

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและศึกษาเครื่องอบแห้งทดลองสำหรับพริกไทยขาว

โดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

Design and Study on Lab-Scale Dryer for White Pepper

by Fluidized bed Technique



T 0 3 3 9 7 6



โดย

นางสาวไอริน กาลวิบูลย์  
นายพลเอก ตั้งเจริญ  
นายเอกสิทธิ์ ศรีธรรม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เลขที่.....

เลขทะเบียน.....33976.....

วัน, เดือน, ปี.....23 ก.ย. 2542.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หอสมุดกลางให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและศึกษาเครื่องอบแห้งทดลองสำหรับพริกไทยขาวโดยเทคนิค  
ฟลูอิดไดซ์เบด

Design and Study on Lab-Scale Dryer for White Pepper by Fluidized bed Technique

ผู้จัดทำ

1. นางสาวไอริณ กาลวิบูลย์
2. นายพลเอก ตังเจริญ
3. นายเอกสิทธิ์ ศรีธรรม



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิป รัตนภาสกร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

## การออกแบบและศึกษาเครื่องอบแห้งทดลองสำหรับพริกไทยขาวโดยเทคนิค ฟลูอิดไดซ์เบด

นางสาวไอริน กาลวิบูลย์

นายพลเอก ตั้งเจริญ

นายเอกสิทธิ์ ศรีธรรม

ผศ. สาทิป รัตนภาสกร (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ ออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งทดลองโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด และศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยขาว

เครื่องอบแห้งประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ หน่วยทำความร้อนแก่อากาศด้วยไฟฟ้า, มอเตอร์, พัดลม, ส่วนอบแห้ง, ระบบเวียนกลับอากาศร้อน, ออร์ฟิส และชุดควบคุมอุณหภูมิ

การทดลองประกอบด้วย 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิของอากาศ 80 – 110 °C, ช่วงเวลาที่เมล็ดพริกไทยอยู่ในหอตลอดอบแห้ง 3 – 6 นาที และ อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 80 - 90% จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและอัตราเวียนกลับอากาศร้อนมีผลกระทบท่วมต่อการอบแห้ง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งคือ ระดับอุณหภูมิ 100 °C อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 90%

## Design and Study on Lab-Scale Dryer for White Pepper by Fluidized Bed Technique

Miss Irin Karnwiboon

Mr. Pol-ek Tangcharean

Mr. Eakasit Sritham

Assi.Prof. Satip Ratanapasgorn (Adviser)

1998

### Abstract

The main purposes of this project. : to design and fabricate the lab-scale dryer by fluidized bed technique and to study on drying for white pepper.

The dryer consisted of electrical heater unit, motor, blower, drying chamber, hot-air recirculated system and temperature controller.

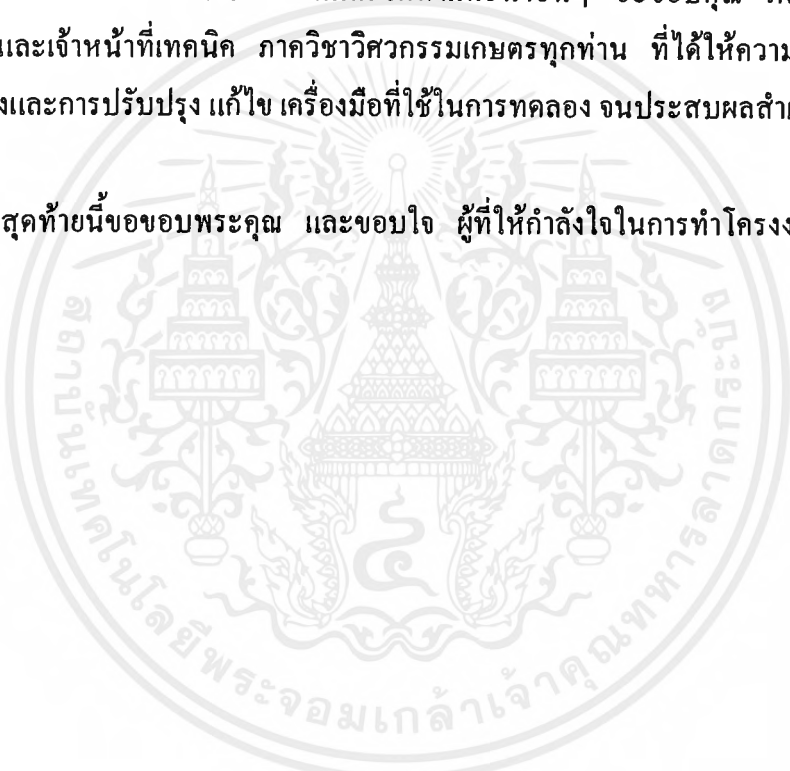
In drying experiment, 3 treatment; drying air temperature of 80 – 110 °C, grain resident time been in drying chamber in 3 – 6 minutes and hot-air recirculated rate of 80 – 90%, were conducted. The result indicated that the temperature and hot-air recirculated rate have interaction effect to drying process. The optimum condition for drying was 100°C and 90% recirculated hot-air.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผศ.สาทิพย์ รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สรรรวิศ อุ่ยวัฒนา อาจารย์กัณฑ์กนิษฐ รัตนวิวัฒนา ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบโครงการและให้คำแนะนำอื่นๆ ขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษา พี่เกียรติและเจ้าหน้าที่เทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างและการปรับปรุง แก๊ส เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง จนประสบผลสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ และขอใจ ผู้ที่ทำให้กำลังใจในการทำโครงการฉบับนี้จนสำเร็จ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(ข)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(ค)
กิตติกรรมประกาศ	(ง)
สารบัญ	(จ)
รายการตาราง	(ช)
รายการรูปประกอบ	(ซ)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(ฌ)
บทที่ 1 บทนำและวัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
บทที่ 2 งานสำรวจเอกสาร	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎี	5
2.2.1 กระบวนการอบแห้ง	5
2.2.2 ฟลูอิดไดเซชัน	6
2.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน	9
2.2.4 การคำนวณกำลังของมอเตอร์พัดลม	10
2.2.5 การหาความเร็วลม โดยใช้ออร์ฟิส	11
บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการทดลอง	14
3.1 การออกแบบเครื่องมือทดลอง	14
3.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ	14
3.1.2 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของเมล็ดพริกไทย	15
3.1.3 การคำนวณหาความสูงของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	16
3.1.4 การคำนวณหาความดันลดในเบด	16
3.1.5 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	16
3.1.6 การคำนวณหาความเร็วสุดท้ายของเมล็ดพริกไทย	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.7 การคำนวณความสูญเสียในระบบ	17
3.1.8 การคำนวณกำลังของมอเตอร์	23
3.1.9 การหาขนาดของฮีตเตอร์	24
3.2 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบ	26
3.3 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์	29
3.4 รูปแสดงอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น	31
3.5 แผนการทดลองทางสถิติ	38
3.6 สมมติฐานของการทดลอง	38
3.7 วิธีการทดลอง	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1 ลักษณะของการเกิดเบคของเมล็ดพริกไทย	41
4.2 ผลการทดลอง	41
4.2.1 อัตราการเวียนกลับอากาศร้อนและอุณหภูมิที่มีผลกระทบร่วมต่อการลดความชื้น	41
4.2.2 ผลของเวลาต่อการลดความชื้น	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุป	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	
ก. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง	51
ข. ตารางผลการทดลอง	52
ค. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น	53

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าเฉลี่ยและความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความชื้นในลักษณะตารางสองทาง	41



## รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	หอคทคลอง	7
2.2	ความสัมพันธ์ของ $C_u$ และ $Re$ ที่ค่า $\beta$ ต่างๆกัน	12
2.3	การสูญเสียความดันของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบต่าง ๆ	12
3.1	แบบจำลองการเรียงตัวของเม็ดคพริกไทย	15
3.2	ชุดทคลองโดยรวมที่ทำการออกแบบ	26
3.3	โครงของชุดทคลองอบพริกไทยขาวที่ออกแบบ	27
3.4	ความยาวช่วงต่างๆ ของท่อ	27
3.5	รายละเอียดของส่วนอบแห้ง	28
3.6	รายละเอียดของออริฟิส	28
3.7	วงจรควบคุมการทำงานของชุดทคลอง	30
3.8	ส่วน โครงของชุดทคลองที่สร้างขึ้น	31
3.9	ตะแกรงส่วนอบแห้ง (มุมมองด้านบน)	32
3.10	ตะแกรงส่วนอบแห้ง (มุมมองด้านข้าง)	33
3.11	मानอมิเตอร์ที่ใช้ในการทคลอง	34
3.12	ผู้ควบคุมการทำงานของชุดทคลอง	35
3.13	ชุดทคลองที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ (มุมมองด้านหลัง)	36
3.14	ชุดทคลองที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ (มุมมองด้านหน้า)	37
3.15	ขั้นตอนการทคลอง	40
4.1	ระดับความแตกต่างของความชื้นจากผลกระทปร่วม $A*B$	42
4.2	ความชื้น $\eta$ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการอบ 80 องศาเซลเซียส	43
4.3	ความชื้น $\eta$ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการอบ 100 องศาเซลเซียส	44
4.4	ความชื้น $\eta$ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการอบ 110 องศาเซลเซียส	45

### รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด, $m^2$
$A_1$	=	พื้นที่หน้าตัดท่อ, $m^2$
$A_2$	=	พื้นที่หน้าตัดออริฟิส, $m^2$
$C_0$	=	ตัวประกอบการปลดปล่อย
$C_p$	=	ความร้อนจำเพาะ, $kJ/kg\cdot K$
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลาง, m
$d_p^*$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคไร้หน่วย
$D_1$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ, m
$D_2$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางออริฟิส, m
e	=	ค่าความขรุขระ, m
g	=	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, $m/s^2$
$g_c$	=	แฟคเตอร์เปลี่ยนหน่วยของแรงดันและน้ำหนัก, $kg\cdot m/N\cdot s^2$
$h_1$	=	ความดันสูญเสีย, m-air
H	=	อัตราส่วนความชื้น, $kg_w/kg_{dry\ air}$
k	=	สัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย
L	=	ความยาว, m , ความสูง, m
$m_{mix}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสม, $kg/s$
$P_1, P_2$	=	ความดันในท่อตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, Pa
$P_{total}$	=	ความดันรวม, Pa
$\Delta P$	=	ความดันต่าง, Pa
Q	=	พลังงานความร้อน, kW
Re	=	ค่า Renold Number
t	=	เวลา, min
T	=	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
U	=	ความเร็ว, m/s
$U_i^*$	=	ความเร็วสุดท้ายไร้หน่วย
v	=	ปริมาตรจำเพาะของอากาศ, $m^3/kg_{dry\ air}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_1, V_2$	=	ความเร็วลมที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, (m/s)
$W$	=	กำลังงาน, kW
$w$	=	น้ำหนัก, kg
$Y$	=	ตัวประกอบการขยาย
$Z_1, Z_2$	=	ระยะจากจุดอ้างอิงจากการวัดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, m
$\beta$	=	อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของออริฟิสต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
$\epsilon$	=	สัดส่วนช่องว่าง
$\phi$	=	แฟคเตอร์รูปร่าง
$\eta$	=	ค่าประสิทธิภาพ
$\mu$	=	ค่าความหนืดสัมบูรณ์, kg/m-s
$\nu$	=	ค่าความหนืดเชิงจลน์, m <sup>2</sup> /s
$\rho$	=	ค่าความหนาแน่น, kg/m <sup>3</sup>

## สัญลักษณ์กำกับล่าง

0	=	ขณะเกิดการยุบตัว
a	=	อากาศ
ac	=	ส่วนที่เกิดขึ้นจริง
b	=	เขตของพริกไทย
c	=	การลดพื้นที่หน้าตัด
ch	=	ส่วนอบแห้ง
h	=	ค่าความร้อน
i	=	ทางเข้า
l	=	การสูญเสีย
mesh	=	ตะแกรง
mf	=	ขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เบด
mix	=	อากาศผสม
n	=	อากาศนำเข้าใหม่
p	=	อนุภาคของของแข็ง
r	=	ทางออก
R	=	อากาศเวียนกลับ
t	=	ช่วงสุดท้าย
th	=	ส่วนที่เกิดขึ้นทางทฤษฎี
w	=	น้ำ

## บทที่ 1

### บทนำและวัตถุประสงค์ของโครงการ

#### 1.1 บทนำ

พริกไทยเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทย กล่าวกันว่า พริกไทยเป็นเครื่องเทศชนิดแรกที่ประชากรเกือบทั่วโลกนิยมใช้เป็นเครื่องปรุงแต่งรสชาติของอาหาร ถิ่นกำเนิดของพริกไทยอยู่ในประเทศอินเดีย ต่อมามีการกระจายพันธุ์มายังพม่า และภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แหล่งผลิตพริกไทยที่สำคัญที่สำคัญในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ทางภาคตะวันออก คือ จันทบุรี และ ระยอง ในภาคใต้คือ พังงา สุราษฎร์ธานี สตูล นครศรีธรรมราช ภูเก็ต กระบี่ ตรัง พัทลุง สงขลา ปัตตานี ยะลา นราธิวาส และชุมพร [1]

พริกไทยเป็นพันธุ์ไม้เนื้ออ่อน ลักษณะเป็นไม้เถาหรือไม้กึ่งพุ่ม ผลพริกไทยมีลักษณะค่อนข้างกลม มีเมล็ดขนาดใหญ่ 1 เมล็ด เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร มีกลิ่นเฉพาะตัว ฉุนและมีรสเผ็ด กลิ่นหรือรสเกิดจากสารแอลคาลอยด์ ของไพเพอรีนหรือไพเพอริดีน การเก็บเกี่ยวผลผลิตพริกไทยโดยทั่วไป จะกระทำหลังจากพริกไทยเริ่มผลิดอก ออกผลประมาณ 6-7 เดือน ผลพริกไทยในแต่ละช่อจะสุกเป็นสีแดงไม่พร้อมกัน ผลที่สุกก่อนจะร่วงก่อน การเก็บเกี่ยวจึงต้องทำเมื่อสังเกตว่าในช่อเริ่มมีผลสุกบ้างแล้ว ทำนองเดียวกันพริกไทยแต่ละพุ่มช่อผลจะแก่ไม่พร้อมกัน ดังนั้นกว่าจะเก็บเกี่ยวผลหมดทั้งต้นอาจต้องทำการเก็บหลายครั้ง และการเก็บก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ว่า จะนำไปทำเป็นผลผลิตพริกไทยขาวหรือพริกไทยดำ โดยทั่วไปจะนิยมบริโภคพริกไทยขาวมากกว่า [1]

กระบวนการแปรรูปบางขั้นตอนในปัจจุบัน เช่น กระบวนการทำแห้งพริกไทยขาว ยังใช้แบบดั้งเดิม คือ การตากบนลานซีเมนต์ ซึ่งมีข้อเสียหลายอย่างเช่น ใช้เวลานาน ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศ ไม่ถูกหลักอนามัย และไม่เหมาะสมกับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม เพื่อขจัดหรือลดปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น จึงควรมีการพัฒนาารูปแบบของการลดความชื้นเมล็ดพริกไทยขาวให้มีความเหมาะสม

การลดความชื้นด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดก็เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งควรได้รับการพัฒนาและศึกษาหาความเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพริกไทยขาวต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

วัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งพริกไทยโดยใช้หลักการ

ของฟลูอิดไดซ์เบค รวมทั้งสร้างเครื่องอบต้นแบบโดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1. สร้างเครื่องอบแห้งทดลอง โดยใช้หลักการฟลูอิดไดซ์เบค
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในการอบแห้งพริกไทยขาวโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบค โดยมีปัจจัยดังนี้
  - อุณหภูมิของลมร้อน 3 ระดับ คือ 80 , 100 และ 110 องศาเซลเซียส
  - เวลาในการอบแห้ง 4 ระดับ คือ 3 , 4 , 5 และ 6 นาที
  - อัตราการเวียนกลับอากาศร้อนมาใช้ใหม่ 2 ระดับ คือ 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์



## บทที่ 2

### งานสำรวจเอกสาร

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรที่มีความชื้นสูง โดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันนั้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งภายในและต่างประเทศ ซึ่งมีรายงานการศึกษาวิจัยที่สำคัญดังนี้

นพรัตน์ ยศวัฒน์ และ อรรถสิทธิ์ ลีดำรงวัฒนากุล [2] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้น 17 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือความชื้น 14 % มาตรฐานเปียก ที่ความสูงของเบด 17 cm พบว่าอุณหภูมิของลมร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่าความเร็วของลมร้อน

มุตตาฟา ยะภา [3] ได้ศึกษาการออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในช่วงความชื้นสูงโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่องชนิดอากาศไหลขวาง โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกมีกำลังการผลิต 1 ton/h เพื่อต้องการให้เป็นต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรมในการสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่องชนิดอากาศไหลขวาง จากการดำเนินการทดลองสมรรถนะของเครื่องอบแห้งนี้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกเริ่มต้นจาก 45 % มาตรฐานแห้ง ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 24 % มาตรฐานแห้ง โดยกำหนดให้ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้งนาน 3 นาที อุณหภูมิในการอบแห้งข้าวเปลือกอยู่ในช่วง 100 – 120 °C ความสูงของเบดข้าวเปลือก 11 cm อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.86 m<sup>3</sup>/s ความเร็วของกระแสอากาศร้อนในห้องอบแห้งข้าวเปลือก 1.9 m/s อัตราการเวียนกลับอากาศร้อนมาใช้ใหม่ประมาณ 66.7 % ใช้กำลังไฟฟ้า 6,559 W ใช้เชื้อเพลิงดีเซลเฉลี่ย 5.73 L/h มีความสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ 270 MJ/h มีความสามารถในการระเหยน้ำได้ 140 kg-water/h มีค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.9 MJ/kg-water

อรอนงค์ ศรีวาทกุล [4] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกในช่วง

ความชื้นสูงของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดเซชันอย่างต่อเนื่อง โดยใช้แบบจำลองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาระงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณิตศาสตร์ควบคู่ไปกับผลการทดลอง ซึ่งพิจารณาที่อัตราการผลิตสูง ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และข้าวที่ได้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 115 °C ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก 30 % มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้าย 24 % มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม 70 % ความสูงของเบด 10 cm อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 0.043 kg/s - dry matter อัตราการเวียนกลับอากาศมาใช้ใหม่ 80 % มีอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ระเหยน้ำต่ออัตราการผลิตต่ำสุด โดยจะสิ้นเปลืองพลังงานปฐมภูมิ 7.9 MJ/kg – dry matter มีค่าใช้จ่ายในการอบแห้ง 2.05 บาทต่อกิโลกรัม-น้ำที่ระเหย นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับส่วนอบแห้งที่มีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมควรจะติดแผ่นกันเพื่อแบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งจะมีผลคือช่วยกันข้าวเปลือกไม่ให้ลอยออกจากส่วนอบแห้งเร็วเกินไปส่งผลให้มีค่า hold up (เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้ง) มากขึ้น และการติดแผ่นกันจะทำให้เบดสม่ำเสมอมากกว่าไม่ติดแผ่นกัน

Satayaprasert และ Vanishriwatana [5] ได้ทำการทดลองศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60-90 °C ความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 2.66 – 4.20 m/s และความสูงของเบดอยู่ในช่วง 3 – 12 cm จากผลการทดลองพบว่า การแพร่ของความชื้นถูกควบคุมโดยการแพร่ของความชื้นในเมล็ดข้าวโพด โดยมีสมการอบแห้งชั้นบางอยู่ในรูปสมการ

$$MR = \exp(-Kt)$$

โดยที่

$$K = 75.93 \exp \{[-2662.21 / (T+273.15)] - 0.00087H\}$$

เมื่อ

t คือ เวลา, min

T คือ อุณหภูมิ, °C

H คือ ความสูงเบด, cm

Sutherland และ Ghaly [6] ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคของฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งทำการทดลองที่ความชื้นเมล็ดข้าวเปลือก 22 และ 26 % มาตรฐานเปียก อบแห้งเหลือความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกประมาณ 18 % มาตรฐานเปียก ที่ความสูงของเบด 2.5 cm อุณหภูมิที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 40 – 90 °C ผลจากการทดลองพบว่า ในกรณีที่อบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกจาก 22 % มาตรฐานเปียกเหลือความชื้นประมาณ 17 % มาตรฐาน

เปียก พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดแปรระหว่าง 58 – 61 % แต่เมื่อลดความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเหลือ 16 % มาตรฐานเปียก พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดแปรระหว่าง 15 – 24% ซึ่งมีค่าต่ำมาก สำหรับกรณีที่ขอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกจากความชื้น 26 % มาตรฐานเปียก เหลือความชื้นประมาณ 19 % มาตรฐานเปียกโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 60 – 90 °C พบว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดแปรระหว่าง 55 – 58 % เมื่ออบให้ความชื้นต่ำกว่านี้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่ได้มีค่าต่ำมาก

Tumambing และ Driscoll [7] ได้พัฒนาแบบจำลองทางการอบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 24 % มาตรฐานเปียก ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 18 % มาตรฐานเปียก โดยใช้วิธี ฟลูอิดไดเซชันอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาการไหลของเมล็ดพืชเป็นแบบ Plug Flow (การไหลแบบสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดและต่อเนื่อง) เพื่อทำนายเวลาของการอบแห้งความชื้นของข้าวเปลือก และอุณหภูมิของอากาศตามความยาวของเครื่องอบแห้ง โดยมีการพัฒนาแบบจำลอง ศักยภาพการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 – 100 °C ความสูงของเบด 5 – 20 cm ความเร็วลม 1.5 – 2.0 m/s พบว่า อุณหภูมิของอากาศมีผลต่อการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบดและความเร็วของลมภายในเบดไม่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่ค่อยมีการศึกษาวิจัยการใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันในการอบแห้งพริกไทย ฉะนั้นโครงการที่จะศึกษาต่อไปนี้คือ การหาสภาวะและเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันในการอบแห้งพริกไทยขาว

## 2.2 ทฤษฎี

### 2.2.1 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังผิววัสดุที่ต้องการอบแห้งโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง เช่น การพา การนำ การแผ่รังสี หรือทั้งสามแบบผสมกัน เพื่อให้ให้น้ำหรือของเหลวที่อยู่ในเนื้อวัสดุระเหยออกมาอยู่ในรูปความดันไอโดยความร้อนที่ได้รับคือความร้อนแฝงในการระเหย วัสดุสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ในเมล็ดพืชโดยส่วนมากการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะชั้นบางที่สภาวะอากาศคงที่ (อุณหภูมิ ,ความชื้น, และความเร็วของอากาศ ) ในกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งอัตราการอบแห้งเป็น 2 ช่วง คือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง ที่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ความชื้นของวัสดุมีค่าสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นวิกฤตที่ผิวของวัสดุจะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อผ่านกระแสอากาศไปบนตัววัสดุ ความร้อนสัมผัสจากอากาศจะถ่ายเทไปผิววัสดุ และน้ำจะระเหยจากผิววัสดุไปผิวอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวล จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น โดยที่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นของวัสดุจะมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในตัววัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปยังอากาศ [8]

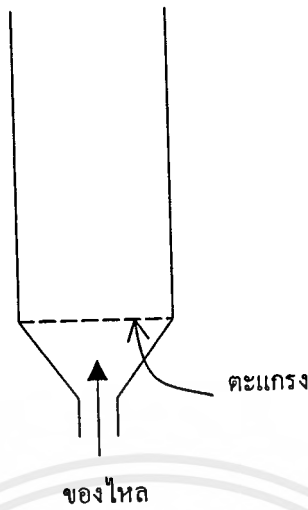
### 2.2.2 ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งนั้นมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เช่น เม็ดของแข็งถูกวางไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายในหอคอลง ของไหลที่ใช้คือก๊าซหรือของเหลวปล่อยให้ผ่านขึ้นไปทางด้านล่างของตะแกรงหรือตัวกระจายที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลจะผ่านชั้นเม็ดของแข็งออกทางส่วนบนของหอคอลง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวลอยในของไหล และแยกตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน พฤติกรรมของเม็ดของแข็งในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือมีการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งในเบดหรือหอคอลง จึงเรียกของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชัน ของไหลที่ใช้ถ้าเป็นของเหลว เรียกว่า ฟลูอิดไดเซชันของของเหลว และถ้าเป็นก๊าซเรียกว่า ฟลูอิดไดเซชันของก๊าซ [9]

#### ก. ฟลูอิดไดซ์เบด

ฟลูอิดไดซ์เบด คำว่า เบด หมายถึงอาณาเขตในหอคอลงที่มีปริมาณของเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ในหอคอลง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำให้เป็นตะแกรงหรือตัวกระจายของไหล (distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือที่ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ภายในหอคอลง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอคอลงเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลให้เข้าด้านล่างของหอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลมีความเร็วต่ำของไหลจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็ง เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเรียกเบดลักษณะนี้ว่า เบดนิ่ง (fixed bed) เมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลอีกเพียงเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันและลอยตัวอย่างมีอิสระ เรียกลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชันที่มีความเร็วต่ำสุด (minimum fluidized bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลจะทำให้เบดขยับตัวขึ้นตาม



รูป 2.1 หอตลอด

ความเร็วของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมากลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไดซ์เบดหนาแน่น (dense phase fluidized bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลมากขึ้นต่อไปจนของไหลเกือบจะพาเม็ดของแข็งออกจากทรงกระบอกเบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดเจือจาง (diluted phase fluidized bed) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วของของไหลต่อไปจนถึงความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์เซชัน (terminal velocity) ของเม็ดของแข็ง พื้นผิวชั้นบนจะหายไปและเม็ดของแข็งจะถูกพัดพาออกจากเบดติดไปกับของไหลเรียกจุดนี้ว่า การถูกพัดพาของเบด (lean phase fluidized bed) เบดลักษณะนี้จะใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง [9]

ข. กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันมักมีตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไดซ์เบด เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตระแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบด ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระ แรงที่เกิดจากความดันเท่ากับน้ำหนักของของแข็งหักออกด้วยแรงพยุงที่กระทำบนของแข็ง [10] มีค่าเท่ากับ

$$\Delta P_A = W = (A L_{mf})(1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g/g_c \tag{2.1}$$

จัดระเบียบใหม่เพื่อให้ได้สถานะต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชัน

$$\Delta P/L_{mf} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g/g_c \tag{2.2}$$

$$L_{mf} = L_0 (1-\epsilon_0)/(1-\epsilon_{mf}) \tag{2.3}$$

ปริมาณช่องว่างต่ำสุดของเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันจะมีค่ามากกว่าช่องว่างของเบดนิ่งเล็กน้อย ในขณะที่เบดยังอยู่ในลักษณะของค่าต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสามารถนำสมการของความดันตกมาใช้ได้ เมื่อแทนค่าความดันลดลงในสมการของ Ergun [10] จะได้

$$(1.75/\phi_p \epsilon_{mf}^3)(Re_{p,mf})^2 + 150[(1-\epsilon_{mf})/(\phi_p^2 \epsilon_{mf}^3)](Re_{p,mf}) = d_p^3 \rho_f [(\rho_p - \rho_f)/\mu^2]g \tag{2.4}$$

เมื่อ  $Re_{p,mf} = d_p U_{mf} \rho_f / \mu$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของหอบแห้ง,  $m^2$

$\Delta P$  คือ ความดันต่างของเบด,  $N/m^2$

$L_{mf}$  คือ ความสูงของเบดเมื่อเกิดฟลูอิดไดเซชันเบด,  $m$

$L_0$  คือ ความสูงของเบดเมื่อยวบตัว,  $m$

$\epsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด

$g_c$  คือ แฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วยของแรงดันและน้ำหนัก,  $kg\cdot m/N\cdot s^2$

$g$  คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก,  $m/s^2$

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของของแข็ง,  $kg/m^3$

$\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ,  $kg/m^3$

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค,  $m$

$\phi_p$  คือ แฟกเตอร์รูปร่าง

$W$  คือ น้ำหนักของของแข็ง,  $N$

2) ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง ( $U_t$ )

ในฟลูอิดไดเซชันนั้นมีความเร็วของของไหลอยู่ 2 ขอบเขต ขอบเขตแรกคือความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วต่ำสุดจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งหลุดลอยออกจากหอดตกลงไป ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของของแข็ง

สำหรับความเร็วของเม็ดของแข็งตกอย่างอิสระในของไหล คำนวณได้จากแรงสมดุลระหว่างแรงเสียดทานและแรงพยุง มีสมการดังนี้

$$U_t = [4gd_p (\rho_p - \rho_f)/3\rho_f C_d]^{0.5} \tag{2.5}$$

ค่า Reynold number ( $Re_p$ ) =  $d_p U_{mf} \rho_f / \mu$

$C_d$  คือ สัมประสิทธิ์ของความต้านทาน

$U_f$  คือ ความเร็วตกอิสระของอนุภาค , m/s

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล , kg/m-s

Levenspiel [11] เสนอสมการความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง

( $U_f$ )

$$U_f^* = [18/(d_p^*)^2 + (2.335-1.744\phi_p)/(d_p^*)^{0.5}]^{-1} \quad (2.6)$$

$$d_p^* = d_p [(\rho_f - \rho_p)g / \mu^2]^{1/3} \quad (2.7)$$

$$U_f = U_f^* [\rho_f^2 / \mu(\rho_p - \rho_f)g]^{1/3} \quad (2.8)$$

$U_f^*$  คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดที่ไร้หน่วย

$d_p^*$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ไร้หน่วย

### 2.2.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระแสน้ำอากาศจะเท่ากับการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมและปริมาณความร้อนที่ได้รับจากฮีตเตอร์[4] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_l + Q_h = m_{mix} (C_a + (C_v H_{a,mix})) (T - T_{mix}) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q_l$  คือ อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ฮีตเตอร์, kW

$Q_h$  คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, kW

$m_{mix}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสม, kg/s

$C_a$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ/kg-K

$C_v$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, kJ/kg-K

$H_{a,mix}$  คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศผสม,  $kg_w/kg_{dry\ air}$

$T$  คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากฮีตเตอร์, °C

$T_{mix}$  คือ อุณหภูมิของอากาศผสมก่อนเข้าฮีตเตอร์, °C

จากสมการ ( 2.9 ) ตัวแปรที่เรายังไม่ทราบค่าคือ  $T_{mix}$  ดังนั้นจะต้องทำการคำนวณหา  $T_{mix}$  โดยพิจารณาปริมาตรควบคุมบริเวณทางเข้าของพัดลมซึ่งประกอบด้วยลำอากาศ 3 ทาง คือ อากาศร้อนที่เวียนกลับ อากาศใหม่ที่นำเข้ามา และอากาศผสมที่ได้ จะได้สมการสมดุล ดังนี้

$$\text{สมดุลมวลของอากาศแห้ง; } m_R + m_n = m_{mix} \quad (2.10)$$

$$\text{สมดุลมวลของน้ำในอากาศ; } m_R H_{a,R} + m_n H_{a,n} = m_{mix} H_{a,mix} \quad (2.11)$$

$$\text{สมดุลความร้อน; } m_R h_R + m_n h_n = m_{mix} h_{mix} \quad (2.12)$$

จากสมการ ( 2.10 ), ( 2.11 ) และ ( 2.12 ) จะได้

$$m_R ( H_{a,mix} - H_{a,R} ) = m_n ( H_{a,n} - H_{a,mix} ) \quad (2.13)$$

$$m_R ( h_{mix} - h_R ) = m_n ( h_n - h_{mix} ) \quad (2.14)$$

สถานะที่จะต้องทราบคือ สถานะของอากาศเวียนกลับ และสถานะของอากาศที่นำเข้ามาใหม่ แล้วแทนค่าในสมการ ( 2.13 ) และสมการ ( 2.14 ) จะได้  $H_{a,mix}$  และ  $h_{mix}$  นำค่าทั้งสองไปเปิดไขโครเมตริกชาร์ตจะได้  $T_{mix}$

### 2.2.4 การคำนวณกำลังของมอเตอร์พัดลม

งานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลม สามารถคำนวณได้จากกำลังงานที่เอาชนะแรงเสียดทานของระบบเนื่องจากระบบมีการหมุนเวียนอากาศกลับ ดังนั้นความดันลดในระบบจึงแบ่งเป็น 2 ทางคือ ในระบบเวียนอากาศกลับ และระบบอากาศใหม่ โดยทำการคำนวณหาความดันลดของระบบหรือความสูญเสียรวม (Head Loss) ซึ่งจะประกอบด้วย ความสูญเสียหลัก (Major Loss) และความสูญเสียรอง (Minor Loss) แล้วเปรียบเทียบระหว่างระบบเวียนอากาศกลับ และระบบอากาศใหม่ว่าส่วนไหนมีความสูญเสียมากกว่า แล้วจึงนำความสูญเสียนั้นมาคำนวณกำลังของมอเตอร์จากสมการ

$$W_m = P_t (m_{mix} / \rho_a) / (\eta_r \cdot \eta_m) \quad (2.15)$$

$W_m$  คือ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์, kW

$P_t$  คือ ความดันรวม, kPa

$m_{mix}$  คือ อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$\rho_a$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m<sup>3</sup>

$\eta_r$  คือ ประสิทธิภาพของพัดลม

$\eta_m$  คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์

### 2.2.5 การหาความเร็วลมโดยใช้ออร์ฟิส (Orifice)

จากสมการ Bernoulli [12]

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.16)$$

ในกรณีนี้ของไหลที่ต้องการวัดคืออากาศซึ่งสามารถอัดตัวได้ ทำให้  $P_1 \neq P_2$  จึงต้องกำหนดตัวประกอบอีกตัวหนึ่งคือ ตัวประกอบการขยาย (Expansion factor, Y) เข้ามาแก้ด้วย สำหรับออร์ฟิสมุมฉากซึ่งใช้ในการทดลอง ค่า Y หาได้จาก

$$Y = 1 - [0.41 + 0.35(A_2/A_1)^2][(P_2 - P_1)/(kP_1)] \quad (2.17)$$

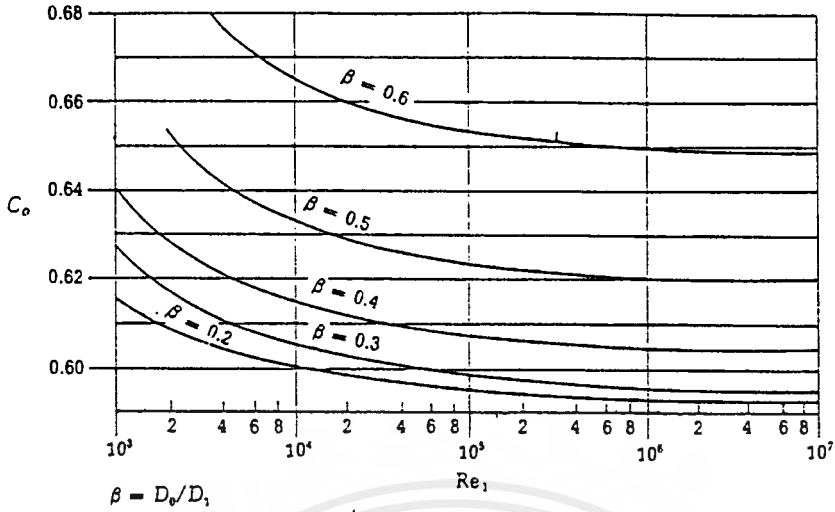
เมื่อ  $k = \frac{\text{ความจุความร้อนจำเพาะเมื่อความดันคงที่}}{\text{ความจุความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่}}$   
 จากสมการ Conservation Of Mass

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.18)$$

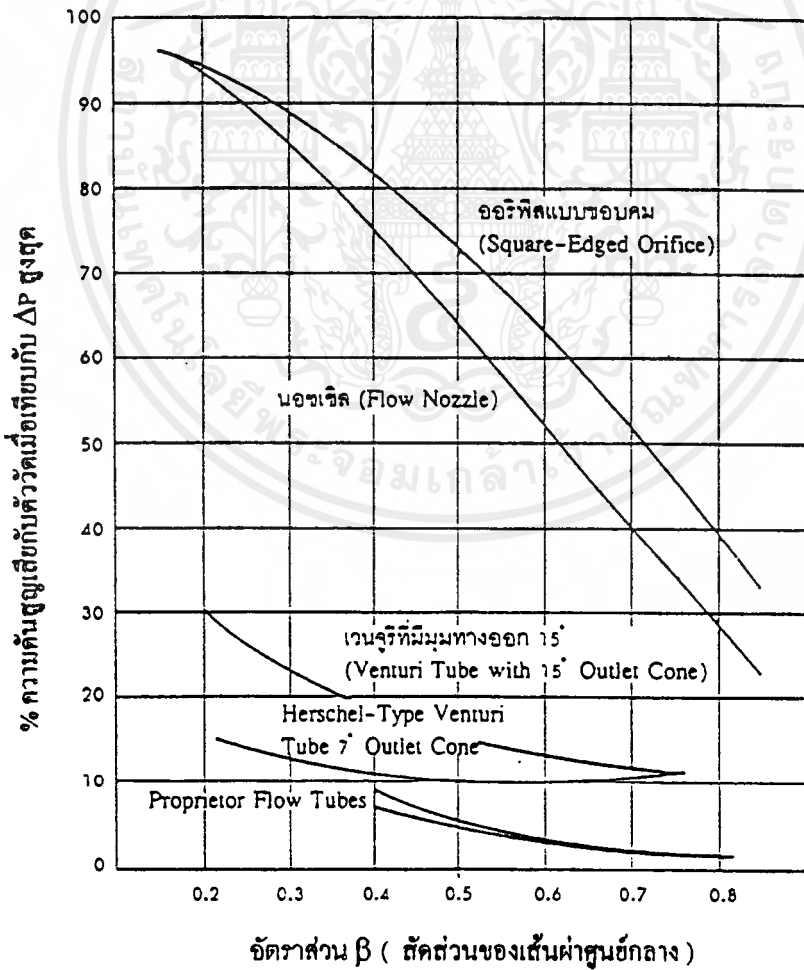
เนื่องจาก  $A_2/A_1 = D_2^2/D_1^2$  และ  $Z_1 = Z_2$  ดังนั้น

$$Q = A_2 Y \sqrt{\frac{2[(P_1 - P_2)/\rho]}{1 - (D_2^4/D_1^4)}} \quad (2.19)$$

ผลที่ได้จากสมการ (2.14) เป็นค่า Q ที่ได้จากทฤษฎีเท่านั้นในทางปฏิบัติแล้วค่า Q ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า Q ในทางทฤษฎี ดังนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่งมาคูณเพื่อให้ได้ค่า Q ที่แท้จริง สัมประสิทธิ์ตัวนี้ได้จากการทดลองเรียกว่า Coefficient of Discharge ( $C_o$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ค่า Reynolds Number ( $R_c$ ) และ ค่า  $\beta$  โดยแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งค่า  $\beta$  กำหนดจากผลต่างของความดันสูงสุด ( $\Delta P$ ) ที่ต้องการ เมื่ออัตราการไหลในระบบสูงสุด 100 inH<sub>2</sub>O แล้วคำนวณย้อนกลับมาหาค่า  $\beta$  โดยแสดงดังรูป 2.3



รูป 2.2 ความสัมพันธ์ของ  $C_d$  และ  $Re$  ที่ค่า  $\beta$  ต่าง ๆ กัน



รูป 2.3 การสูญเสียความดันของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่า } R_c = \frac{V_1 D_1}{v} = \frac{4Q_{th}}{\pi D_1 v}$$

เมื่อ  $v$  คือ ค่าความหนืดของอากาศ,  $m^2/s$

จะได้อัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจริง ( $Q_{ac}$ )

$$Q_{ac} = A_2 \cdot C_o \cdot Y \sqrt{\frac{2[(P_1 - P_2)/\rho]}{1 - (D_2^4/D_1^4)}} \quad (2.20)$$

เมื่อกำหนดให้  $P_1, P_2$  = ความดันในท่อที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ตามลำดับ, Pa

$\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ,  $kg/m^3$

$V_1, V_2$  = ความเร็วลมที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ตามลำดับ, m/s

$A_2$  = พื้นที่หน้าตัดของออริฟิส,  $m^2$

$A_1$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อ,  $m^2$

$D_2$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของออริฟิส, m

$D_1$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, m

เพราะฉะนั้น ความเร็วลมในท่อที่เกิดขึ้นจริง ( $V_{ac}$ )

$$V_{ac} = Q_{ac} / A_1 \quad (2.21)$$

## บทที่ 3

### การออกแบบและวิธีการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบเครื่องมือทดลอง

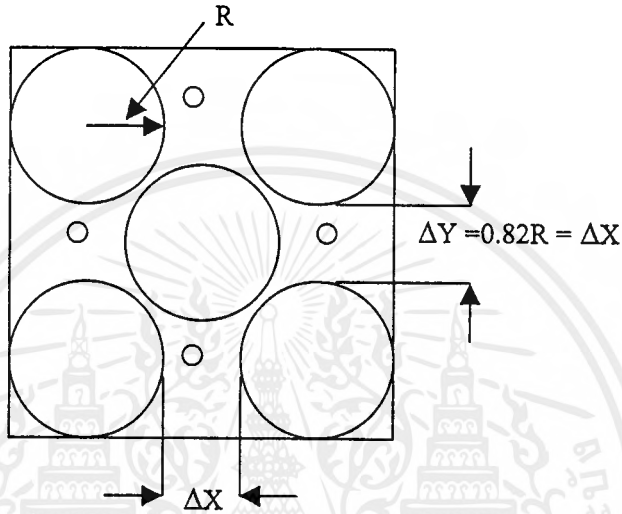
อุปกรณ์ทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดประกอบด้วยส่วนอบแห้งซึ่งมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm พร้อมทั้งระบบการหมุนเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ท่อขนาด 2.5 นิ้ว (7 cm) มีวาล์วเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน ใช้ชุดลวดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง พัดลมที่ใช้เป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีมอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

##### 3.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

- ความสูงของชั้นเมล็ดพริกไทย ( $L_p$ ) 7 cm
- เส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ดพริกไทย ( $d_p$ ) 4 mm
- ค่าแฟคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_p$ ) 1.0
- อุณหภูมิอากาศร้อน  $110^\circ\text{C}$
- ความหนืดของอากาศ ( $\mu_A$ )  $2.24 \times 10^{-5}$  kg/m.s
- ความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทยชิ้นก่อนอบแห้ง ( $\rho_p$ )  $1300$  kg/m<sup>3</sup>
- ความหนาแน่นของอากาศ ( $\rho_A$ )  $0.91$  kg/m<sup>3</sup>
- อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม  $30^\circ\text{C}$
- อัตราการไหลของอากาศ  $0.0785$  m<sup>3</sup>/s
- เส้นผ่าศูนย์กลางส่วนอบแห้ง 10 cm
- เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเหล็ก 7 cm

### 3.1.2 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของเมล็ดพริกไทย ( $\epsilon$ )

สมมุติให้เมล็ดพริกไทยเป็นทรงกลม ( $\phi_p = 1$ ) ดังนั้นลักษณะการจัดเรียงตัวของ เมล็ดพริกไทยในภาชนะบรรจุจะเป็นดังรูป 5.1 [13]



รูป 3.1 แบบจำลองการเรียงตัวของเมล็ดพริกไทย

สำหรับรูปที่แสดงนั้นเป็นระนาบ XY จากรูปจะได้  $X = 4R + 0.82R = Y$

ส่วนระนาบ XZ และ YZ ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันนั่นก็คือ

$$\Delta Z = 0.82R \text{ และ } Z = 4R + 0.82R$$

สมมุติมีเมล็ดพริกไทยอยู่ 3 ชั้น คือชั้นแรก 5 เมล็ด ชั้นที่สอง 4 เมล็ด (แสดงโดยวงกลมเล็ก) และชั้นที่สาม 5 เมล็ด (มีลักษณะเช่นเดียวกับชั้นแรก) รวมมีเมล็ดพริกไทยทั้งหมด 14 เมล็ด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทั้งหมดของเมล็ดพริกไทย} &= 14 \times \left(\frac{4}{3}\right) \times \pi \times R^3 \\ &= 14 \times \left(\frac{4}{3}\right) \times \pi \times (2)^3 \\ &= 469.1445 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของภาชนะบรรจุ} &= X \times Y \times Z \\ &= (4R + 0.82R)^3 \\ &= (4.82R)^3 = (4.82 \times 2)^3 \\ &= 895.8413 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนช่องว่างของเม็ดคพริกไทย } (\varepsilon_0) &= \frac{\text{ปริมาตรภาชนะ-ปริมาตรเม็ดคพริกไทย}}{\text{ปริมาตรภาชนะ}} \\ &= (895.8413-469.1445)/895.8413 \\ &= 0.476 \end{aligned}$$

### 3.1.3 การคำนวณหาความสูงที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $L_{mf}$ )

จากสมการ (2.3)

$$L_{mf} = L_0 (1-\varepsilon_0)/(1-\varepsilon_{mf})$$

จากการคำนวณ  $\varepsilon_0 = 0.476$

กำหนดให้  $\varepsilon_{mf} = 0.5$

$$\begin{aligned} L_{mf} &= 7(1-0.476)/(1-0.5) \\ &= 7.336 \text{ cm} \end{aligned}$$

### 3.1.4 การคำนวณหาความดันลดในเบด

จากสมการ (2.2)

$$\Delta P/L_{mf} = (1-\varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g/g_c$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \Delta P &= 0.07336 \times 9.8(1-0.5)(1300-0.91) \\ &= 466.97 \text{ Pa} \end{aligned}$$

### 3.1.5 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $U_{mf}$ )

จากสมการ (2.4)

$$(1.75/\phi_p \varepsilon_{mf}^3)(Re_{p,mf})^2 + 150[(1-\varepsilon_{mf})/(\phi_p^2 \varepsilon_{mf}^3)](Re_{p,mf}) = d_p^3 \rho_f [(\rho_p - \rho_f)/\mu^2] g$$

$$\text{เมื่อ } Re_{p,mf} = d_p U_{mf} \rho_f / \mu$$

$$\begin{aligned} [1.75/(1)(0.5)^3][Re_{p,mf}]^2 + 150[(1-0.5)/(1)^2(0.5)^3][Re_{p,mf}] \\ = (0.004)^3(0.91)(9.8)[(1300-0.91)/((2.24 \times 10^{-5})^2)] \end{aligned}$$

$$14[Re_{p,mf}]^2 + 600[Re_{p,mf}] = 1477715$$

$$\text{แต่ } Re_{p,mf} = d_p U_{mf} \rho_f / \mu$$

$$= [(0.004)U_{mf}(0.91)]/(2.24 \times 10^{-5})$$

$$= 162.5 U_{mf}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$369687.5[U_{mr}]^2 + 97500[U_{mr}] - 1477715 = 0$$

$$U_{mr} = 2 \text{ m/s}$$

### 3.1.6 การหาความเร็วสุดท้ายที่ทำให้เมล็ดพริกไทยลอยออกจากหอตกลง ( $U_t$ )

จากสมการ (2.6), (2.7) และ (2.8)

$$U_t^* = [18/(d_p^*)^2 + (2.335 - 1.744\phi_p)/(d_p^*)^{0.5}]^{-1}$$

$$d_p^* = d_p [(\rho_f(\rho_p - \rho_f)g)/\mu^2]^{1/3}$$

$$U_t = U_t^* [\rho_f^2/\mu(\rho_p - \rho_f)g]^{-1/3}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการจะได้ว่า

$$d_p^* = 0.004[(9.8 \times 0.91(1300 - 0.91))/(2.24 \times 10^{-5})^2]^{1/3}$$

$$= 113.9$$

$$U_t^* = [18/(113.9)^2 + (2.335 - 1.744)/(113.9)^{0.5}]^{-1}$$

$$= 17.6$$

$$U_t = 17.6[(0.91)^2/(2.24 \times 10^{-5})(9.8)(1300 - 0.91)]^{-1/3}$$

$$= 12.3 \text{ m/s}$$

### 3.1.7 การคำนวณความสูญเสียในระบบ

- หาความเร็วของอากาศร้อนเฉลี่ยในห้องอบแห้ง

จากการคำนวณ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดลักษณะของฟลูอิดไดเซชันสำหรับพริกไทยคือ 2 m/s ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศร้อน (Superficial velocity) ในห้องอบแห้งควรจะมีค่าสูงกว่าความเร็วของอากาศร้อนต่ำสุดอย่างน้อยประมาณ 1.5 เท่า [3] ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $2 \times 1.5 = 3 \text{ m/s}$  และคิดเผื่อสำหรับวัสดุอื่นที่มีความหนาแน่นมากกว่านี้จึงเลือกใช้ความเร็วเป็น 10 m/s

- หาอัตราการไหลของอากาศร้อนในห้องอบแห้ง

$$\text{จาก } Q = VA$$

$$= 10 (\pi/4) (0.1)^2$$

$$= 0.0785 \text{ m}^3/\text{s}$$

- หาการสูญเสียเนื่องจากอากาศใหม่ที่นำเข้า

อากาศร้อนที่ใช้ในระบบเพื่อการอบแห้งพริกไทยขาวแบบเวียนอากาศกลับมาใช้ใหม่

คิดที่ 90% และระบายออก 10% ฉะนั้นต้องนำอากาศเข้ามาใหม่อีก 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศใหม่ผ่านท่อจะเป็น

$$\begin{aligned} Q &= 0.0785 \times 0.1 \\ &= 0.00785 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนำอากาศเข้าเท่ากับ 12 cm

$$\begin{aligned} V &= Q/A \\ &= 0.00785 / [(\pi/4) 0.12^2] \\ &= 0.693 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$h_n = kV^2/2g$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่ทางเข้าท่อ,  $k = 0.78$  [14]

$$\begin{aligned} h_n &= 0.78 \times (0.693^2) / (2 \times 9.81) \\ &= 0.019 \text{ m-air} \end{aligned}$$

- หากการสูญเสียเนื่องจากระบบเวียนอากาศกลับ

ประกอบด้วยท่อตรงยาว 2.8 m ข้องอ  $90^\circ$  1 ตัว และ ออร์ฟิส 1 ตัว เนื่องจากอากาศร้อนที่เวียนกลับมาใช้คิดที่ 90%

ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q &= 0.9 \times 0.0785 \\ &= 0.07065 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= 0.07065 / [(\pi/4) 0.07^2] \\ &= 18.35 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_e &= (0.91 \times 18.35 \times 0.07) / (2.24 \times 10^{-5}) \\ &= 5,225 \end{aligned}$$

ท่อ  $e/D$  ของท่อเหล็ก = 0.00065 [14]

ได้  $f = 0.0235$

$$h_f = f(L/D)(V^2/2g)$$

$$\begin{aligned} h_f &= (0.0235)(2.8/0.07)[18.35^2/(2 \times 9.81)] \\ &= 16.13 \text{ m-air} \end{aligned}$$

ข้องอ  $90^\circ$

$$L/D = 30 \quad [14]$$

$$\begin{aligned} h_f &= f(L/D)(V^2/2g) \\ &= (0.0235)(30)(18.35^2) / (2 \times 9.81) \\ &= 12.1 \text{ m-air} \end{aligned}$$

ออริฟิส มีเส้นผ่าศูนย์กลางช่องเปิด 3.5 cm ทิศการสูญเสียคล้ายกับการไหลผ่านในลักษณะที่พื้นที่หน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

$$V = 0.07065 / [(\pi/4) 0.035^2]$$
$$= 73.43 \text{ m/s}$$

$$\text{สัดส่วนพื้นที่หน้าตัด} = (3.5 / 7)^2 = 0.25$$

$$k_c = 0.4 \quad [14]$$

$$h_1 = k_c(V^2 / 2g)$$
$$= 0.4(73.43^2) / (2 \times 9.81)$$
$$= 109.93 \text{ m-air}$$

ค่าการสูญเสียเนื่องจากระบบเวียนอากาศกลับ ( $h_{lc}$ )

$$= 16.13 + 12.1 + 109.93$$
$$= 138.16 \text{ m-air}$$

-หาค่าการสูญเสียในส่วนของท่อและวาล์วที่ปล่อยอากาศออก

วาล์ว

$$L/D \text{ ของวาล์ว} = 8 \quad [14]$$

$$\text{เลือกใช้ } f = 0.02 \quad [14]$$

ในส่วนที่มีการปล่อยอากาศออก 10% ท่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.08 cm

$$V = 0.1 \times 0.0785 / [(\pi/4) 0.0508^2]$$
$$= 3.87 \text{ m/s}$$

$$h_1 = f(L/D)(V^2/2g)$$
$$= (0.02)(8)(3.87^2) / (2 \times 9.81)$$
$$= 0.12 \text{ m-air}$$

ท่อ มีความยาว 0.27 m (เหล็กกล้าไนซ์)

$$R_e = (0.91 \times 3.87 \times 0.0508) / (2.24 \times 10^{-5})$$
$$= 7986$$

$$e/D \text{ ของท่อเหล็กกล้าไนซ์} = 0.003 \quad [14]$$

$$\text{ได้ } f = 0.037 \quad [14]$$

$$h_1 = f(L/D)(V^2/2g)$$
$$= (0.037)(0.27/0.0508)[3.87^2/(2 \times 9.81)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.15 \text{ m-air}$$

ดังนั้นค่าการสูญเสียในระบบปล่อยอากาศออก ( $h_r$ )

$$= 0.12 + 0.15 = 0.27 \text{ m-air}$$

-หาค่าการสูญเสียในระบบนำอากาศเข้าอบแห้ง

ในส่วนนี้จะเริ่มจากพัดลมถึงข้อต่อสามทาง ซึ่งจะประกอบด้วยฮีดเตอร์, ท่อยาว 2.23 m, ข้อต่อสามทาง 1 ตัว, ข้องอ 1 ตัว, ส่วนอบแห้ง และ ออร์ฟิส 2 ตัว

ท่อ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.07 m

$$V = 0.0785 / [(\pi/4) 0.07^2]$$

$$= 20.39 \text{ m/s}$$

$$R_c = (0.91 \times 20.39 \times 0.07) / (2.24 \times 10^{-5})$$

$$= 58,006$$

เมื่อ  $e/D = 0.00065$  และ  $f = 0.0235$

$$h_i = f (L/D) (V^2/2g)$$

$$= (0.0235)(2.23/0.07)[20.39^2/2 \times 9.81]$$

$$= 15.86 \text{ m-air}$$

ฮีดเตอร์ คิดการสูญเสียในลักษณะที่เป็นการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยท่อที่ใช้ทำฮีดเตอร์ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 cm

$$\text{พื้นที่หน้าตัดขวงการไหลของแผ่นฉนวน} = (0.7 \times 6.5) + (0.7 \times 5.8)$$

$$= 8.61 \text{ cm}^2$$

รวมพื้นที่จากลดความร้อนอีก 20%

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ที่ขวงการไหลในฮีดเตอร์} = 1.2 \times 8.61$$

$$= 10.33 \text{ cm}^2$$

$$\text{สัดส่วนพื้นที่หน้าตัด}$$

$$= 10.33 / [(\pi/4) \times 7^2]$$

$$= 0.27$$

$$\text{ที่ทางเข้าได้ } k_c = 0.38 \quad [14]$$

$$h_{ii} = k_c (V^2/2g)$$

$$= (0.38) / [20.39^2 / (2 \times 9.81)]$$

$$= 8.05 \text{ m-air}$$

$$\text{ที่ทางออกได้ } k_c = 0.5 \quad [14]$$

$$h_{1o} = (0.5) / [20.39^2 / (2 \times 9.81)]$$
$$= 10.59 \text{ m-air}$$

$$\text{รวมการสูญเสียที่ฮีตเตอร์} = 8.05 + 10.59$$
$$= 18.64 \text{ m-air}$$

### ออริฟิส 2 ตัว

จากการคำนวณในเบื้องต้นจะได้

$$h_1 = 2 \times 39.6$$
$$= 79.2 \text{ m-air}$$

### ข้อต่อ 90° 1 ตัว

$$L_c/D = 30 \quad [14]$$
$$h_1 = f(L_c/D)(V^2/2g)$$
$$= (0.0235)(30)[20.39^2 / (2 \times 9.81)]$$
$$= 14.94 \text{ m-air}$$

### ข้อต่อสามทาง 1 ตัว

$$L_c/D = 20 \quad [14]$$
$$h_1 = f(L_c/D)(V^2/2g)$$
$$= (0.0235)(20)[20.39^2 / (2 \times 9.81)]$$
$$= 9.96 \text{ m-air}$$

### ส่วนอบแห้ง

-ทางเข้าส่วนอบแห้ง ประกอบด้วยตะแกรง 2 ชั้น

ทำการคำนวณ  $\Delta P$  จากวิธีของ Kunii and Levenspiel [11] โดยใช้สมการ

$$V_{or} = c_d [2\Delta P / \rho_f]^{0.5} \quad (3.1)$$

ตะแกรงหยาบ ขนาด 3-mesh เส้นผ่าศูนย์กลางรู 6.68 mm และ 1 cm<sup>2</sup> มี 1.8 รู

$$\text{พื้นที่เปิดต่อรู} = (\pi/4)(0.668^2)$$
$$= 0.35 \text{ cm}^2$$

เนื่องจาก 1 cm<sup>2</sup> มี 1.8 รู

$$\text{ดังนั้นพื้นที่เปิดต่อ 1 cm}^2 = 1.8 \times 0.35$$
$$= 0.63 \text{ cm}^2$$

จะได้สัดส่วนพื้นที่ที่หน้าตัด = 0.63

$$= V_o/V_{or}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $V_o$  คือ ความเร็วอากาศก่อนผ่านตะแกรง, m/s

$V_{or}$  คือ ความเร็วอากาศหลังผ่านตะแกรง, m/s

$$\text{เลือกใช้ } V_o = 10 \text{ m/s}$$

$$V_{or} = 10/0.63$$

$$= 15.87$$

$$R_c = (0.91 \times 10 \times 0.07) / (2.24 \times 10^{-5})$$

$$= 28437.5$$

สำหรับค่า  $R_c > 3000$  จะได้  $c_d$  เท่ากับ 0.6 [14]

จากสมการ (3.1)

$$15.87 = 0.6[2\Delta P/0.91]^{0.5}$$

$$251.85 = 0.36[2\Delta P/0.91]$$

$$\Delta P = 318.319 \text{ Pa}$$

ตะแกรงละเอียด ขนาด 8-mesh เส้นผ่าศูนย์กลางรู 2.362 mm และ 1 cm<sup>2</sup> มี 9 รู

$$\text{พื้นที่เปิดต่อรู} = (\pi/4)(0.2362^2)$$

$$= 0.0438 \text{ cm}^2$$

เนื่องจาก 1 cm<sup>2</sup> มี 9 รู

$$\text{ดังนั้นพื้นที่เปิดต่อ 1 cm}^2 = 9 \times 0.0438$$

$$= 0.394 \text{ cm}^2$$

จะได้สัดส่วนพื้นที่หน้าตัด = 0.394

$$= V_o/V_{or}$$

$$\text{เลือกใช้ } V_o = 10 \text{ m/s}$$

$$V_{or} = 10/0.394$$

$$= 25.35 \text{ m/s}$$

$$R_c = (0.91 \times 10 \times 0.1) / (2.24 \times 10^{-5})$$

$$= 40625$$

สำหรับค่า  $R_c > 3000$  จะได้  $c_d$  เท่ากับ 0.6 [14]

จากสมการ (5.1)

$$25.35 = 0.6[2\Delta P/0.91]^{0.5}$$

$$642.62 = 0.36[2\Delta P/0.91]$$

$$\Delta P = 812.2 \text{ Pa}$$

รวมความสูญเสียที่ตะแกรงทั้งหมด

$$= 318.319 + 812.2$$

$$= 1130.519 \text{ Pa}$$

$$\text{จาก } P = \rho gh$$

$$h_1 = 1130.519 / (0.91 \times 9.81)$$

$$= 126.64 \text{ m-air}$$

- ทางออกส่วนอบแห้ง

$$\text{สัดส่วนพื้นที่หน้าตัด} = (0.07/0.1)^2$$

$$= 0.49$$

มุมรวมของทรงกรวย อยู่ในช่วง  $15 - 40^\circ$

$$\text{จะได้ } k = 0.05 \quad [14]$$

$$h_1 = k(V^2/2g)$$

$$= 0.05[20.39^2 / (2 \times 9.81)]$$

$$= 1.06 \text{ m-air}$$

การสูญเสียในส่วนอบแห้งทั้งหมด

$$= 126.64 + 1.06$$

$$= 127.7 \text{ m-air}$$

ดังนั้นการสูญเสียทั้งหมดในระบบนำอากาศเข้าอบแห้งมีค่า

$$= 15.86 + 18.64 + 79.2 + 14.94 + 9.96 + 127.7$$

$$= 266.3 \text{ m-air}$$

### 3.1.8 การคำนวณกำลังของมอเตอร์

จากการคำนวณการสูญเสียในระบบ พบว่าการสูญเสียในระบบนำอากาศเข้าใหม่มีค่ามากกว่าการสูญเสียในระบบเวียนอากาศกลับ จึงเลือกค่าการสูญเสียในระบบนำอากาศเข้าใหม่มาใช้คำนวณหากำลังของมอเตอร์ และใช้ Safety factor (S) เท่ากับ 1.5 [3]

การสูญเสียทั้งระบบ = การสูญเสียในส่วนที่ปล่อยอากาศออก + การสูญเสียที่ทางเข้าพัดลม + การสูญเสียที่ระบบนำอากาศเข้าอบแห้ง + การสูญเสียที่เบคของวัสดุ

จากการคำนวณในเบื้องต้นการสูญเสียที่เบคของเมล็ดพริกไทยเท่ากับ 466.97 Pa

$$h_1 = 466.97 / (0.91 \times 9.81)$$

$$\begin{aligned}h_i &= 52.3 \text{ m-air} \\ \text{การสูญเสียทั้งระบบ} &= 0.27 + 0.019 + 266.3 + 52.3 \\ &= 319.29 \text{ m-air} \\ \text{กำลังงานของลมที่ใช้ทางทฤษฎี} &= S_p \rho g h_i Q \\ &= 1.5 \times 0.91 \times 9.81 \times 319.29 \times 0.0785 \\ &= 335.62 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\text{ประสิทธิภาพของพัดลม} = 60\% \quad [15]$$

$$\text{ประสิทธิภาพของมอเตอร์} = 82\% \quad [15]$$

$$\begin{aligned}\text{กำลังงานที่ใช้จริง} &= 335.62 / (0.6 \times 0.82) \\ &= 682.15 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{มอเตอร์มีขนาด} &= 682.15 / 746.24 \\ &= 0.91 \text{ Hp}\end{aligned}$$

เลือกใช้มอเตอร์ที่มีขนาด 1 Hp

### 3.1.9 การหาขนาดของฮีตเตอร์

$$\text{กำหนด } c_{p,a} = 1.05 \text{ kJ/kg-K}$$

$$c_{p,w} = 1.88 \text{ kJ/kg-K}$$

$$\text{อุณหภูมิอากาศที่ออกจากฮีตเตอร์} = 110^\circ\text{C}$$

สถานะของอากาศแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 73%

$$\text{จะได้ } H_{a,n} = 0.02 \text{ kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$$

$$h_n = 81 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$$

$$v_n = 0.885 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{dry air}}$$

สมมุติ สถานะของอากาศเวียนกลับเป็น  $90^\circ\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 15%

$$\text{จะได้ } H_{a,R} = 0.073 \text{ kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$$

$$h_R = 288 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$$

$$v_R = 1.15 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{dry air}}$$

เนื่องจากต้องคิดเผื่อความสามารถในการทำงานของฮีตเตอร์ จึงทำการคำนวณที่ระดับอัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 80%

ดังนั้น อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (ชื้น) ที่นำเข้าไปใหม่

$$\frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (ชื้น) ที่นำเข้าไปใหม่}}{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (ชื้น) เวียนกลับ}} = (0.2)/(0.8)$$

และ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (แห้ง) ที่นำเข้าไปใหม่

$$\frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (แห้ง) ที่นำเข้าไปใหม่}}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (แห้ง) ที่นำเข้าไปใหม่}} = (0.2/0.8) \times (1.15/0.885)$$

$$= 0.32$$

$$= m_n / m_R$$

จากสมการ ( 2.13 ) แทนค่า  $( m_n / m_R ), H_{a,n}$  และ  $H_{a,R}$  จะได้

$$0.32 = ( H_{a,mix} - 0.073 ) / ( 0.02 - H_{a,mix} )$$

$$H_{a,mix} = 0.06 \text{ kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$$

จากสมการ ( 2.14 ) แทนค่า  $( m_n / m_R ), h_n$  และ  $h_R$  จะได้

$$0.32 = ( h_{mix} - 288 ) / ( 81 - h_{mix} )$$

$$h_{mix} = 237.82 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$$

นำค่าของ  $H_{a,mix}$  และ  $h_{mix}$  จากการคำนวณไปเปิดหาค่าอุณหภูมิจากไซโครเมตริกชาร์ตได้  $T_{mix} = 76^\circ\text{C}$

ความหนาแน่นอากาศที่  $76^\circ\text{C} = 0.94 \text{ kg/m}^3$

$$Q_h = \rho_a V_a A ( c_{p,a} + H_{a,mix} c_{p,w} ) ( T - T_{mix} )$$

$$= (0.94)(0.0785)[1.05 + (0.06 \times 1.88)][110 - 76]$$

$$= 2.91 \text{ kW}$$

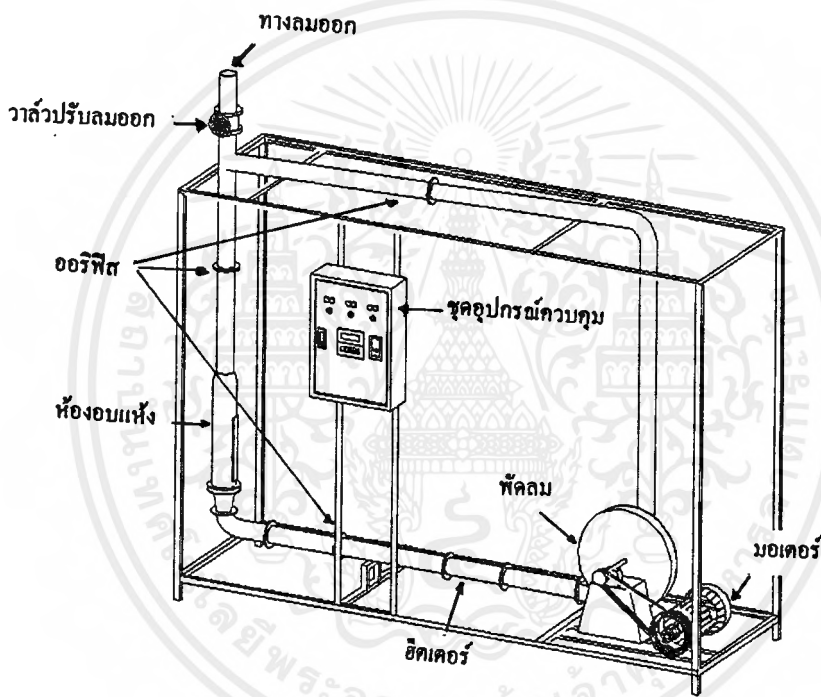
คิดเผื่ออัตราการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม 5% [4]

$$Q_{ac} = 2.91 \times 1.05$$

$$= 3 \text{ kW}$$

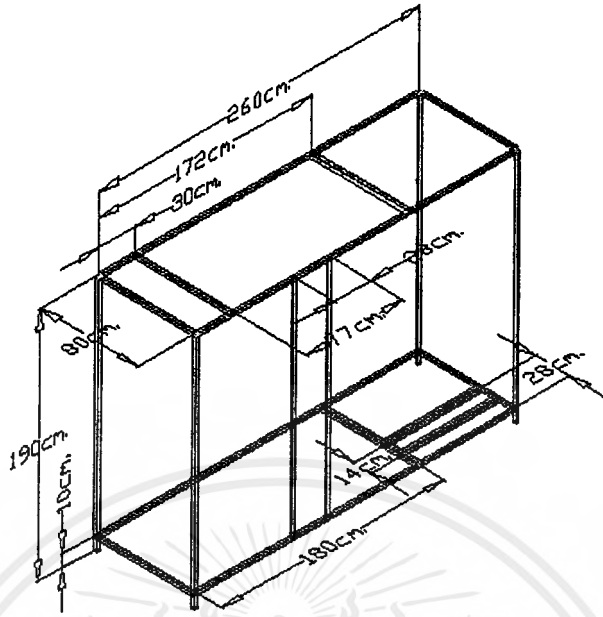
เลือกใช้ฮีตเตอร์ ขนาด 3 kW

### 3.2 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบ

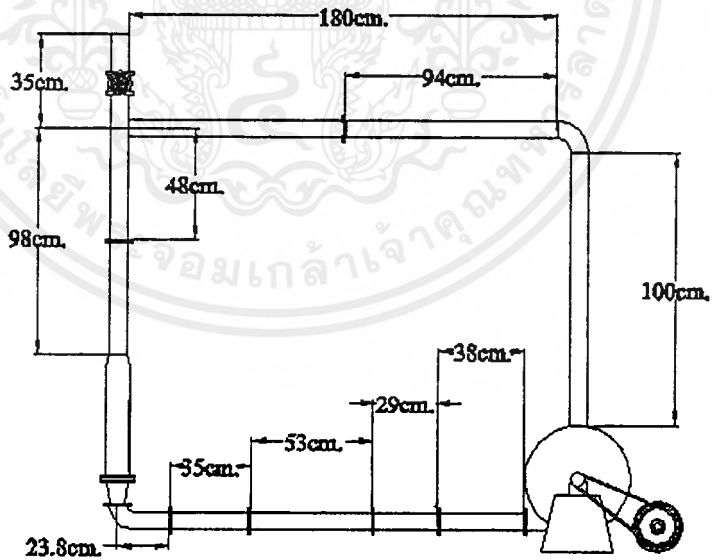


รูปที่ 3.2 ชุดทดลองโดยรวมที่ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

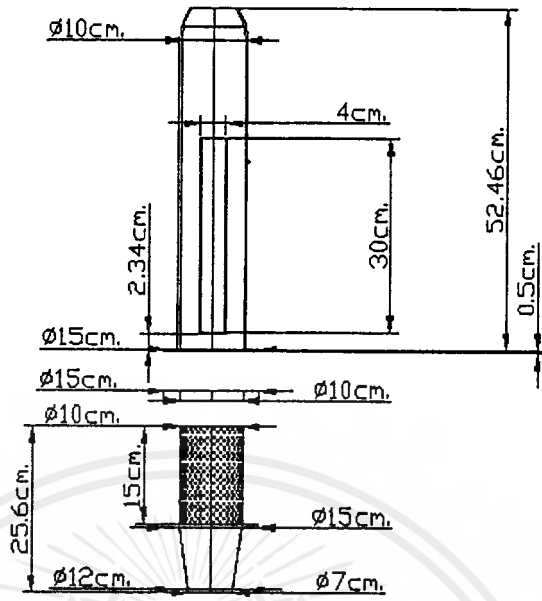


รูปที่ 3.3 โครงของชุดทดลองอบฟริกไทยขาว

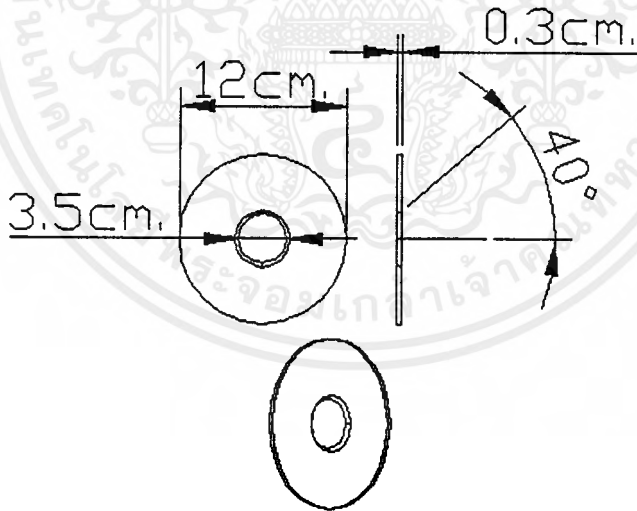


รูปที่ 3.4 ความยาวช่วงต่าง ๆ ของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 รายละเอียดของส่วนอบแห้ง



รูปที่ 3.6 รายละเอียดของออริฟิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์

การออกแบบระบบควบคุมจะพิจารณาจากข้อจำกัดการใช้งานของขดลวดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Heater) ที่ว่า ในขณะที่เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานจะต้องมีลมจากพัดลมเป่าอยู่เสมอเพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความร้อนสูงที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ และรูปของวงจรที่ทำการออกแบบดังต่อไปนี้

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุม

- Circuit Breaker

ขนาด 30 A สำหรับวงจรกำลังรวม

ขนาด 20 A สำหรับวงจรกำลังของเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า

- Magnetic Contactor

ขนาด 30 A สำหรับวงจรกำลังรวม

ขนาด 20 A สำหรับวงจรกำลังของเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า

- Temperature Switch

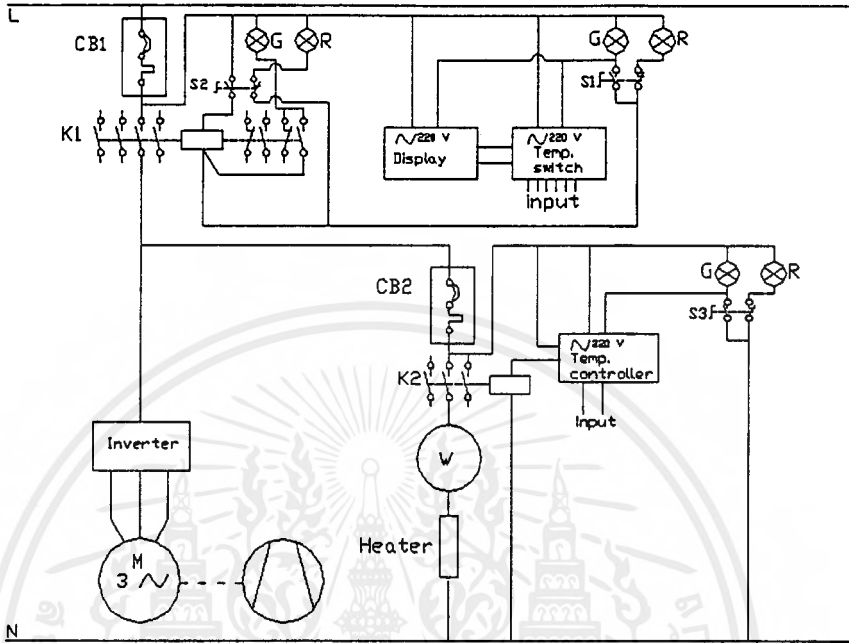
- Temperature Display

- Temperature Controller

- Watt-hour Meter

- Switch ควบคุมการเปิด-ปิดวงจร 3 ชุด

- Signal Lamp สำหรับแสดงสถานะเปิด-ปิด 3 ชุด



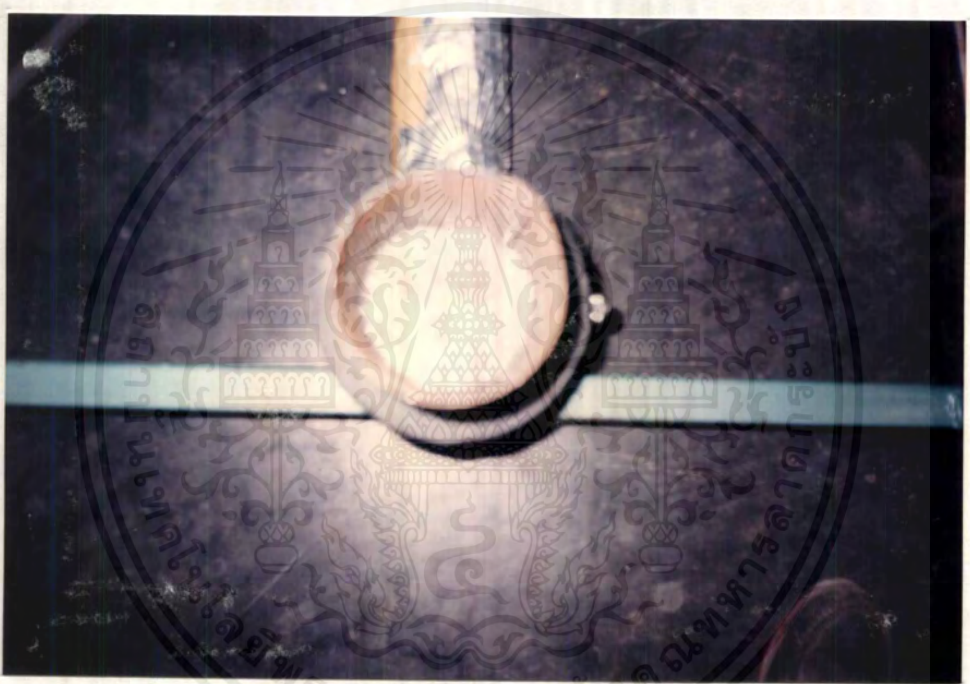
รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมการทำงานของชุดทดลอง

### 3.4 รูปแสดงอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.8 ส่วนโครงของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



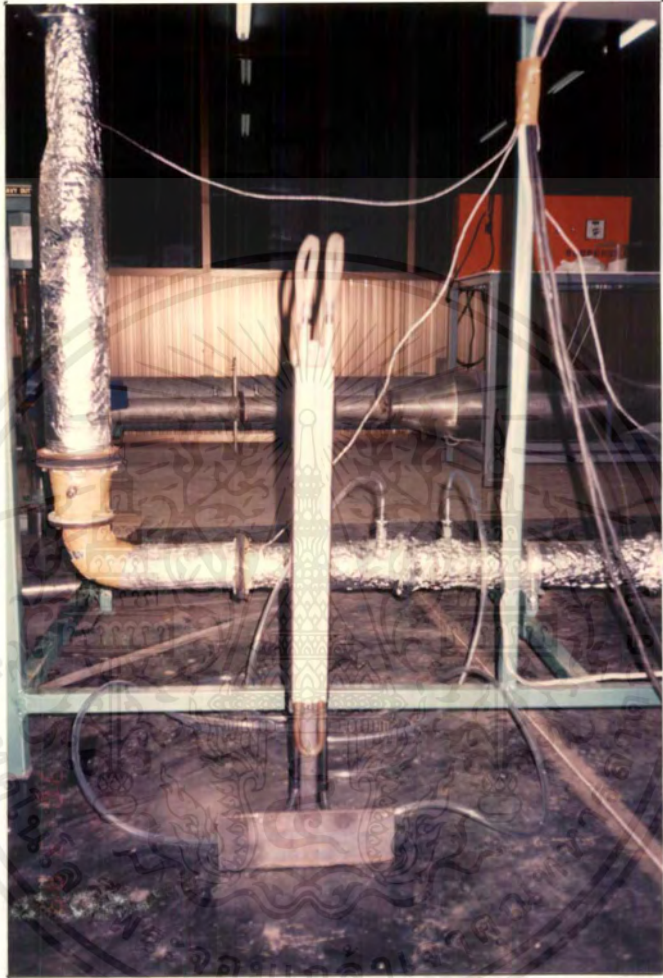
รูปที่ 3.9 ตะแกรงส่วนอบแห้ง (มุมมองจากด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



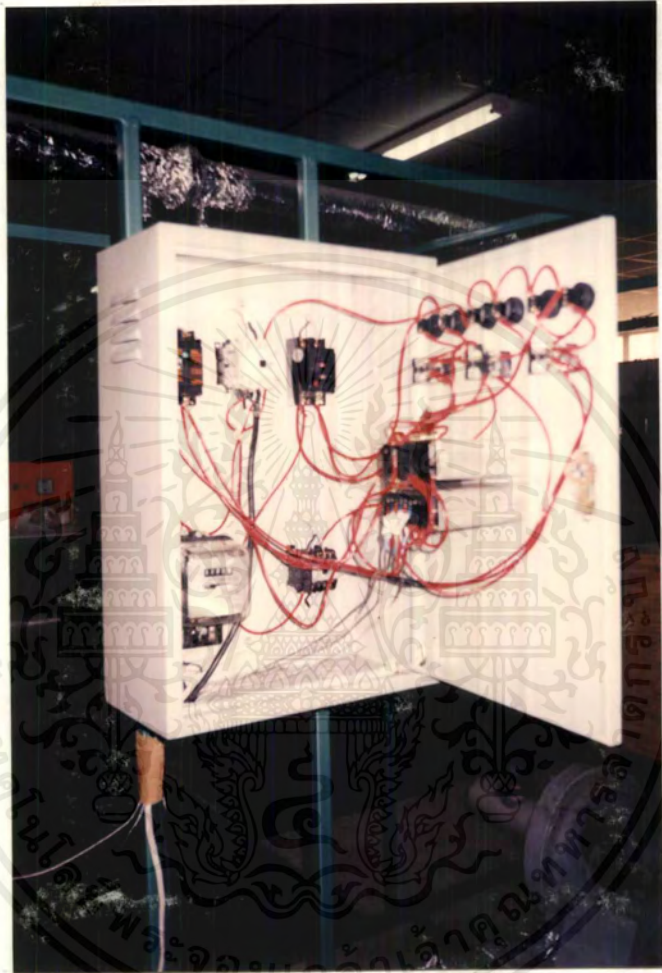
รูปที่ 3.10 ตะแกรงที่ฐานส่วนอบแห้ง(มุมมองด้านข้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



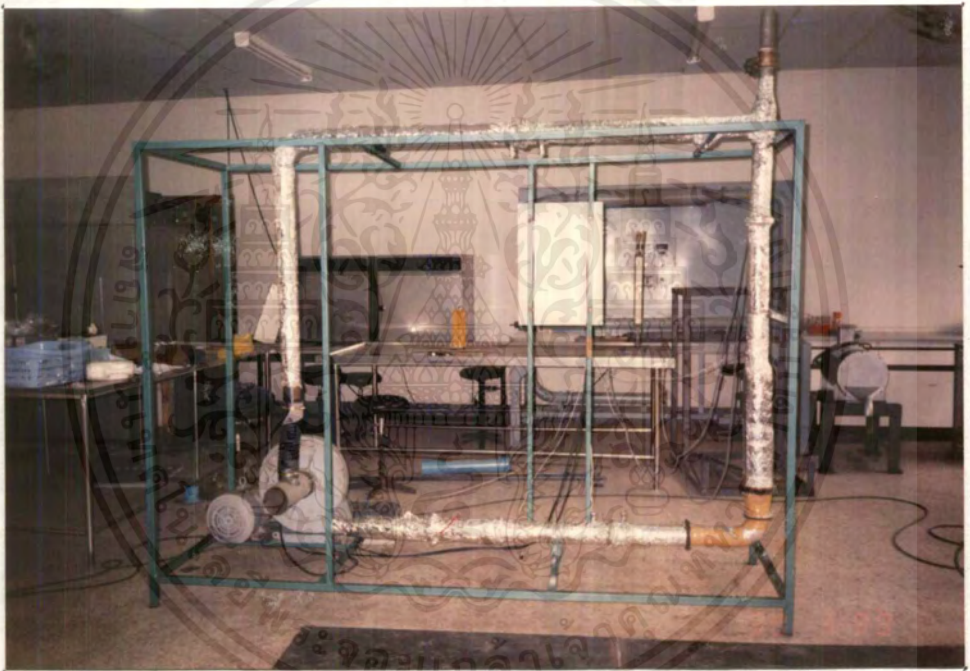
รูปที่ 3.11 มานอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



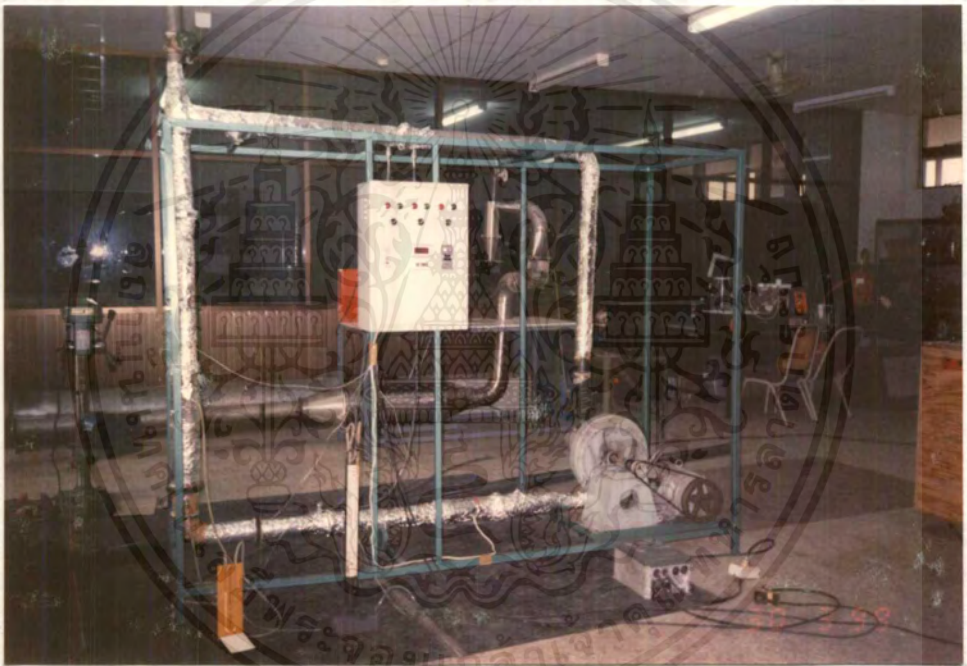
รูปที่ 3.12 ตู้ควบคุมการทำงานของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ชุดทดลองที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ (มุมมองด้านหลัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ชุดทดลองที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์ (มุมมองด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 แผนการทดลองทางสถิติ

ในการทดลองใช้ปริมาณลม 0.785 m<sup>3</sup>/s มีตัวแปรเป็นอุณหภูมิ เวลา และอัตราการเวียนกลับอากาศร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 3 ระดับคือ 80, 100 และ 110 °C เวลา 4 ระดับคือ 3, 4, 5 และ 6 นาที อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 2 ระดับคือ 80 และ 90% แผนการทดลองใช้วิธี CRD (Completely Randomized Design) 2×3×4 กรรมวิธี×3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิเคราะห์หว่าเรียนซ์ และเปรียบเทียบกรรมวิธีโดยวิธี DMRT (Duncan's New Multiple Range Test)

### 3.6 สมมติฐาน

สมมติฐานของการทดลองนี้คือ อุณหภูมิของอากาศร้อนในการอบแห้ง เวลาที่เมล็ดพริกไทยอยู่ในห้องอบแห้ง รวมทั้งอัตราการเวียนกลับอากาศร้อนมาใช้ใหม่ ที่ระดับต่าง ๆ กัน อาจจะมีผลต่อการลดความชื้นของเมล็ดพริกไทยขาวต่างกัน

### 3.7 วิธีการทดลอง

การทดลองเดินเครื่องอบแห้งพริกไทยขาวเบื้องต้น

1. เตรียมพริกไทยที่แช่น้ำและขัดเปลือกไว้แล้วประมาณ 0.5 kg
2. เริ่มเดินเครื่องพัดลมให้ทำงาน
3. ทำการปรับความเร็วลม โดยเลือกให้ห้องอบแห้งมีความเร็วลมเป็น 5 m/s ดังนั้นที่ช่องทางเข้าเครื่องอบแห้งซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าห้องอบแห้ง จะต้องให้มีความเร็วลมประมาณ 10 m/s สามารถวัดได้จากออร์ฟิสที่ติดตั้งอยู่ สำหรับการปรับความเร็วลมทำได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์
4. ปรับอัตราการเวียนกลับอากาศให้เป็น 80% โดยการหมุนปรับเกดวาล์วซึ่งติดตั้งไว้ที่ท่อปล่อยลมออก อัตราการเวียนกลับอากาศนั้นพิจารณาจากความเร็วลมที่ออกจากห้องอบแห้ง และท่อเวียนลมกลับก็เพียงพอแล้ว เพราะพื้นที่หน้าตัดทั้งสองจุดนั้นเท่ากัน
5. ใส่พริกไทยที่เตรียมในข้อ 1 ในห้องอบแห้ง แล้วพิจารณาการเกิดลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดว่าเหมาะสมหรือไม่ ถ้าไม่เหมาะสมก็ทำการปรับเปลี่ยน
6. ทดลองเปิดสวิทซ์ให้ฮีทเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ไม่ได้ใส่พริกไทยในห้องอบแห้ง)

7. ตรวจสอบการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิแล้วทำการตรวจสอบอุณหภูมิตามจุดที่กำหนดต่อไปนี้
  - ก่อนเข้าฮีตเตอร์
  - ก่อนเข้าห้องอบแห้ง
  - ออกจากห้องอบแห้ง
8. เริ่มทำการอบจริง แต่ใช้อุณหภูมิเพียง 50 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มไปจนถึง 110 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งพยายามหาข้อบกพร่อง

#### การทดลองอบแห้งพริกไทยขาว

##### -การเตรียมวัสดุ

พริกไทยที่ใช้ในการทดลองมีสองส่วนคือ พริกไทยดำที่ซื้อมาขัดเปลือกเอง และพริกไทยขาว โดยมีการเตรียมดังนี้

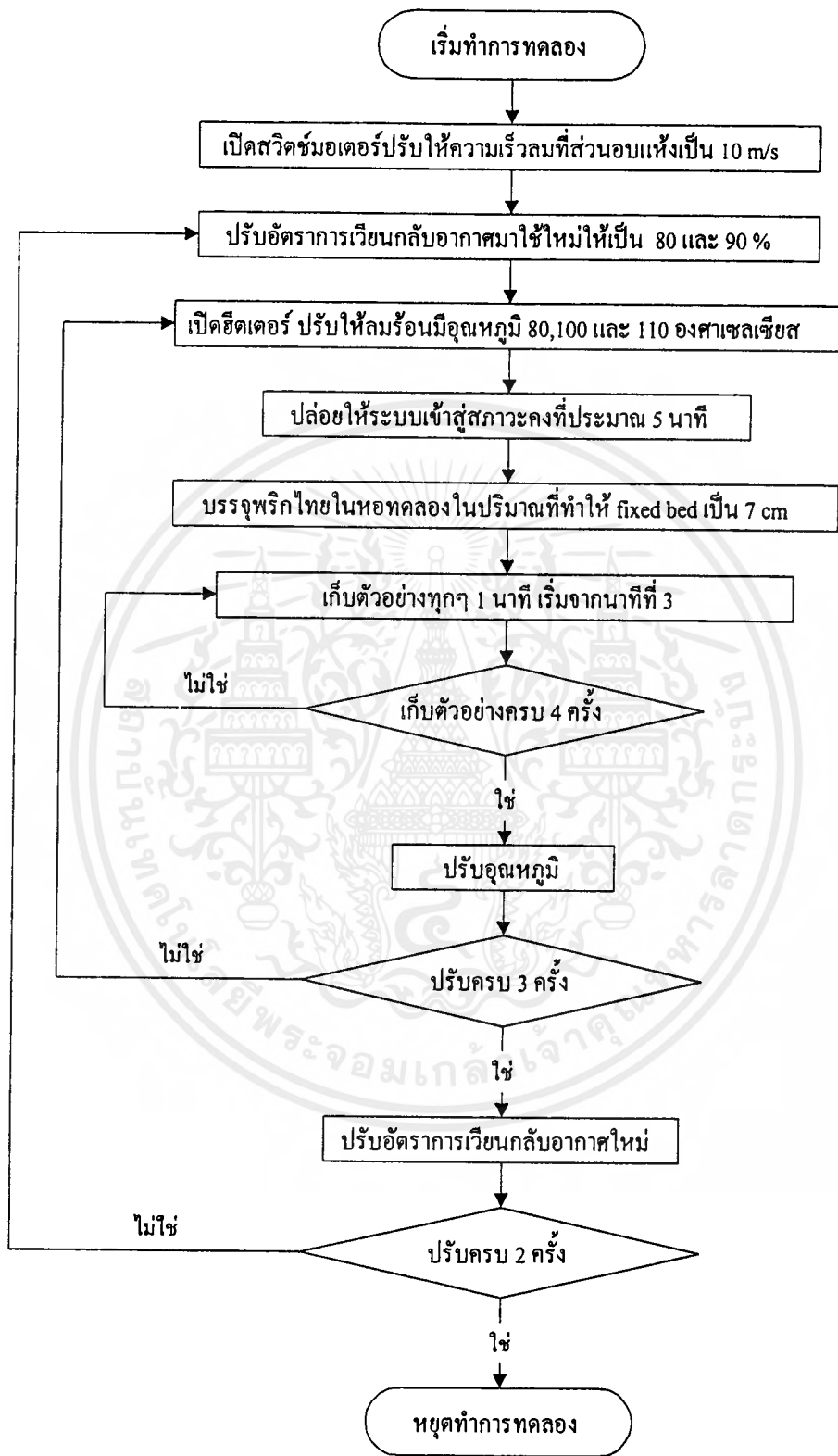
ใช้พริกไทยดำ 6 kg แช่น้ำนาน 8-10 วัน ให้เปลือกขุ่นแล้วขัดเปลือก กรองเอาเศษเปลือกและก้านพริกไทยออก จะได้พริกไทยอ่อนประมาณ 4 kg ในส่วนของพริกไทยขาว จะแช่น้ำนาน 2 คืนเพื่อให้มีความชื้นเท่า ๆ กับเมล็ดพริกไทยดำ แล้วผสมทั้งสองส่วนคลุกให้เข้ากันเพื่อให้ความชื้นเริ่มต้นของพริกไทยในการทดลองแต่ละครั้งมีค่าเท่า ๆ กัน โดยยังคงแช่ไว้ในน้ำก่อนนำไปทำการทดลอง

##### -การทดลอง

จากการคำนวณในตอนต้นนั้นพบว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันคือ 2 m/s และจากผลงานวิจัยของ Tumambing และ Driscoll [7] พบว่าความเร็วของลมในเบดไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ดังนั้นจึงใช้ความเร็วลมในการทดลองเพียงค่าเดียว โดยเลือกค่าที่ความเร็ว 10 m/s ความสูงของเบดหนึ่งเป็น 7 cm ตลอดการทดลอง

เดินเครื่องชุดทดลองอบแห้ง ทำการปรับตั้งค่าต่าง ๆ โดยเริ่มต้นที่ ก 80% และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้ระบบเข้าสู่สภาวะที่ตั้งค่าไว้ประมาณ 5 นาที แล้วจึงนำพริกไทยที่แช่น้ำไว้บรรจุลงในตะแกรงรองรับของส่วนอบแห้ง ทำการอบแล้วเก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกปิดผนึกด้วยการลนไฟทุก ๆ นาที เริ่มจากนาทิตี่ 3 จนถึงนาทิตี่ 6

เพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอ ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดจึงอยู่ในรูปของโฟลว์ชาร์ตดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะของการเกิดเบดของเมล็ดพริกไทย

เมื่อมีการผ่านลมร้อนไปยังส่วนอบแห้ง ในช่วงแรกนั้นเมล็ดพริกไทยยังคงมีความชื้นสูงการเกิดลักษณะของฟลูอิดไอเซชันยังไม่รุนแรง โดยเมล็ดพริกไทยจะค่อย ๆ ยกตัวทำให้เบดสูงขึ้นจากความสูง 7 cm เป็น 8.5 cm โดยประมาณ เมื่อเมล็ดพริกไทยมีความชื้นลดลงซึ่งสังเกตได้จากสีผิวของเมล็ดพริกไทยที่ซีดลง ลักษณะของฟลูอิดไอเซชันจะมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

#### 4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองได้แสดงในภาคผนวก ข. และ ผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก. พบว่า อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน, อุณหภูมิ และ เวลา มีผลต่อการลดความชื้นในการอบแห้งพริกไทยขาว โดยที่อัตราการเวียนกลับอากาศร้อนและอุณหภูมิจะมีผลกระทบร่วมต่อการลดความชื้น

##### 4.2.1 อัตราเวียนกลับอากาศร้อนและอุณหภูมิที่มีผลกระทบร่วมต่อการลดความชื้น

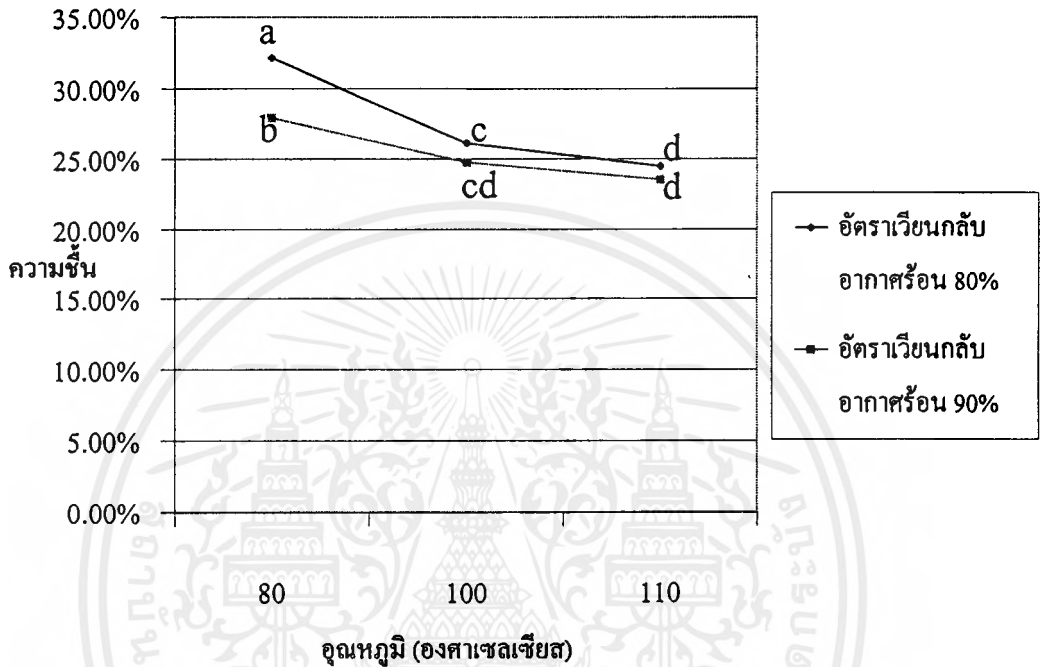
เนื่องจากอัตราเวียนกลับอากาศร้อนและอุณหภูมิมิมีผลกระทบร่วมต่อการลดความชื้นผลของการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยได้แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์ความชื้นในลักษณะตารางสองทาง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน		ความแตกต่าง ค่าเฉลี่ยอัตรา การเวียนกลับ อากาศร้อน
	80%	90%	
A*B			
80	32.13 a	27.92 b	4.31
100	26.13 c	24.75 cd	1.38
110	24.42 d	23.53 d	0.89

หมายเหตุ - A คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ B คือ อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน (เปอร์เซ็นต์)

- ตัวเลขในตารางที่ตามด้วยอักษรเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ



รูปที่ 4.1 ระดับความแตกต่างของความชื้นจากผลกระทบรวม A\*B

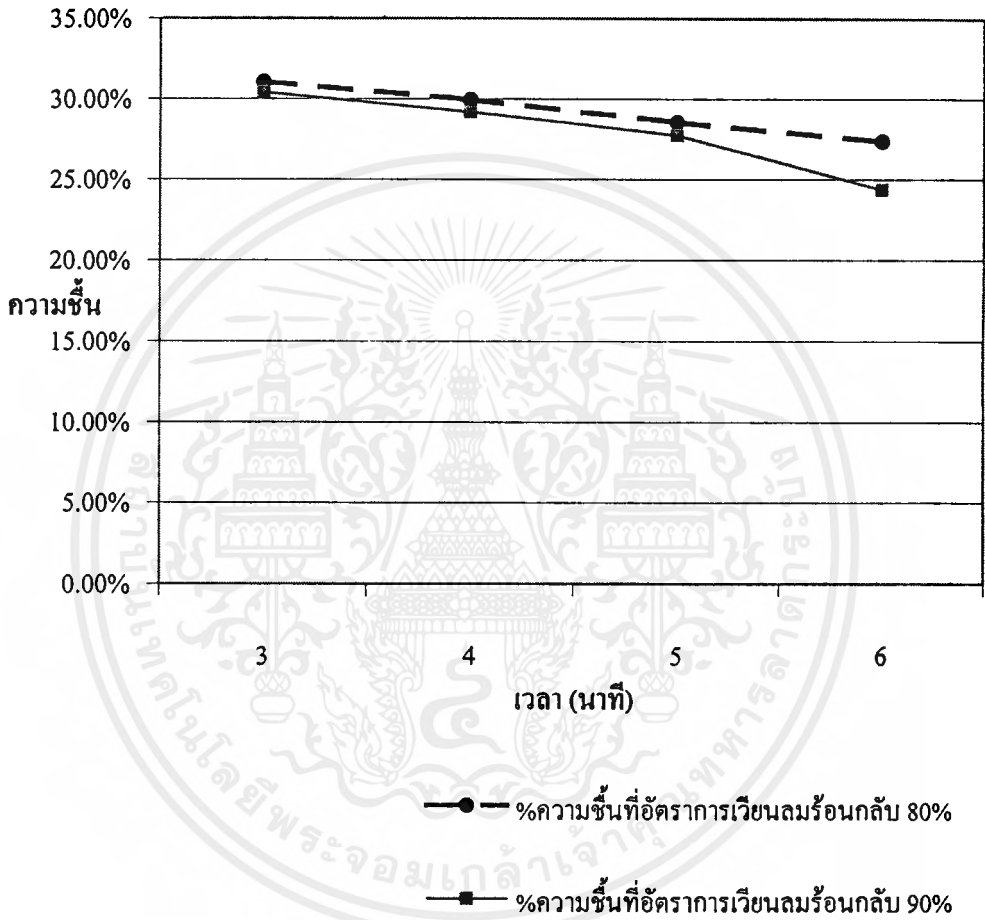
ในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสที่อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 90% และ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสที่อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 80% และอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสที่อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 90% อยู่ในระดับเดียวกัน หากต้องการลดความชื้นอยู่ในระดับนี้ควรเลือกที่ช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสที่อัตราการเวียนกลับอากาศร้อน 90% เมื่อคำนึงถึงความสิ้นเปลืองพลังงาน

ในส่วนของ การเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการเพิ่มเวลา หรือ การเพิ่มอัตราการเวียนกลับอากาศร้อนร่วมกับเวลา หรือ การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการเวียนกลับอากาศร้อนร่วมกับการเพิ่มเวลา สามารถลดความชื้นได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ การเพิ่มอัตราการเวียนกลับลมร้อน หรือ การเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการเพิ่มอัตราการเวียนกลับลมร้อน

#### 4.2.2 ผลของเวลาต่อการลดความชื้น

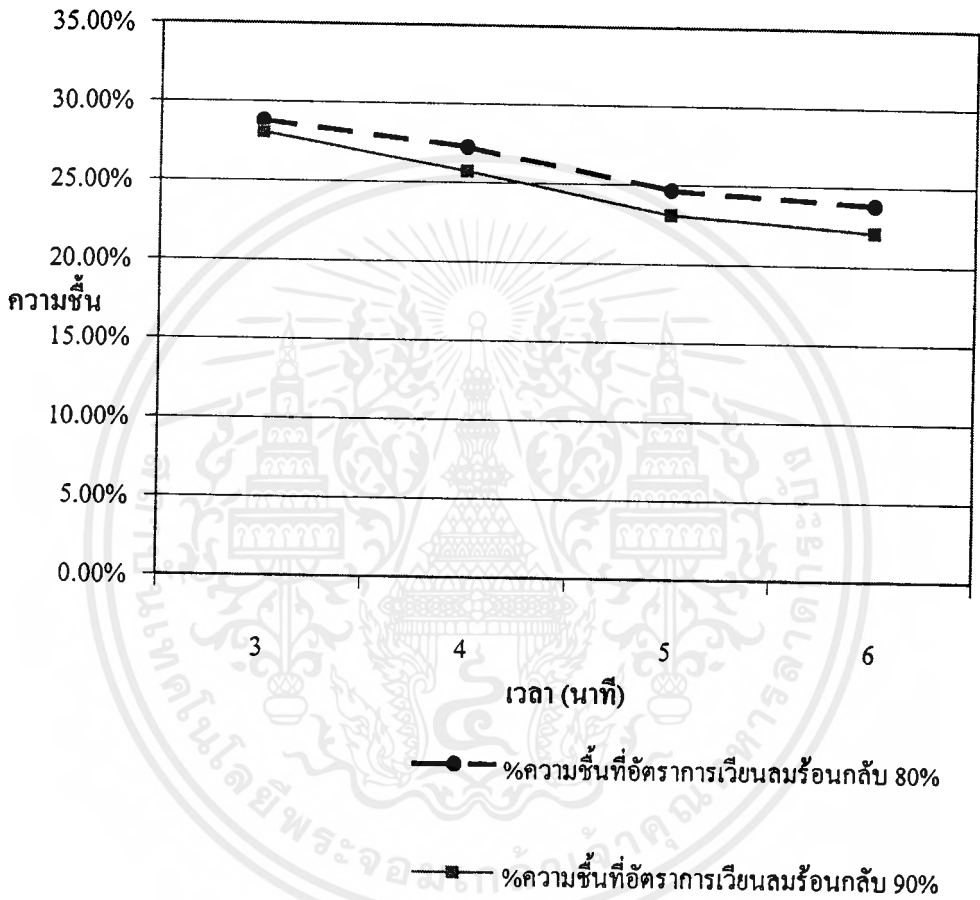
ผลของเวลาต่อการลดความชื้นได้แสดงในรูปที่ 4.2, รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



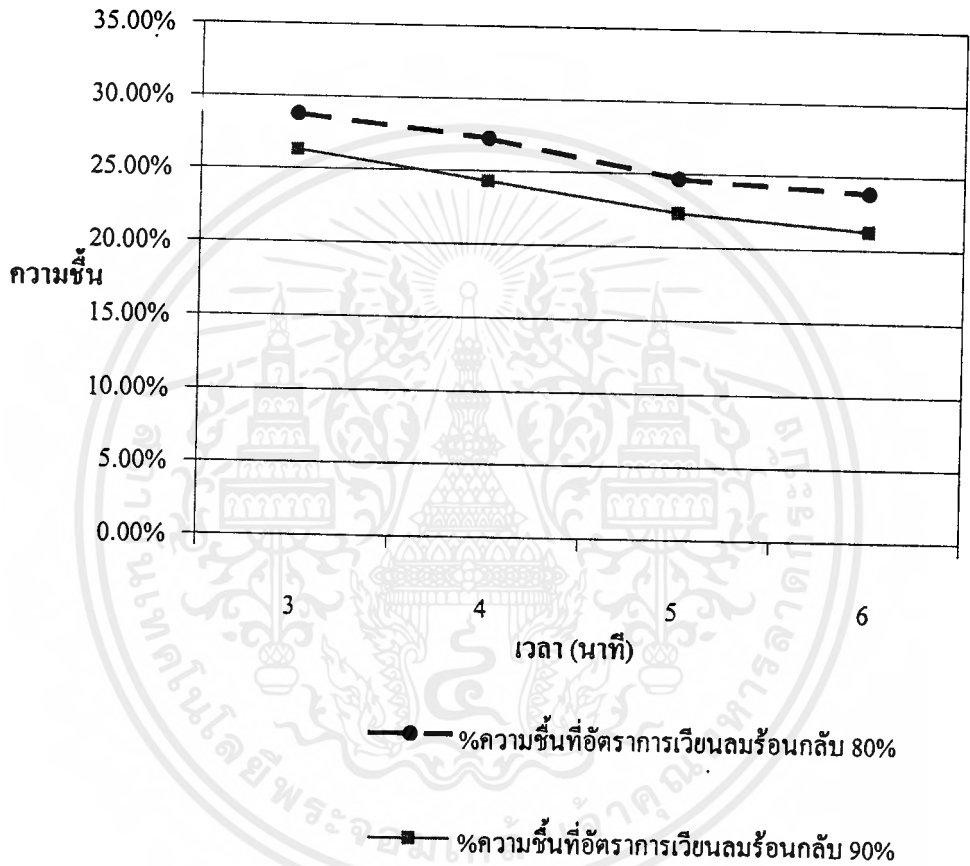
รูปที่ 4.2 ความชื้น ณ เวลาต่างๆที่อุณหภูมิการอบ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความชื้น ณ เวลาต่างๆที่อุณหภูมิการอบ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความชื้น ณ เวลาต่างๆที่อุณหภูมิการอบ 110 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยขาวที่อุณหภูมิอบแห้ง 80, 100 และ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 4, 5 และ 6 นาที โดยมีอัตราการเวียนลมร้อนกลับ 80% และ 90% พบว่า

1. การเพิ่มของอัตราการเวียนลมร้อนกลับ อุณหภูมิ และเวลา มีผลทำให้ความชื้นลดลง คือ ที่อัตราการเวียนลมร้อนกลับ 80% และ 90% พบว่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 27.56% และ 25.40% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 80, 100 และ 110 องศาเซลเซียส ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 30.02%, 25.44% และ 23.97% ตามลำดับ และที่เวลา 3, 4, และ 6 นาที ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 29.30%, 20.45%, 25.48% และ 23.76% ตามลำดับ
2. เกิดผลกระทบร่วมระหว่างอัตราเวียนลมร้อนกลับ(เปอร์เซ็นต์) และ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
3. อัตราเวียนลมร้อนกลับจะมีผลต่อการลดความชื้นน้อยลง เมื่อใช้อุณหภูมิสำหรับการอบแห้งสูงขึ้น
4. สภาพที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งพริกไทยขาวคือ ระดับอุณหภูมิ 100°C อัตราการเวียนลมกลับอากาศร้อน 90%
5. ในสภาวะที่ทำการทดลองยังไม่สามารถระบุจุดวิกฤตจากการลดความชื้นเมล็ดพริกไทยได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับผู้มีความสนใจที่จะทำการศึกษาคต่อไป ควรจะมีการวิเคราะห์ทางเคมี เพราะการใช้ความร้อนสูงอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่เมล็ดพริกไทย ทำให้คุณภาพไม่เป็นที่ยอมรับ และควรขยายช่วงอัตราเวียนลมกลับอากาศร้อนรวมถึงช่วงอุณหภูมิ เพื่อให้การทดลองครอบคลุมถึงจุดวิกฤตของการลดความชื้นเมล็ดพริกไทยขาว
2. ควรมีการขยายขนาด และสร้างเครื่องอบให้เป็นแบบต่อเนื่องเพื่อความเหมาะสมในการศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. นิรนาม, 2531, “พริกไทย,” สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, หน้า 2 , 25-27
2. นพรัตน์ ยศวัฒน และ อรรถสิทธิ์ ลีดำรงวัฒนากุล, 2529, “ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดเซชัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 54-59
3. มุस्ताฟา ชะภา, 2537, “ การออกแบบและทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่องขนาดต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรม,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 146 หน้า
4. อรอนงค์ ศรีพวาทกุล, 2536, “ การอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างต่อเนื่อง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 102 หน้า
5. Satayaprasert, C. and V. Vanishsriwatana, 1992, “Drying Corn in Fluidized Bed,” Thailand Enigneering Journal, Vol. 44, No. 12, pp. 76-79.
6. Sutherland, J.W. and T.F. Ghaly, 1990, “Rapid Fluid-Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics,” Presented 13<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Grain Postharvest Technology, Brunei, 14-15 November 1990 pp. 1-12.
7. Tumambing, J.A. and R.H. Driscoll, 1991, “ Modeling the Performance of a Continuous Fluidized Bed Dryer for Rapid Pre-Dryer of Paddy,” Proceeding of the 14<sup>th</sup> ASEAN Seminar on Grain Post-Harvest Technology, 6-8 November 1991, Philippines, pp. 1-16.
8. สมบัติ ขอทวีวัฒนา, 2529, “ กรรมวิธีการอบแห้ง,” \_\_\_\_\_, หน้า 21-29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, 2528, “ ฟลูอิดไดเซชัน,” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 3-84
10. McCabe, W. L., Smith, J. C.C. and P. Harriott , 1993, “ Unit Operation of Chemical Engineering,” 5<sup>th</sup> edition, McGraw Hill , pp. 143-176.
11. Kunii, D. and O. Levenspiel, 1991, “ Fluidization Engineering,” 2<sup>nd</sup> edition, Boston, Butterworth-Heinemann , pp. 2-94.
12. Holman, J.P., 1996, “ Experimental Method for Engineer,” McGraw Hill Inc.
13. Peleg, K., 1985, “ Produce Handling Packaging and Distribution,” pp. 146.
14. Fox, R.W. and A.T. McDonald , 1994, “ Introduction to Fluid Mechanics,” 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, pp.330-341.
15. พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และ มาบุญชี มาการิชวา, 2538, “ เทคนิคการซ่อมแซมเลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ,” บริษัท เอช.เอ็น กรุ๊ป จำกัด, หน้า 212-217 และหน้า 290
16. อำนาจ ทองผาสุข และ วิทยา ประสงค์พันธุ์, \_\_\_\_\_, “ การควบคุมมอเตอร์,” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
17. วิทยา บัวเจริญ, 2536, “ สถิติหลักการวางแผนทดลอง,” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
18. Gomez, K.A. and A.A. Gomez, 1983, “ Statistical Procedures for Agricultural Research,” 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons, pp.207-215.

19. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ และ จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์, 2540, “ บทปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของซีวีวีสดู,” วศ.สงล.147 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 62 และ 67





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

S.O.V	d.f	S.S.	M.S.	F-ratio
Block	2	1.11	0.56	0.61ns
Treatment	23	927.13		
A	1	83.72	83.72	92.03**
B	2	478.20	239.10	262.82**
C	3	314.31	104.77	115.16**
(A*B)	2	38.38	19.19	21.09**
(A*C)	3	0.32	0.11	0.12ns
(B*C)	6	7.01	1.17	1.28ns
(A*B*C)	6	5.19	0.86	0.95ns
Error	46	41.85	0.91	
Total	71	970.09	13.66	

S.O.V.	=	Source Of Variation	S.S.	=	Sum of Square
d.f.	=	degree of freedom	M.S.	=	Mean Square
F-ratio	=	สัดส่วนความผันแปรจากข้อมูล	F-table	=	สัดส่วนความผันแปรจากตาราง
ns	=	not significant	**	=	significant at 5%
A	=	อัตราการเวียนอากาศย้อนกลับ			
B	=	อุณหภูมิ			
C	=	เวลา			

ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดสอบ

A-B-C	เปอร์เซ็นต์ความซึ่				
	1	2	3	รวม	เฉลี่ย
80-80-3	34.22	35.32	33.57	103.11	34.37
80-80-4	32.00	34.07	32.90	98.97	32.99
80-80-5	31.03	31.97	31.23	94.23	31.41
80-80-6	29.35	29.35	30.50	89.20	29.73
80-100-3	28.13	28.92	29.31	86.36	28.79
80-100-4	27.16	27.74	26.84	81.74	27.25
80-100-5	24.33	24.53	25.10	73.96	24.65
80-100-6	23.70	24.21	23.55	71.46	23.82
80-110-3	29.94	27.31	26.49	83.74	27.91
80-110-4	25.69	24.26	25.76	75.71	25.24
80-110-5	23.37	23.63	22.66	69.66	23.22
80-110-6	22.32	20.29	21.32	63.93	21.31
90-80-3	30.79	30.26	30.15	91.20	30.40
90-80-4	28.92	28.95	29.68	87.55	29.18
90-80-5	26.67	28.92	27.66	83.25	27.75
90-80-6	26.37	21.04	25.67	73.08	24.36
90-100-3	28.90	27.54	27.76	84.20	28.07
90-100-4	25.43	25.51	26.23	77.17	25.72
90-100-5	22.64	23.01	23.63	69.28	23.09
90-100-6	22.48	21.69	22.17	66.34	22.11
90-110-3	27.15	26.08	25.66	78.89	26.30
90-110-4	23.87	24.43	24.58	72.88	24.29
90-110-5	22.45	21.65	22.78	66.88	22.29
90-110-6	22.13	21.06	20.52	63.71	21.24
รวม	639.04	631.74	635.72	1906.50	26.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น [19]

วัสดุอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างอาหารที่ต้องการหาความชื้น (พริกไทยบด)
- 2) ถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝา
- 3) ตู้อบไฟฟ้า
- 4) เครื่องชั่ง

วิธีการ

- 1) บดตัวอย่าง ถ้าตัวอย่างไม่สามารถบดได้ให้ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ
- 2) ชั่งตัวอย่าง 2 - 5 กรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียม จนได้น้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างที่ทดสอบ 4 ตำแหน่ง ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง
- 3) อบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) เอาตัวอย่างออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งมวลและบันทึกไว้ นำไปอบต่อ
- 5) นำตัวอย่างออกมาชั่งเหมือนข้อ 4 ทุก ๆ ชั่วโมง จนกระทั่งมวลคงที่

สามารถหาปริมาณความชื้น ได้ดังสมการดังนี้

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{(\text{มวลของตัวอย่างก่อนอบ} - \text{มวลของตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{มวลของตัวอย่างก่อนอบ}}$$