวนรูที่เจาะ	24, 36, 48
ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที	9000, 1000, 11000

#### ตารางที่ 4-2 ปัจจัยที่ศึกษาการกระจายของหยดของของเหลว

การทดลองได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมี 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ดังตารางที่ 4-2 ในการทดลองได้กำหนดให้ที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีอัตราการป้อนสารละลายคงที่เท่ากับ 0.015 ลิตรต่อวินาที และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในสารละลายเท่ากับ 20% ซึ่งสภาวะการทดลองทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 4-3

การทดลองที่	ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด, มิลลิเมตร	จำนวนรูที่เจาะ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ, มิลลิเมตร
1	9000	30	24	2
2	9000	30	24	3
3	9000	30	24	4
4	9000	30	36	2
5	9000	30	36	3
6	9000	30	36	4
7	9000	30	48	2
8	9000	30	48	3
9	9000	30	48	4
10	9000	50	24	2
11	9000	50	24	3

#### ตารางที่ 4-3 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ความเร็วรอบของ หัวฉีด, รอบต่อนาที	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของ หัวฉีด, มิลลิเมตร	จำนวนรูที่เจาะ	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของรู ที่เจาะ, มิลลิเมตร
12	9000	50	24	4
13	9000	50	36	2
14	9000	50	36	3
15	9000	50	36	4
16	9000	50	48	2
17	9000	50	48	3
18	9000	50	48	4
19	9000	70	24	2
20	9000	70	24	3
21	9000	70	24	4
22	9000	70	36	2
23	9000	70	36	3
24	9000	70	36	4
25	9000	70	48	2
26	9000	70	48	3
27	9000	70	48	4
28	10000	30	24	2
29	10000	30	24	3
30	10000	30	24	4
31	10000	30	36	2
32	10000	30	36	3
33	10000	30	36	4
34	10000	30	48	2
35	10000	30	48	3
36	10000	30	48	4
37	10000	50	24	2
38	10000	50	24	3

**ตารางที่ 4-3 (ต่อ) สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ความเร็วรอบของ หัวฉีด, รอบต่อนาที	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของ หัวฉีด, มิลลิเมตร	จำนวนรูที่เจาะ	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของรู ที่เจาะ, มิลลิเมตร
39	10000	50	24	4
40	10000	50	36	2
41	10000	50	36	3
42	10000	50	36	4
43	10000	50	48	2
44	10000	50	48	3
45	10000	50	48	4
46	10000	70	24	2
47	10000	70	24	3
48	10000	70	24	4
49	10000	70	36	2
50	10000	70	36	3
51	10000	70	36	4
52	10000	70	48	2
53	10000	70	48	3
54	10000	70	48	4
55	11000	30	24	2
56	11000	30	24	3
57	11000	30	24	4
58	11000	30	36	2
59	11000	30	36	3
60	11000	30	36	4
61	11000	30	48	2
62	11000	30	48	3
63	11000	30	48	4
64	11000	50	24	2
65	11000	50	24	3

**ตารางที่ 4-3 (ต่อ) สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด, มิลลิเมตร	จำนวนรูที่เจาะ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ, มิลลิเมตร
66	11000	50	24	4
67	11000	50	36	2
68	11000	50	36	3
69	11000	50	36	4
70	11000	50	48	2
71	11000	50	48	3
72	11000	50	48	4
73	11000	70	24	2
74	11000	70	24	3
75	11000	70	24	4
76	11000	70	36	2
77	11000	70	36	3
78	11000	70	36	4
79	11000	70	48	2
80	11000	70	48	3
81	11000	70	48	4

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1.2 ซังสารมอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin) ละลายในน้ำ จากนั้นทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของในสารละลายให้ได้ตามที่กำหนด

4.3.1.3 นำสารละลายที่ได้บรรจุลงในถังรองรับที่มีสเกลบอกปริมาณอย่างชัดเจน

4.3.1.4 เปิดสวิตช์มอเตอร์ให้หัวฉีดหมุนประมาณ 3 นาที เพื่อปรับสภาวะของมอเตอร์ให้พร้อมใช้งาน โดยความเร็วรอบไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

4.3.1.5 เปิดสวิตช์ให้ปั๊มทำงาน

4.3.1.6 ปรับตำแหน่งของวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการป้อนของสารละลายตามที่กำหนดไว้

4.3.1.7 วัดระยะเวลาการกระจายในแนวระดับ

4.3.1.8 เปลี่ยนสภาวะการทดลอง ดังตารางที่ 4-3 จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 4.3.1.2 - 4.3.1.7 จนครบ 81 การทดลองและแต่ละสภาวะทำการทดลอง 3 ซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การทดลองเพื่อหาขนาดของหยดของของเหลว

#### 4.3.2.1 วางแผนและกำหนดสภาวะทดลองต่างๆ โดยเลือกปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าของตัวแปรที่ศึกษา
อัตราการป้อนสารละลาย, ลิตรต่อวินาที	0.010, 0.015, 0.02 0
ปริมาณความเข้มข้นที่ละลายได้ในสารละลาย, %	10, 20, 30
ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที	9000, 1000, 11000

#### ตารางที่ 4-4 ปัจจัยที่ศึกษาขนาดของหยดของของเหลว

การทดลองได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมี 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ดังตารางที่ 4-4 ในการทดลองได้กำหนดให้ที่สภาวะการทดลองต่างๆ ใช้หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และจำนวนรูที่เจาะเท่ากับ 36 รู ซึ่งแต่ละสภาวะการทดลองได้แสดงในตารางที่ 4-5

การทดลองที่	อัตราการป้อนสารละลาย, ลิตรต่อวินาที	ปริมาณความเข้มข้น, %	ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที
1	0.010	10	9000
2	0.010	10	10000
3	0.010	10	11000
4	0.010	20	9000
5	0.010	20	10000
6	0.010	20	11000
7	0.010	30	9000
8	0.010	30	10000
9	0.010	30	11000
10	0.015	10	9000
11	0.015	10	10000
12	0.015	10	11000
13	0.015	20	9000
14	0.015	20	10000

#### ตารางที่ 4-5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	อัตราการป้อน สารละลาย, ลิตรต่อวินาที	ปริมาณความเข้มข้น, %	ความเร็วรอบของหัวฉีด, รอบต่อนาที
15	0.015	20	11000
16	0.015	30	9000
17	0.015	30	10000
18	0.015	30	11000
19	0.020	10	9000
20	0.020	10	10000
21	0.020	10	11000
22	0.020	20	9000
23	0.020	20	10000
24	0.020	20	11000
25	0.020	30	9000
26	0.020	30	10000
27	0.020	30	11000

**ตารางที่ 4-5 (ต่อ) สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**

- 4.3.2.2 ซึ่งสารมอลโตเดกซ์ทริน (Maltodextrin) ละลายในน้ำ จากนั้นทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย แล้วปรับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายให้ได้ตามต้องการ
- 4.3.2.3 นำสารละลายที่ได้บรรจุลงในถังรองรับที่มีสเกลบอกปริมาณอย่างชัดเจน
- 4.3.2.4 เปิดสวิตช์มอเตอร์ให้หัวฉีดหมุนประมาณ 3 นาที เพื่อปรับสภาวะของมอเตอร์ให้พร้อมใช้งาน โดยความเร็วรอบไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
- 4.3.2.5 เปิดสวิตช์ให้ปั๊มทำงาน
- 4.3.2.6 ปรับตำแหน่งของวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการป้อนของสารละลายตามที่กำหนดไว้
- 4.3.2.7 ใช้แผ่นใสเป็นแผ่นรับหยดของเหลว ซึ่งในการทดลองจะวัดทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4-20 จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อวัดขนาดของหยดของเหลว
- 4.3.2.8 เปลี่ยนสภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-5 และทำตามขั้นตอนที่ 4.3.2.2 - 4.3.2.7 จนครบ 27 การทดลอง โดยแต่ละสภาวะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลว และปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลวโดยใช้หัวฉีดแบบหมุน สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลว

จากการทดลองโดยใช้หัวฉีดแบบหมุน เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับของหยดของเหลวจะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5-1 โดยปัจจัยที่เลือกศึกษาคือ

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 9000 , 10000 , 11000 รอบต่อนาที
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดที่ 30 , 50 , 70 มิลลิเมตร
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ 2 , 3 , 4 มิลลิเมตร
4. จำนวนของรูเจาะที่ 24 , 36 , 48 รู

ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าคงที่เท่ากับ 20% อัตราการป้อนสารละลายคงที่เท่ากับ 0.015 ลิตรต่อวินาที

การทดลองที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ยระยะการกระจาย
1	134.5	135.5	136	135.3333
2	135.5	136.5	134	135.3333
3	130.5	129	128	129.1667
4	143.5	143.5	142	143.0000
5	129.5	130	130	129.8333
6	125	125	127	125.6667
7	135	133	135.5	134.5000
8	132	132	131	131.6667
9	130	130.5	129.5	130.0000
10	173	173.5	172	172.8333
11	150	150	152	150.6667
12	134	131	127.5	130.8333
13	135	134	136	135.0000
14	133	131.5	126.5	130.3333

#### ตารางที่ 5-1 ผลการทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, เซนติเมตร	ครั้งที่ 2, เซนติเมตร	ครั้งที่ 3, เซนติเมตร	เฉลี่ยระยะ การกระจาย, เซนติเมตร
15	125	127.5	126	126.1667
16	142	140	143.5	141.8333
17	134	131	133	132.6667
18	128	130	129	129.0000
19	123	121	126	123.3333
20	122	125	121	122.6667
21	118.5	114.5	120	117.6667
22	131.5	135	139	135.1667
23	125	130	133	129.3333
24	119.5	124	121.5	121.6667
25	121	125	130	125.3333
26	122	123.5	126.5	124.0000
27	119	122.5	125.5	122.3333
28	140	144	142	142.0000
29	139	138	139	138.6667
30	135	134	136	135.0000
31	132.5	138	135.5	135.3333
32	134.5	139	136.5	136.6667
33	134	136	132	134.0000
34	140	144.5	142	142.1667
35	133.5	138	139.5	137.0000
36	131	134	135.5	133.5000
37	163.5	159	160.5	161.0000
38	141	136	139.5	138.8333
39	137	135.5	138.5	137.0000
40	139	140.5	142	140.5000
41	138.5	136	137.5	137.3333

ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ผลการทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, เซนติเมตร	ครั้งที่ 2, เซนติเมตร	ครั้งที่ 3, เซนติเมตร	เฉลี่ยระยะ การกระจาย, เซนติเมตร
42	136	133	134.5	134.5000
43	150	153	153.5	152.1667
44	143	148.5	150	147.1667
45	138.5	147	139.5	141.6667
46	155	154	160	156.3333
47	154	157	151	154.0000
48	138	148	133	139.6667
49	134	136	136	135.3333
50	135	134	137.5	135.5000
51	130	126	122.5	126.1667
52	152	152	149.5	151.1667
53	139.5	140	131	136.8333
54	140	139	123	134.0000
55	138	139	140	139.0000
56	138.5	141	143.5	141.0000
57	136	132	134	134.0000
58	139	135.5	141	138.5000
59	137.5	138.5	135	137.0000
60	137	138.5	140	138.5000
61	128.5	129	138.5	132.0000
62	129	128.5	137.5	131.6667
63	133.5	137.5	135	135.3333
64	146	143	154.5	147.8333
65	136	140	141.5	139.1667
66	131.5	130	132	131.1667
67	135.5	137.5	140.5	137.8333
68	137.5	141.5	145.5	141.5000
69	134.5	141.5	143.5	139.8333
70	151.5	146.5	140.5	146.1667

**ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ผลการทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, เซนติเมตร	ครั้งที่ 2, เซนติเมตร	ครั้งที่ 3, เซนติเมตร	เฉลี่ยระยะ การกระจาย, เซนติเมตร
71	132.5	127.5	133.5	131.1667
72	127.5	134.5	126.5	129.5000
73	137	135	134	135.3333
74	134	135.5	127.5	132.3333
75	131.5	126.5	124	127.3333
76	131	134.5	135	133.5000
77	127	127.5	125.5	126.6667
78	126.5	124	125	125.1667
79	152.5	155	152.5	153.3333
80	128	126	130	128.0000
81	110	111.5	115.5	112.3333

**ตารางที่ 5-1 (ต่อ) ผลการทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว**

จากผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5-1 นำค่าระยะการกระจายตัวของหยดของเหลวและปัจจัยต่างๆ ของแต่ละการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการถดถอย และเลือกสมการที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการคำนวณทุกกรณี (All Possible Regression) ซึ่งได้สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุดคือ

$$D = -548.67438 + 0.14092 X_1 + 1.52191 X_2 - 21.20370 X_3 - 0.77572 X_4 - 6.97220 \times 10^{-6} X_1^2 - 0.01606 X_2^2 + 3.22222 X_3^2 + 0.00424 X_4^2; R^2 = 0.54 \quad (5-1)$$

โดยที่ D = รัศมีของของอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

$X_1$  = ความเร็วรอบของมอเตอร์

$X_2$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด

$X_3$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ

$X_4$  = จำนวนของรูเจาะ

SUMMARY OUTPUT	
<b>Regression Statistics</b>	
Multiple R	0.73232553
R Square	0.53630067
Adjusted R Square	0.48477853
Standard Error	6.92396982
Observations	81.00000000

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	8	3992.222222	499.0277778	10.40912895	1.46011E-09
Residual	72	3451.777778	47.94135802		
Total	80	7444			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
INTERCEPT	-548.67438	163.84137	-3.348814468	0.00129391	-875.2859995	-222.0627659
X Variable 1	0.14092284	0.032653504	4.315703457	4.98866E-05	0.07582931	0.206016369
X Variable 2	1.52191358	0.41070982	3.70556901	0.000410896	-0.70317903	2.34064813
X Variable 3	-21.2037037	9.837200769	-2.155461111	0.034469322	-40.81379277	-1.593614639
X Variable 4	-0.77572016	0.819766731	-0.94626939	0.347176198	-2.409894253	0.858453924
X Variable 5	-6.9722E-06	1.632E-06	-4.272207196	5.83024E-05	-1.02255E-05	-3.7189E-06
X Variable 6	-0.01606481	0.004079988	-3.937465862	0.000188193	-0.024198118	-0.007931512
X Variable 7	3.22222222	1.631995337	1.974406513	0.052171702	-0.031098987	6.475543432
X Variable 8	0.00424383	0.011333301	0.374456408	0.709165389	-0.018348681	0.026836336

### ตารางที่ 5.2 การวิเคราะห์การทดลองระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 5-1 นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการ (5-1) และคำนวณหาค่าความแตกต่างที่สภาวะการทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าที่ได้จากการทำนาย	error	% error
1	135.3333	140.3907	5.057365	3.60235
2	135.3333	134.1376	-1.195720	-0.89141
3	129.1667	129.1068	-0.059910	-0.04641
4	143.0000	135.2981	-7.701900	-5.69254
5	129.8333	129.045	-0.788310	-0.61088
6	125.6667	124.0142	-1.652510	-1.33252
7	134.5000	136.6500	2.149955	1.57333
8	131.6667	130.3969	-1.269800	-0.97379
9	130.0000	125.3660	-4.633990	-3.69637
10	172.8333	145.1253	-27.708100	-19.0925
11	150.6667	138.8722	-11.7945	-8.49304
12	130.8333	133.8413	3.007995	2.247434
13	135.0000	140.0327	5.03268	3.593933
14	130.3333	133.7796	3.446262	2.576075
15	126.1667	128.7487	2.582068	2.005509
16	141.8333	141.3845	-0.4488	-0.31743
17	132.6667	135.1314	2.464779	1.823987
18	129.0000	130.1006	1.100585	0.845949
19	123.3333	137.008	13.67467	9.980927
20	122.6667	130.7549	8.088250	6.185810
21	117.6667	125.7241	8.057389	6.408789
22	135.1667	131.9154	-3.251260	-2.464650
23	129.3333	125.6623	-3.671010	-2.921330
24	121.6667	120.6315	-1.035200	-0.858150
25	125.3333	133.2673	7.933925	5.953394
26	124.0000	127.0142	3.014174	2.373100
27	122.3333	121.9833	-0.35002	-0.286940
28	142.0000	148.8417	6.841738	4.596653
29	138.6667	142.5887	3.921987	2.750561

### ตารางที่ 5.3 ค่า ERROR ของระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง, ซม.	ค่าที่ได้จากการทำนาย, ซม.	error	% error
30	135.0000	137.5578	2.557793	1.859431
31	135.3333	143.7491	8.415811	5.854512
32	136.6667	137.4961	0.829394	0.603213
33	134.0000	132.4652	-1.534800	-1.158640
34	142.1667	145.101	2.934328	2.022266
35	137.0000	138.8479	1.847911	1.330888
36	133.5000	133.817	0.317049	0.236927
37	161.0000	153.5763	-7.423690	-4.833870
38	138.8333	147.3232	8.489896	5.762768
39	137.0000	142.2924	5.292368	3.719362
40	140.5000	148.4837	7.983720	5.376832
41	137.3333	142.2306	4.897302	3.443212
42	134.5	137.1998	2.699775	1.967769
43	152.1667	149.8356	-2.331100	-1.555770
44	147.1667	143.5825	-3.584180	-2.496250
45	141.6667	138.5516	-3.115040	-2.248290
46	156.3333	145.4590	-10.874300	-7.475840
47	154	139.2060	-14.794000	-10.627400
48	139.6667	134.1751	-5.491570	-4.092840
49	135.3333	140.3664	5.033114	3.585696
50	135.5000	134.1134	-1.386640	-1.033930
51	126.1667	129.0825	2.915835	2.258893
52	151.1667	141.7183	-9.448370	-6.667010
53	136.8333	135.4652	-1.368120	-1.009940
54	134.0000	130.4344	-3.565650	-2.733670
55	139.0000	143.3484	4.348378	3.033434
56	141.0000	137.0953	-3.904710	-2.848170
57	134.0000	132.0644	-1.935570	-1.465620
58	138.5000	138.2558	-0.244220	-0.176640

**ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ค่าERRORระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง, ซม.	ค่าที่ได้จากการทำนาย, ซม.	error	% error
59	137.0000	132.0027	-4.997300	-3.785760
60	138.5000	126.9718	-11.528200	-9.079310
61	132.0000	139.6076	7.6076350	5.449297
62	131.6667	133.3546	1.687884	1.265711
63	135.3333	128.3237	-7.009640	-5.462470
64	147.8333	148.0830	0.249621	0.168568
65	139.1667	141.8299	2.663203	1.877745
66	131.1667	136.799	5.632342	4.117239
67	137.8333	142.9904	5.157027	3.606556
68	141.5	136.7373	-4.762720	-3.483120
69	139.8333	131.7064	-8.126920	-6.170480
70	146.1667	144.3422	-1.82446	-1.26398
71	131.1667	138.0891	6.922459	5.013037
72	129.5	133.0583	3.558265	2.674216
73	135.3333	139.9657	4.632348	3.309631
74	132.3333	133.7126	1.379264	1.031514
75	127.3333	128.6817	1.348403	1.047858
76	133.5	134.8731	1.373088	1.018059
77	126.6667	128.62	1.953337	1.518688
78	125.1667	123.5891	-1.57752	-1.27643
79	153.3333	136.2249	-17.1084	-12.5589
80	128	129.9719	1.971854	1.517139
81	112.3333	124.941	12.60766	10.09089

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ค่าERRORระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลว

## 5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลว

จากการทดลองโดยใช้หัวฉีดแบบหมุนเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลวจะ  
ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5-4 ถึงตารางที่ 5-9 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ดังตารางที่ 5-10 หาสมการ  
ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ที่มีปัจจัย\*\* ดังต่อไปนี้

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 9000 , 10000 , 11000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
2. ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่ 10 , 20 , 30 % นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อัตราการป้อนสารละลายที่ 0.01 , 0.015 , 0.02 ลิตรต่อนาที

ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะมีค่าคงที่เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และจำนวนรูเจาะคงที่เท่ากับ 36 รู ได้สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$d = 0.00040 - 1.55056 \times 10^{-7} X_1 + 0.00015 Y_2 + 0.09875 Y_3 + 6.32438 \times 10^{-12} X_1^2 - 3.73647 \times 10^{-6} Y_2^2 - 5.53493 Y_3^2 - 8.19139 \times 10^{-12} X_1 Y_2^2 + 0.00058 X_1 Y_3^2 + 1.55045 \times 10^{-13} Y_2 X_1^2 - 0.09516 Y_2 Y_3^2 - 8.71146 \times 10^{-10} Y_3 X_1^2 + 6.61095 \times 10^{-5} Y_3 Y_2^2 \quad ; R^2 = 0.96 \quad (5-2)$$

- โดยที่
- d = ขนาดของหยดของของเหลว
  - $X_1$  = ความเร็วรอบของมอเตอร์
  - $Y_2$  = ความเข้มข้นของสารละลาย
  - $Y_3$  = อัตราการป้อนสารละลาย

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยดของของเหลว, มม.
1	0.00125	0.001094	0.001094	0.001146
2	0.001094	0.00125	0.000938	0.001094
3	0.000938	0.001094	0.000938	0.00099
4	0.002188	0.001875	0.001875	0.001979
5	0.001718	0.001328	0.002109	0.001718
6	0.001484	0.001563	0.001641	0.001563
7	0.001875	0.001406	0.001484	0.001588
8	0.001718	0.001641	0.001875	0.001745
9	0.001718	0.001718	0.001875	0.00177
10	0.00125	0.00125	0.001094	0.001198
11	0.000938	0.000938	0.000938	0.000938
12	0.000938	0.000625	0.000781	0.000781
13	0.001563	0.00125	0.001563	0.001458
14	0.001563	0.001563	0.001797	0.001641
15	0.001797	0.001172	0.001718	0.001562
16	0.001406	0.001406	0.001328	0.00138
17	0.001796	0.001875	0.001718	0.001796

ตารางที่ 5-4 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว, มม.
18	0.001563	0.001563	0.001641	0.001589
19	0.000625	0.000938	0.000938	0.000833
20	0.000938	0.000938	0.000938	0.000938
21	0.000625	0.000625	0.000781	0.000677
22	0.001406	0.001875	0.001563	0.001615
23	0.001563	0.001328	0.001797	0.001562
24	0.001563	0.001484	0.001563	0.001523
25	0.001875	0.001563	0.001641	0.001693
26	0.001563	0.001563	0.001484	0.001536
27	0.00125	0.00125	0.001328	0.001276

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) ผลการทดสอบขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 1

การทดสอบที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
1	0.000938	0.000938	0.00125	0.001042
2	0.00125	0.001094	0.000938	0.001094
3	0.000938	0.000938	0.000938	0.000938
4	0.001797	0.001875	0.001875	0.001849
5	0.002109	0.001953	0.001953	0.002005
6	0.001875	0.001328	0.001718	0.00164
7	0.001875	0.001718	0.001875	0.001823
8	0.001796	0.001875	0.001875	0.001849
9	0.001406	0.001484	0.001484	0.001458
10	0.000938	0.000938	0.000938	0.000938
11	0.000781	0.000781	0.000781	0.000781
12	0.000625	0.001094	0.001094	0.000938
13	0.001953	0.001406	0.00203	0.001796
14	0.002188	0.001797	0.001797	0.001927

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
15	0.001563	0.001641	0.001563	0.001589
16	0.001953	0.001875	0.001875	0.001901
17	0.001718	0.001875	0.001875	0.001823
18	0.001484	0.001641	0.001563	0.001563
19	0.00125	0.000625	0.000938	0.000938
20	0.000625	0.000625	0.000781	0.000677
21	0.000625	0.000938	0.000625	0.000729
22	0.001563	0.001797	0.001718	0.001692
23	0.001875	0.001875	0.001875	0.001875
24	0.001406	0.001406	0.00125	0.001354
25	0.001875	0.001641	0.001875	0.001797
26	0.001484	0.001563	0.001718	0.001588
27	0.001718	0.001406	0.001328	0.001484

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 2

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
1	0.001563	0.001563	0.00125	0.001458
2	0.00125	0.001094	0.001563	0.001302
3	0.000938	0.000938	0.000938	0.000938
4	0.001875	0.001875	0.002109	0.001953
5	0.001875	0.001719	0.001953	0.001849
6	0.001718	0.001953	0.001953	0.001875
7	0.001718	0.001563	0.001875	0.001719
8	0.001641	0.001718	0.001796	0.001718
9	0.001718	0.001563	0.001563	0.001614
10	0.000938	0.000938	0.00125	0.001042
11	0.00125	0.000938	0.000938	0.001042
12	0.00125	0.001094	0.000625	0.00099

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
13	0.001718	0.002031	0.002031	0.001927
14	0.001563	0.001563	0.001797	0.001641
15	0.001484	0.001563	0.001406	0.001484
16	0.001718	0.001875	0.001875	0.001823
17	0.002031	0.001875	0.002031	0.001979
18	0.001875	0.001641	0.001718	0.001745
19	0.000625	0.000625	0.000938	0.000729
20	0.000625	0.000625	0.000938	0.000729
21	0.000938	0.000781	0.000938	0.000885
22	0.001641	0.001718	0.001563	0.001641
23	0.001797	0.001563	0.001953	0.001771
24	0.001718	0.001563	0.001718	0.001666
25	0.001718	0.001875	0.001875	0.001823
26	0.001641	0.001718	0.001875	0.001745
27	0.001563	0.001875	0.001641	0.001693

ตารางที่ 5.6 (ต่อ) ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 3

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
1	0.001875	0.001563	0.000188	0.001208
2	0.00125	0.001406	0.00125	0.001302
3	0.001563	0.000938	0.00125	0.00125
4	0.001641	0.001641	0.001563	0.001615
5	0.001563	0.001563	0.002031	0.001719
6	0.002031	0.001875	0.002031	0.001979
7	0.001875	0.001875	0.001953	0.001901
8	0.001875	0.001953	0.001875	0.001901
9	0.001718	0.001641	0.002188	0.001849

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
10	0.00125	0.000938	0.000938	0.001042
11	0.000938	0.000781	0.000938	0.000885
12	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
13	0.001328	0.001563	0.001406	0.001432
14	0.001563	0.001328	0.001953	0.001615
15	0.001172	0.001563	0.001328	0.001354
16	0.001796	0.001718	0.001563	0.001692
17	0.002109	0.001875	0.002187	0.002057
18	0.001875	0.001875	0.001953	0.001901
19	0.000938	0.000938	0.000781	0.000885
20	0.000938	0.000625	0.000938	0.000833
21	0.000938	0.000938	0.000781	0.000885
22	0.001563	0.001563	0.00203	0.001718
23	0.001328	0.001328	0.001875	0.00151
24	0.001406	0.001484	0.00125	0.00138
25	0.001641	0.001796	0.001563	0.001667
26	0.001641	0.001563	0.001563	0.001589
27	0.001328	0.00125	0.00125	0.001276

ตารางที่ 5.7 (ต่อ) ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 4

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
1	0.000625	0.000313	0.000625	0.000521
2	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
3	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
4	0.000625	0.000625	0.000391	0.000547
5	0.000391	0.000547	0.000469	0.000469
6	0.000703	0.000547	0.000391	0.000547

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่	ครั้งที่ 1, มม.	ครั้งที่ 2, มม.	ครั้งที่ 3, มม.	ขนาดของหยด ของของเหลว
7	0.000547	0.000391	0.000625	0.000521
8	0.000469	0.000625	0.000625	0.000573
9	0.000625	0.000625	0.000625	0.000625
10	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
11	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
12	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
13	0.000625	0.000313	0.000547	0.000495
14	0.000625	0.000625	0.000547	0.000599
15	0.000625	0.000703	0.000625	0.000651
16	0.000625	0.000625	0.000313	0.000521
17	0.000625	0.000391	0.000781	0.000599
18	0.000391	0.000703	0.000625	0.000573
19	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
20	0.000313	0.000313	0.000313	0.000313
21	0.000393	0.000313	0.000313	0.000339
22	0.000313	0.000313	0.000391	0.000339
23	0.000625	0.000625	0.000547	0.000599
24	0.000469	0.000469	0.000625	0.000521
25	0.000625	0.000469	0.000391	0.000495
26	0.000625	0.000313	0.000469	0.000469
27	0.000469	0.000391	0.000625	0.000495

ตารางที่ 5.8 (ต่อ) ผลการทดลองขนาดของหยดของของเหลวจุดที่ 5

การทดลอง ที่	เฉลี่ยจุดที่ 1, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 2, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 3, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 4, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 5, มิลลิเมตร	เฉลี่ยขนาดของ หยดของ ของเหลว
1	0.001146	0.001042	0.001458	0.001208	0.000521	0.001075
2	0.001094	0.001094	0.001302	0.001302	0.000313	0.001021
3	0.00099	0.000938	0.000938	0.00125	0.000313	0.000885

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลอง เฉลี่ยขนาดของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง ที่	เฉลี่ยจุดที่ 1, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 2, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 3, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 4, มิลลิเมตร	เฉลี่ยจุดที่ 5, มิลลิเมตร	เฉลี่ยขนาดของ หยดของ ของเหลว
4	0.001979	0.001849	0.001953	0.001615	0.000547	0.001589
5	0.001718	0.002005	0.001849	0.001719	0.000469	0.001552
6	0.001563	0.00164	0.001875	0.001979	0.000547	0.001521
7	0.001588	0.001823	0.001719	0.001901	0.000521	0.001510
8	0.001745	0.001849	0.001718	0.001901	0.000573	0.001557
9	0.00177	0.001458	0.001614	0.001849	0.000625	0.001463
10	0.001198	0.000938	0.001042	0.001042	0.000313	0.000906
11	0.000938	0.000781	0.001042	0.000885	0.000313	0.000792
12	0.000781	0.000938	0.00099	0.00125	0.000313	0.000854
13	0.001458	0.001796	0.001927	0.001432	0.000495	0.001422
14	0.001641	0.001927	0.001641	0.001615	0.000599	0.001484
15	0.001562	0.001589	0.001484	0.001354	0.000651	0.001328
16	0.00138	0.001901	0.001823	0.001692	0.000521	0.001463
17	0.001796	0.001823	0.001979	0.002057	0.000599	0.001651
18	0.001589	0.001563	0.001745	0.001901	0.000573	0.001474
19	0.000833	0.000938	0.000729	0.000885	0.000313	0.000740
20	0.000938	0.000677	0.000729	0.000833	0.000313	0.000698
21	0.000677	0.000729	0.000885	0.000885	0.000339	0.000879
22	0.001615	0.001692	0.001641	0.001718	0.000339	0.001401
23	0.001562	0.001875	0.001771	0.00151	0.000599	0.001463
24	0.001523	0.001354	0.001666	0.00138	0.000521	0.001289
25	0.001693	0.001797	0.001823	0.001667	0.000495	0.001495
26	0.001536	0.001588	0.001745	0.001589	0.000469	0.001385
27	0.001276	0.001042	0.001693	0.001276	0.000495	0.001245

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) ผลการทดลอง เฉลี่ยขนาดของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUMMARY OUTPUT	
<b>Regression Statistics</b>	
Multiple R	0.981116615
R Square	0.962589812
Adjusted R Square	0.930523937
Standard Error	8.09443E-05
Observations	27

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	12	2.36022E-06	1.9668E-07	30.01913424	6.87802E-08
Residual	14	9.17278E-08	6.552E-09		
Total	26	2.45195E-06			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.000402931	0.003348596	0.12032828	0.905932912	-0.006779099	0.00758496
X Variable 1	-1.55056E-07	7.82238E-07	-0.1982211	0.845721577	-1.83279E-06	1.5227E-06
X Variable 2	0.000150895	8.46647E-05	1.78227013	0.096397358	-3.06925E-05	0.00033248
X Variable 3	0.098754659	0.240552865	0.41053205	0.687629684	-0.417180381	0.6146897
X Variable 4	6.32438E-12	5.07602E-11	0.12459327	0.902616855	-1.02546E-10	1.1519E-10
X Variable 5	-3.73647E-06	4.10891E-06	-0.9093577	0.378550724	-1.25492E-05	5.0763E-06
X Variable 6	-5.534937317	15.66765059	-0.3532717	0.729147661	-39.13873563	28.068861
X Variable 7	-8.19139E-12	3.96869E-10	-0.0206401	0.983824075	-8.5939E-10	8.4301E-10
X Variable 8	0.000576458	0.001550665	0.37174875	0.715646003	-0.002749391	0.00390231
X Variable 9	1.55045E-13	8.01629E-13	0.19341193	0.849414362	-1.56428E-12	1.8744E-12
X Variable 10	-0.095163676	0.090440838	-1.0522202	0.310521881	-0.289140154	0.0988128
X Variable 11	-8.71146E-10	2.33577E-09	-0.372959	0.714765033	-5.88088E-09	4.1386E-09
X Variable 12	6.61095E-05	6.7445E-05	0.98019842	0.343624142	-7.85458E-05	0.00021076

### ตารางที่ 5.10 การวิเคราะห์การทดลองขนาดของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5-9 นำมาเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ (5-2) และหาค่าความแตกต่างระหว่าง 2 ค่า ดังตารางที่ 5-11

การทดลองที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าที่ได้จากการทำนาย	error	% error
1	0.001075	0.000983	-0.000092	-0.09325
2	0.001021	0.000985	-0.000036	-0.0365
3	0.000885	0.000917	0.000032	0.034962
4	0.001589	0.001578	-0.000011	-0.00673
5	0.001552	0.00156	0.000008	0.00501
6	0.001521	0.001425	-0.000096	-0.06715
7	0.001510	0.001543	0.000033	0.021072
8	0.001557	0.001571	0.000014	0.008764
9	0.001463	0.001435	-0.000028	-0.01982
10	0.000906	0.000868	-0.000038	-0.04373
11	0.000792	0.000858	0.000066	0.077346
12	0.000854	0.000807	-0.000047	-0.0582
13	0.001422	0.00149	0.000068	0.04582
14	0.001484	0.00146	-0.000024	-0.01675
15	0.001328	0.001342	0.000014	0.010152
16	0.001463	0.00148	0.000017	0.011333
17	0.001651	0.001496	-0.000154	-0.10318
18	0.001474	0.001377	-0.000097	-0.07047
19	0.000740	0.000752	0.000012	0.015959
20	0.000698	0.000721	0.000023	0.031741
21	0.000879	0.000678	-0.000201	-0.29702
22	0.001401	0.001403	0.000002	0.001756
23	0.001463	0.001353	-0.000111	-0.08186
24	0.001289	0.001242	-0.000046	-0.03741
25	0.001495	0.001422	-0.000073	-0.05118
26	0.001385	0.001418	0.000032	0.022859
27	0.001245	0.001306	0.000061	0.046979

ตารางที่ 5.11 ค่าERRORขนาดของหยดของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลว

จากการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของหยดของของเหลวที่มีสถานะแตกต่างกัน คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะเท่ากับ 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเท่ากับ 30 มิลลิเมตร 50 มิลลิเมตร และ 70 มิลลิเมตร จำนวนรูที่เจาะเท่ากับ 24 รู 36 รู และ 48 รู ความเร็วรอบของหัวฉีดเท่ากับ 9000 รอบต่อนาที 10000 รอบต่อนาที และ 11000 รอบต่อนาที โดยกำหนดให้อัตราการป้อนสารละลายคงที่เท่ากับ 0.015 ลิตรต่อวินาที ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคงที่เท่ากับ 20% ได้สมการแสดงความสัมพันธ์คือ

$$D = -548.67438 + 0.14092 X_1 + 1.52191 X_2 - 21.20370 X_3 - 0.77572 X_4 - 6.97220 \times 10^{-6} X_1^2 - 0.01606 X_2^2 + 3.22222 X_3^2 + 0.00424 X_4^2 \quad (5.1)$$

โดยที่

$D$  = รัศมีของของอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

$X_1$  = ความเร็วรอบของมอเตอร์

$X_2$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด

$X_3$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ

$X_4$  = จำนวนของรูเจาะ

หมายเหตุ เนื่องจากการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวในแนวระดับของหยดของเหลวนี้ ได้ศึกษาในบางช่วงของปัจจัยต่างๆ เท่านั้น ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (5-1) จึงเหมาะสำหรับการนำมาศึกษาเฉพาะในช่วงต่างๆ ดังนี้

- 1 ความเร็วรอบของมอเตอร์อยู่ในช่วง 9000 - 11000 รอบต่อนาที
- 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดอยู่ในช่วง 30 - 70 มิลลิเมตร
- 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะอยู่ในช่วง 2 - 4 มิลลิเมตร
- 4 จำนวนของรูเจาะอยู่ในช่วง 24 - 48 รู

จากสมการที่ (5.1) จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จำนวนรูที่เจาะ และความเร็วรอบของหัวฉีดมีความสัมพันธ์ในเชิงพหุนามกับระยะการกระจายตัวในแนวระดับของหยดของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2 = 0.54$  ที่ความเชื่อมั่น 95% โดยจากสมการที่ (5.1) สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าระยะการกระจายตัวของหยดของของเหลวเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบแห้งที่น้อยที่สุดที่จะไม่ทำให้หยดของของเหลวติดผนังด้านในของหอบแห้ง

## 6.2 การทดลองเพื่อปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลว

จากการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของหยดของของเหลวที่สภาวะแตกต่างกัน คือ อัตราการป้อนสารละลายเท่ากับ 0.010 ลิตรต่อวินาที 0.015 ลิตรต่อวินาที และ 0.020 ลิตรต่อวินาที ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10% 20% และ 30% และความเร็วรอบของหัวฉีดเท่ากับ 9000 รอบต่อนาที 10000 รอบต่อนาที และ 11000 รอบต่อนาที โดยกำหนดให้ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะมีค่าคงที่เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และจำนวนรูเจาะคงที่เท่ากับ 36 รู ได้สมการแสดงความสัมพันธ์คือ

$$\begin{aligned}
 d = & 0.00040 - 1.55056 \times 10^{-7} X_1 + 0.00015 Y_2 + 0.09875 Y_3 + 6.32438 \times 10^{-12} X_1^2 \\
 & - 3.73647 \times 10^{-6} Y_2^2 - 5.53493 Y_3^2 - 8.19139 \times 10^{-12} X_1 Y_2^2 + 0.00058 X_1 Y_3^2 \\
 & + 1.55045 \times 10^{-13} Y_2 X_1^2 - 0.09516 Y_2 Y_3^2 - 8.71146 \times 10^{-10} Y_3 X_1^2 \\
 & + 6.61095 \times 10^{-5} Y_3 Y_2^2 \quad ; R^2 = 0.96
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

โดยที่

$d$  = ขนาดของหยดของของเหลว

$X_1$  = ความเร็วรอบของมอเตอร์

$Y_2$  = ความเข้มข้นของสารละลาย

$Y_3$  = อัตราการป้อนสารละลาย

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของหยดของของเหลวจะมีค่า Error ดังนั้นควรมีอุปกรณ์ในการวัดที่ได้มาตรฐานมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่า Error น้อยลง

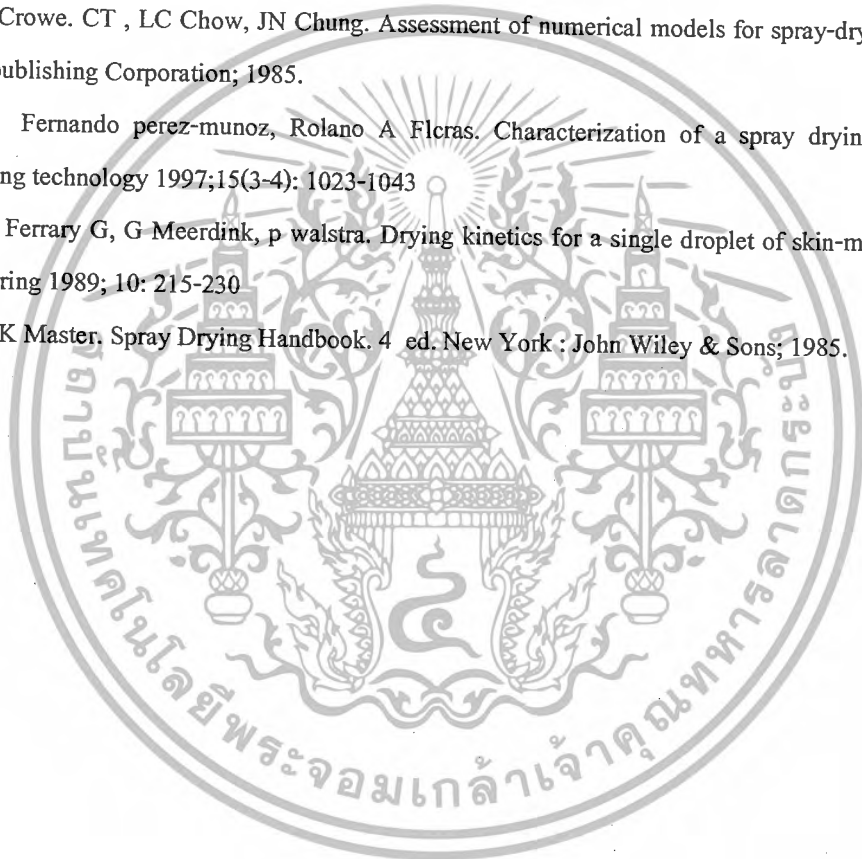
2.2. ในการวัดขนาดของหยดของของเหลวควรมีสเกลที่มีความละเอียดสูงนอกจากนั้นในการอ่านค่าควรมีอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานที่สูงกว่าสายตาเพราะในการอ่านค่าสายตาอาจจะเกิดการล้าทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านได้

2.3 ในการเลือกช่วงในการศึกษาของแต่ละปัจจัย ควรเลือกช่วงที่กว้างกว่านี้ เพื่อที่จะได้สมการความสัมพันธ์ที่ถูกต้องมากขึ้น

2.4 ในการศึกษาครั้งนี้ขอบเขตการศึกษายังไม่รวมถึงลักษณะที่มีลมร้อนมาสัมผัสที่จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวเปลี่ยนแปลง

## บรรณานุกรม

- [1] กัลยาณี โสมนัส. การผลิตกล้วยหอมผงโดยการทำแห้งแบบโพนและแบบพ่นฝอยบัณฑิต  
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2540
- [2] รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร; 2535
- [3] Chusak Narkpravit. Spray drying process of Coconut milk. Bangkok : Thesis of the degree of  
Master of Science, Asian Institute of technology; 1981
- [4] Crowe. CT , LC Chow, JN Chung. Assessment of numerical models for spray-drying. London:  
Hemisphere publishing Corporation; 1985.
- [5] Fernando perez-munoz, Rolano A Flcras. Characterization of a spray drying system for  
soymilk. Drying technology 1997;15(3-4): 1023-1043
- [6] Ferrary G, G Meerdink, p walstra. Drying kinetics for a single droplet of skin-milk. Journal of  
Food Engineering 1989; 10: 215-230
- [7] K Master. Spray Drying Handbook. 4 ed. New York : John Wiley & Sons; 1985.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Materials	Density $\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	Modulus of Elasticity $E$ (GPa)	Modulus of Rigidity $G$ (GPa)	Yield Strength (MPa)			Ultimate Strength (MPa)			% Elongation in Tensile Specimen	Poisson's Ratio $\nu$	Coef. of Therm. Expansion $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	
				Tens.	Comp.	Shear	Tens.	Comp.	Shear				
<b>Metallic:</b>													
Aluminum Wrought Alloys	2014-T6	2.79	73.1	27	414	414	172	469	469	290	10	0.35	23
	6061-T6	2.71	68.9	26	255	255	131	290	290	186	12	0.35	24
Cast Iron Alloys	Gray ASTM 20	7.19	67.0	27	-	-	-	179	666	-	0.6	0.28	12
	Malleable ASTM A-197	7.28	172	66	-	-	-	276	572	-	5	0.28	12
Copper Alloys	Red Brass C83400	8.74	101	37	70.0	70.0	-	241	241	-	35	0.35	18
	Bronze C86100	8.83	101	38	345	345	-	655	655	-	20	0.34	17
Magnesium Alloy	[Am 1004-T61]	1.83	44.7	16	152	152	-	276	276	152	1	0.30	25
Steel Alloys	Structural A36	7.85	200	75	250	250	-	400	400	-	20	0.32	12
	Stainless 304	7.86	193	75	207	207	-	517	517	-	40	0.27	17
	Tool L2	8.16	200	75	793	703	-	800	800	-	22	0.32	12
Titanium Alloy	[Ti-5Al-4V]	4.43	120	44	924	924	-	1000	1000	-	16	0.36	9.4
<b>Nonmetallic:</b>													
Concrete	Low Strength	2.38	22.1	-	-	-	12	-	-	-	-	0.15	11
	High Strength	2.38	29.0	-	-	-	38	-	-	-	-	0.15	11
Plastic Reinforced	Kevlar 49	1.45	131	-	-	-	-	210	455	203	2.8	0.34	-
	30% Glass	1.45	72.4	-	-	-	-	90	131	-	-	0.34	-
Wood Select Structural Grade	Douglas Fir	0.47	13.1	-	-	-	-	2.1 <sup>a</sup>	26 <sup>c</sup>	6.2 <sup>d</sup>	-	0.29 <sup>e</sup>	-
	White Spruce	3.60	9.65	-	-	-	-	2.5 <sup>a</sup>	36 <sup>c</sup>	6.7 <sup>d</sup>	-	0.31 <sup>e</sup>	-

ตารางที่ ก-1 แสดงความสามารถของวัสดุ

ชนิดของแรง	เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว		เหล็กหล่อและโลหะเปราะ
	$N_y$	$N_u$	$N_u$
แรงอยู่นิ่ง	1-5-2	3-4	5-6
แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือ แรงกระแทกเล็กน้อย	3	6	7-8
แรงซ้ำสองทิศทางหรือ แรงกระแทกเล็กน้อย	4	8	10-12
แรงกระแทกอย่างหนัก	5-7	10-15	15-20

ตารางที่ ก-2 ค่าตัวประกอบความดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด mm	O.D. D mm	ขนาด 02										ขนาด 22		ขนาด 32				
		ขนาด B mm	Self-aligning Ball Bearing		Single-Row Deep-Groove Ball Bearing		Angular Contact Small Angle Ball Bearing		Angular Contact Steep Angle Ball Bearing		Cylindrical Roller Bearing		ขนาด 1 mm	Spherical Roller Bearing		ขนาด B mm	Double-Row Non-Filling Notch Ball Bearing	
			C <sub>0</sub>	C	C <sub>0</sub>	C	C <sub>0</sub>	C	C <sub>0</sub>	C	C <sub>0</sub>	C		C <sub>0</sub>	C		C <sub>0</sub>	C
4	13	5	-	-	0.57	1.19												
5	16	5	-	-	0.94	1.85												
6	19	6	0.53	1.94	0.94	1.85												
7	22	7	0.66	2.05	1.35	2.51												
8	-	-	0.66	2.05	1.35	2.51												
9	26	8	0.93	2.07	1.96	3.49												
10	30	9	1.34	4.23	1.96	3.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.3	3.56	5.52
12	32	10	1.48	4.30	3.05	5.25	3.27	5.52	-	-	-	-	-	-	-	15.9	5.56	8.10
15	35	11	2.01	5.74	3.51	5.87	4.09	6.54	-	-	-	-	-	-	-	15.9	6.36	9.03
17	40	12	2.43	6.10	4.45	7.34	5.25	8.19	-	-	-	-	-	-	-	17.5	8.19	11.30
20	47	14	3.18	7.61	6.18	9.83	7.25	11.00	-	-	-	-	-	-	-	20.6	11.30	15.17
25	52	15	4.03	9.34	6.94	10.77	8.72	12.55	7.70	11.39	7.21	13.26	-	-	-	20.6	12.73	16.46
30	62	16	5.83	12.06	10.00	14.95	12.55	17.34	11.08	15.80	9.88	17.67	-	-	-	23.8	18.33	22.87
35	72	17	6.68	12.19	13.66	19.76	17.09	22.96	15.08	20.87	15.35	26.25	-	-	-	27.0	24.92	30.57
40	80	18	8.59	14.82	15.66	22.43	21.27	27.41	18.64	24.74	20.74	34.13	23	43.92	60.52	30.2	28.61	34.17
45	85	19	9.61	16.92	17.84	25.19	24.21	30.79	21.23	27.72	22.29	35.91	23	50.28	63.19	30.2	32.57	38.36
50	90	20	10.55	17.49	19.60	27.01	26.03	32.31	22.74	28.79	23.90	37.56	23	53.40	65.41	30.2	36.18	41.03
55	100	21	13.40	20.60	25.05	33.38	32.97	39.96	28.79	35.64	29.86	45.84	25	66.75	81.43	33.3	45.83	50.73
60	110	22	15.33	23.14	30.94	40.36	40.72	48.50	35.55	43.16	37.65	56.07	28	83.21	99.23	36.5	56.51	61.41
65	120	23	17.22	23.85	34.13	44.05	44.95	52.51	41.83	48.95	45.39	64.30	31	99.68	116.60	38.1	62.30	66.75
70	125	24	18.78	26.65	37.42	48.06	49.40	57.40	45.84	53.40	45.39	74.76	31	105.91	121.00	39.7	68.53	72.53
75	130	25	21.40	29.86	41.16	50.73	50.51	62.30	48.95	56.73	56.96	81.00	31	111.70	125.90	41.7	75.20	77.00
80	140	26	23.54	30.35	44.50	56.07	62.74	69.86	54.73	61.85	60.96	87.22	33	129.00	143.70	44.4	81.43	85.00
85	150	28	28.43	37.82	53.40	64.08	72.53	78.76	62.74	68.97	70.75	99.68	36	149.50	166.40	49.2	86.77	87.66
90	160	30	31.77	43.79	60.52	73.87	85.44	92.56	74.31	82.32	91.67	127.27	40	179.80	195.80	52.4	98.34	100.60
95	170	32	36.85	48.95	69.42	83.66	91.67	100.00	77.87	87.66	101.46	139.73	43	221.10	235.60	55.6	127.30	127.30

ตารางที่ ก-3 มิติมาตรฐานและแรงประเมินของโรลลิ่ง (C<sub>0</sub>, C เป็น kN)

ชนิดของแรง	N <sub>s</sub>		
	บอลเบริง	โรลเลอร์เบริง	ตัวอย่าง
แรง เรียบสม่ำเสมอ	1.0	1.0	มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องอัดอากาศ
แรงกระแทกเล็กน้อย	1.5	1.0	เครื่องตัดโลหะ ปั้นจั่น
แรงกระแทกอย่างหนัก	2.0-3.0	1.3-2.0	เครื่องบดแร่ เครื่องเขย่า

ตารางที่ ก-4 ตัวประกอบของการกระแทก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contact Angle $\alpha$ , deg	$\frac{1F^1}{C_0}$	Single-Row Bearing <sup>2</sup> $F_a/VF_r > e$		Double-Row Bearing <sup>3</sup>				e
				$F_a/VF_r \leq e$		$F_a/VF_r > e$		
		X	Y	X	Y	X	Y	
Deep groove ball bearing <sup>4</sup>								
	0.014		2.30				2.30	0.19
	0.028		1.99				1.99	0.22
	0.056		1.71				1.71	0.26
	0.084		1.55				1.55	0.28
	0.11	0.56	1.45	1.0	0	0.56	1.45	0.30
	0.17		1.31				1.31	0.34
	0.28		1.15				1.15	0.38
	0.42		1.04				1.04	0.42
	0.56		1.00				1.00	0.44
Angular-Contact groove ball bearing <sup>5</sup>								
	0.014		Use X, Y				2.78	0.23
	0.028		and e				2.40	0.26
	0.056		values				2.07	0.30
	0.084		appli-				1.87	0.34
5	0.11	0.56	cable	1.0		0.78	2.36	0.36
	0.17		to sin-				2.13	0.40
	0.28		gle-row				1.87	0.45
	0.42		deep				1.69	0.50
	0.56		groove				1.63	0.52
			bear-					
			ings					
	0.014		1.86				3.06	0.29
	0.029		1.71				2.78	0.32
	0.057		1.52				2.47	0.36
10	0.086	0.46	1.41	1.0		0.75	2.29	0.38
	0.11		1.34				2.18	0.40
	0.17		1.23				2.00	0.44
	0.29		1.10				1.79	0.49
	0.43		1.01				1.64	0.54
	0.57		1.00				1.63	0.54

ตารางที่ ก-5 ตัวประกอบ X และ Y สำหรับบอลและโรลเลอร์เบริง

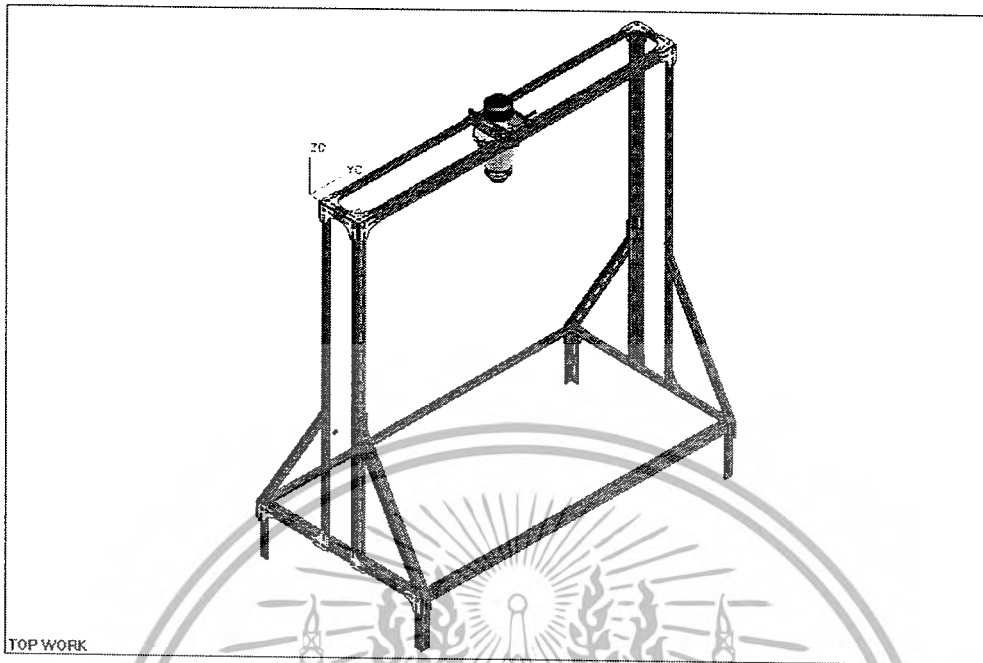
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



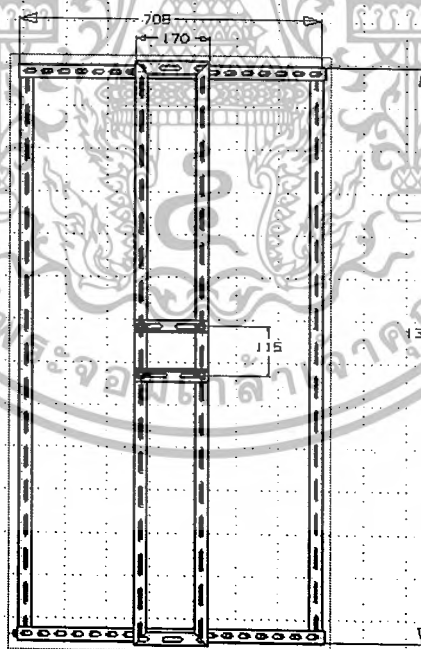
ภาคผนวก ข.

การออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

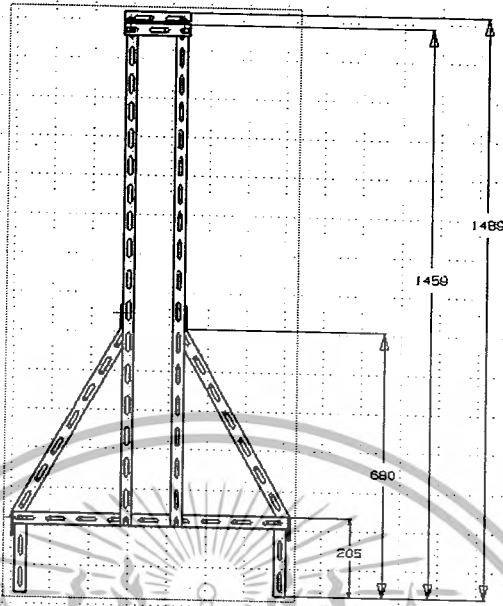


รูปที่ ข-1 โครงยึดชุดหัวฉีด

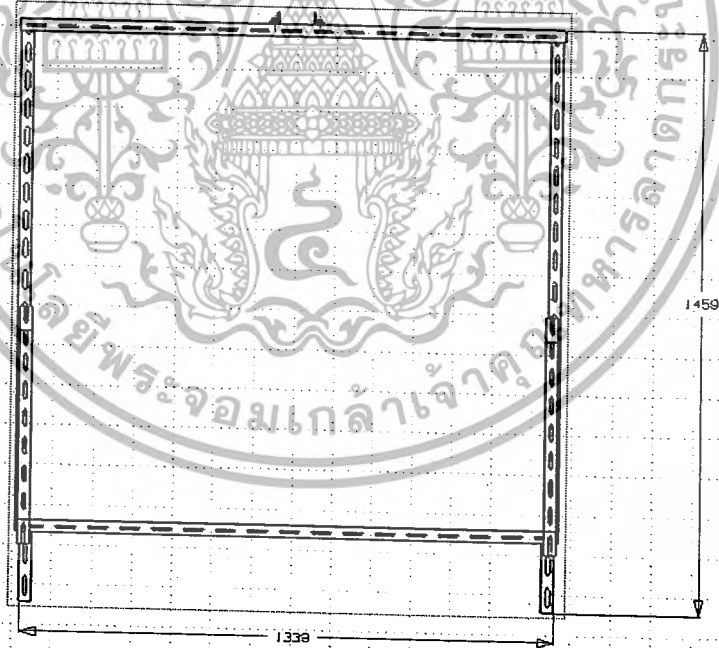


รูปที่ ข-2 โครงยึดชุดหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

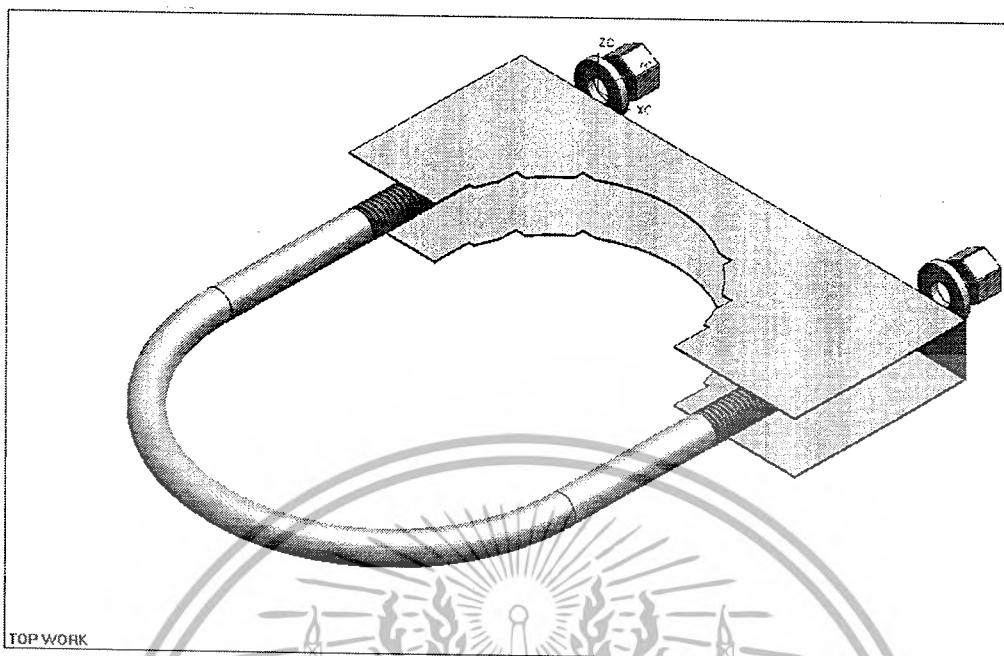


รูปที่ ข-3 โครงยึดชุดหัวถัก

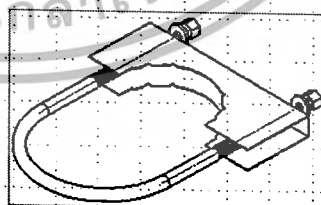
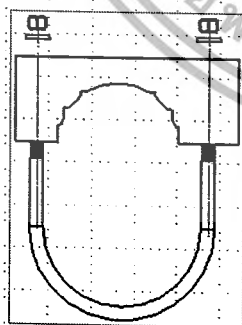
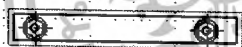


รูปที่ ข-4 โครงยึดชุดหัวถัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

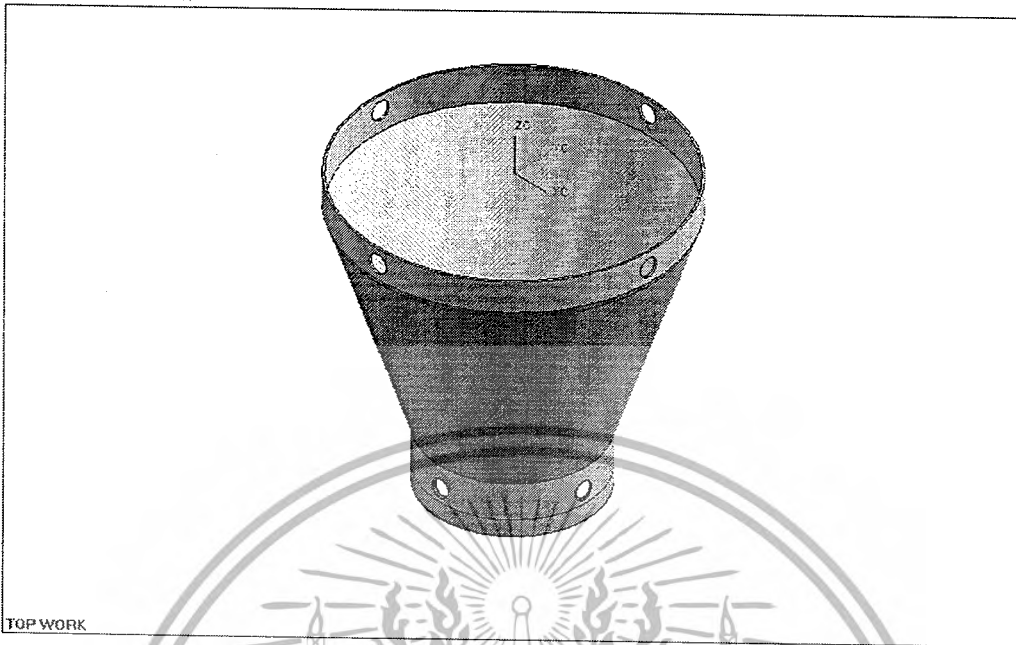


รูปที่ ข-5 แคล้ม

C Clamp  $\varnothing 80$ 

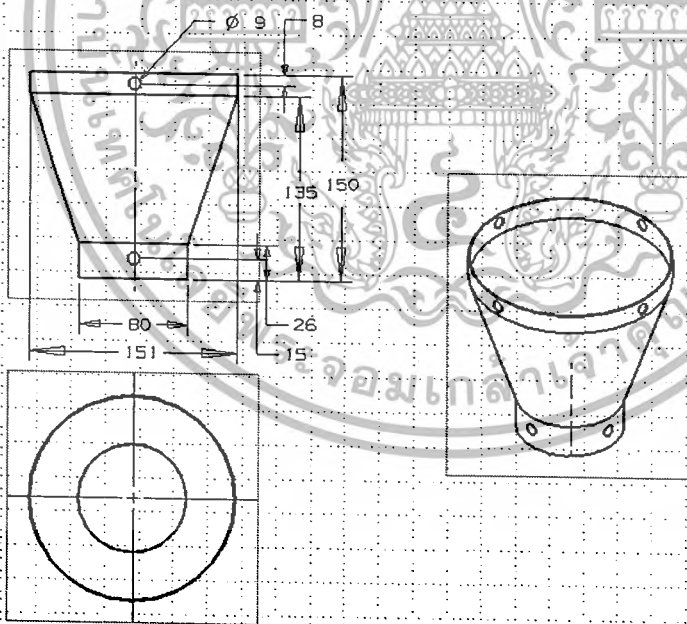
รูปที่ ข-6 แคล้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



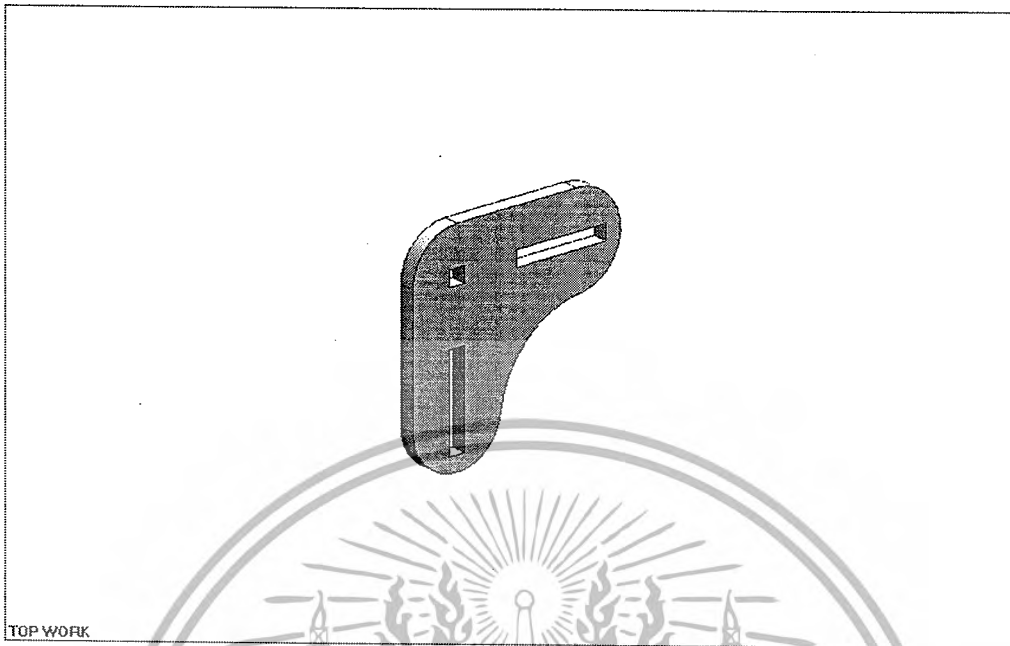
TOP WORK

รูปที่ ข-7 โครงสร้างชุดหัวฉีด

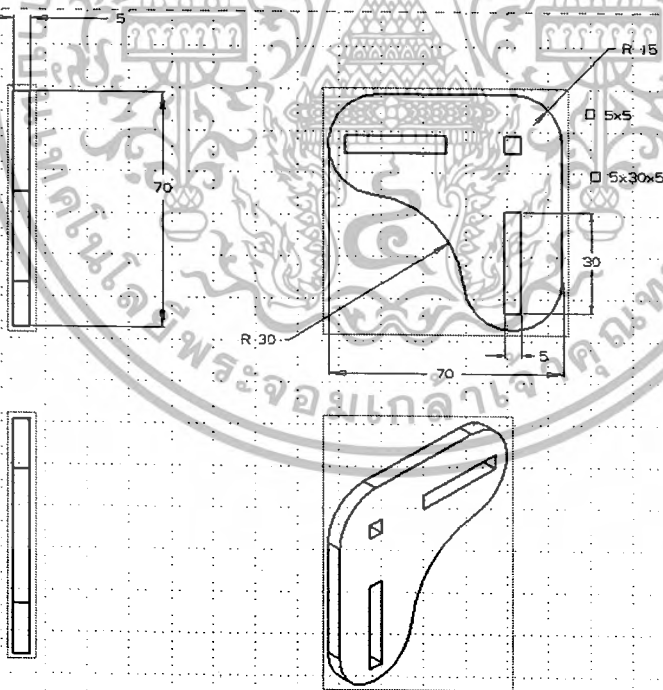


รูปที่ ข-8 โครงสร้างชุดหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

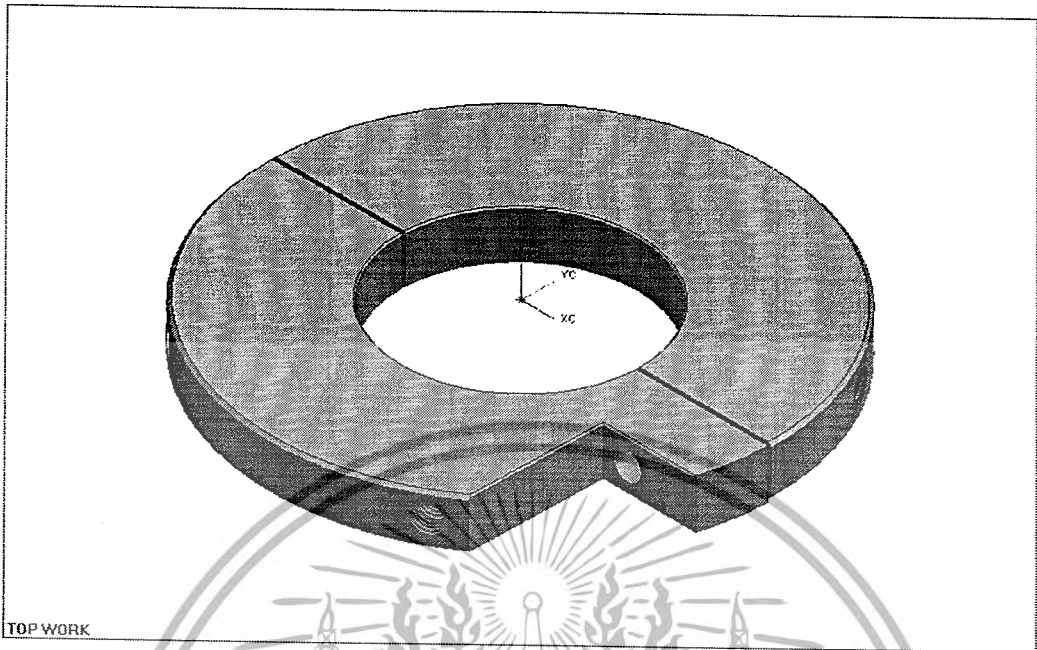


รูปที่ ข-9 ฉากยึดมุม

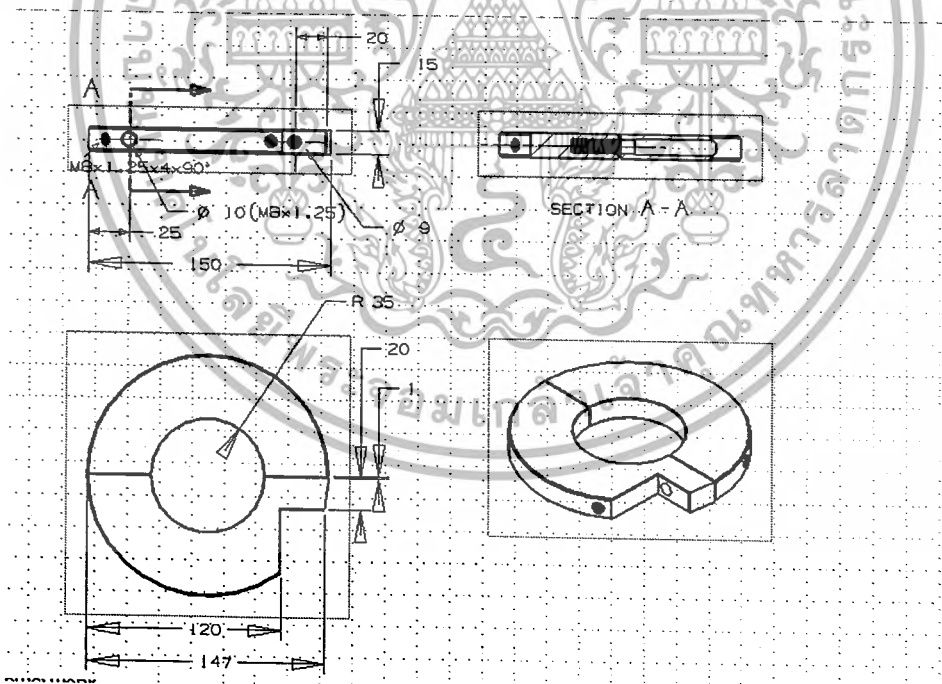


รูปที่ ข-10 ฉากยึดมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

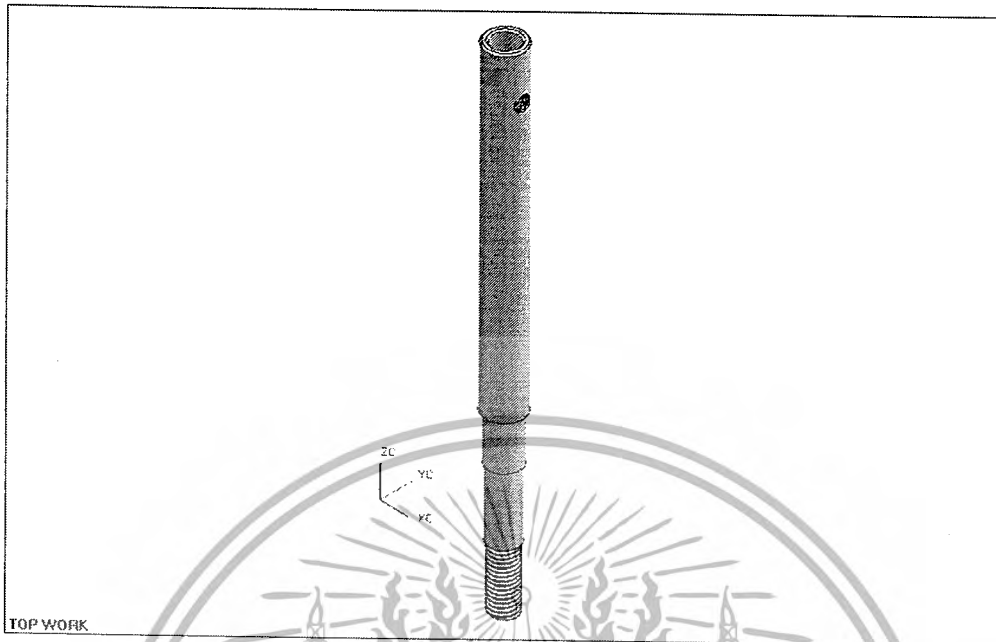


รูปที่ ข-11 ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับโครงสร้างชุดหัวฉีด

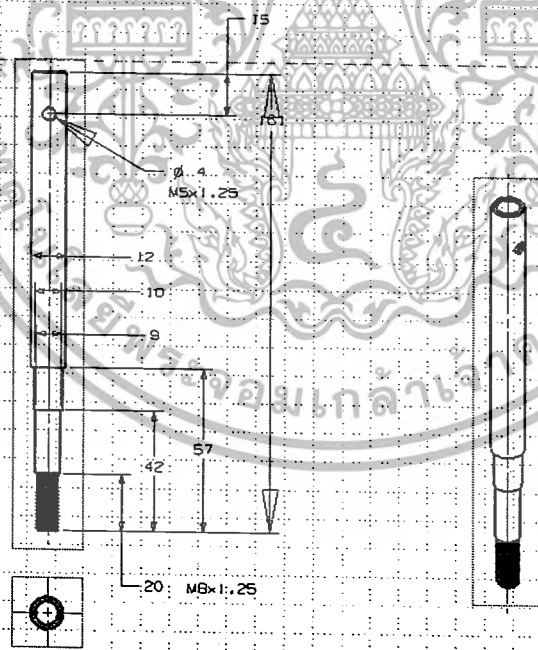


รูปที่ ข-12 ตัวจับยึดระหว่างมอเตอร์กับโครงสร้างชุดหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

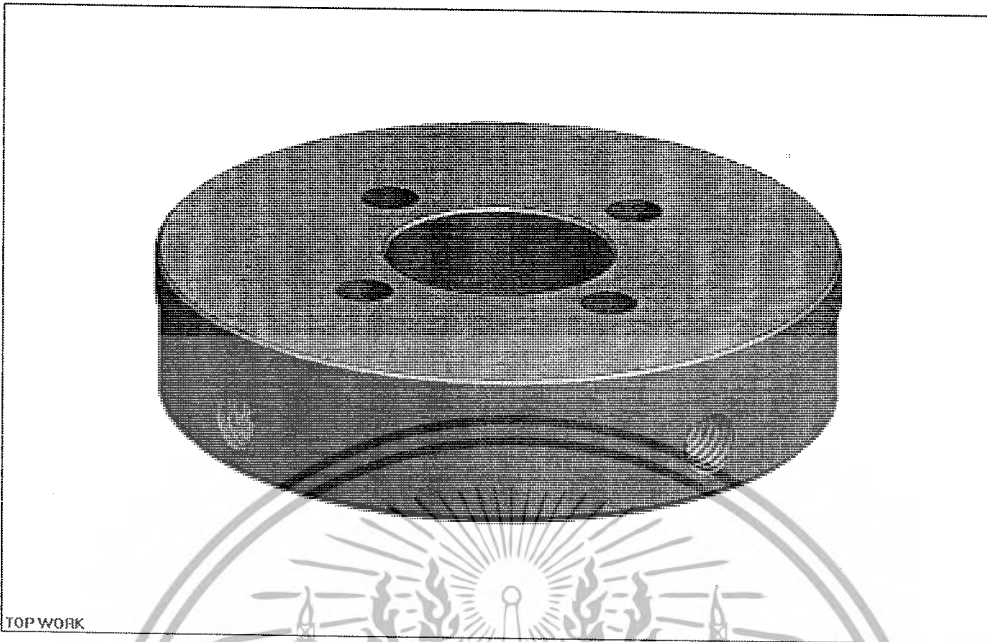


รูปที่ ข-13 เพลาส่งกำลัง



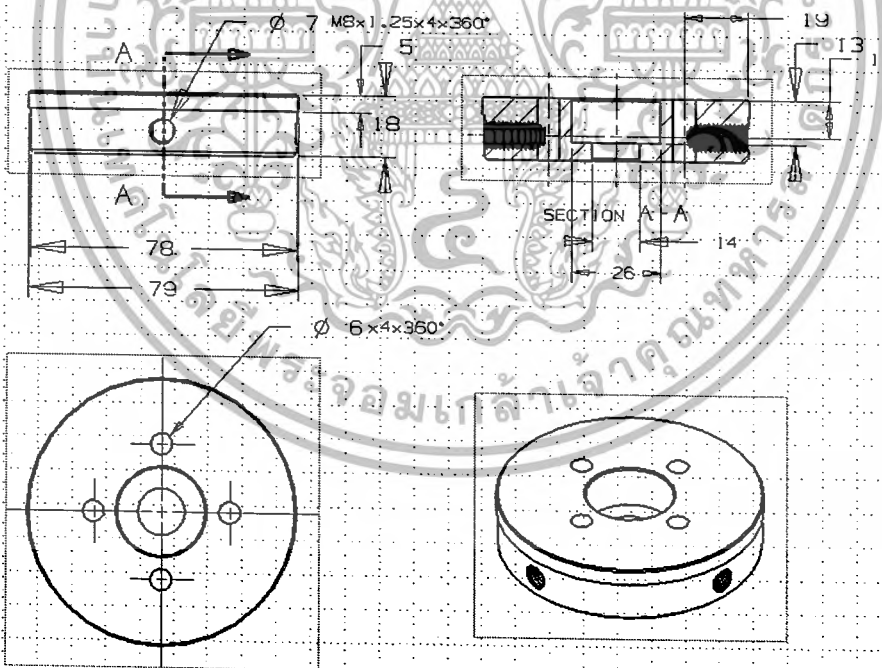
รูปที่ ข-14 เพลาส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



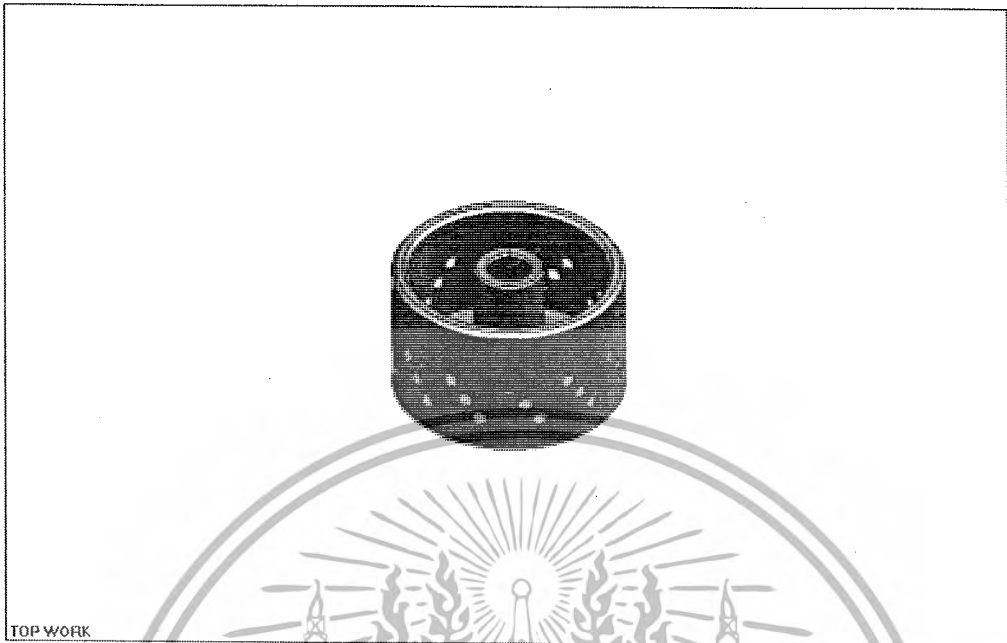
TOP WORK

รูปที่ ข-15 เสื่อแมริง



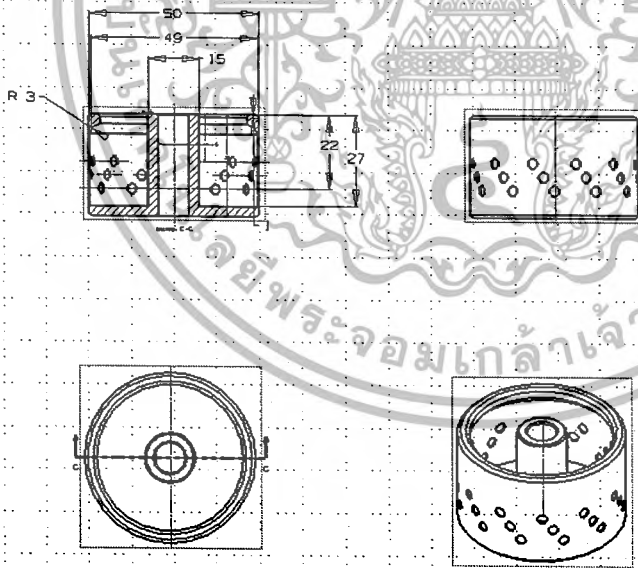
รูปที่ ข-16 เสื่อแมริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TOP WORK

รูปที่ ข-17 หัวฉีดยิ่ง



รูปที่ ข-18 หัวฉีดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้