



การศึกษาและออกแบบระบบควบคุมความชื้นของลมร้อน
สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด



นางสาวกนกพร เพชรสันทัด
นายกฤษดา โชติวิริยะกุล
นายณัฐพล สมบัติพานิช

เลขเรียกหนังสือ... ๒พ ก ๒๔๓ ๒๕๔๓
เลขทะเบียน... ๐๔๓๕๑๕ ด.๒.๑ (สี ๒ เต็ม)
วัน เดือน ปี... ๖ ส.ค. ๒๕๔๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๔๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๐๔๓๕๑๕

THE HUMIDITY CONTROL SYSTEM OF HOT AIR IN FLUIDIZED DRYER
PROCESS



Miss Kanokporn Petsuntad

Mr. Kritsada Chotiwiriyakun

Mr. Nattapol Sombutpanich

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและออกแบบระบบควบคุมความชื้นของลมร้อนสำหรับ
เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด


โดย นางสาวกนกพร เพชรสันทัด
นายกฤษดา โชติวิริยะกุล
นายณัฐพล สมบัติพานิช

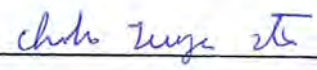
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลัก
สูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)


กรรมการ
(Dr. Choko Tereza Ito)


กรรมการ
(อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาและออกแบบระบบควบคุมความชื้นในลมร้อน

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

โดย นางสาวกนกพร เพชรสันทัด

นายกฤษฎดา โชติวิริยะกุล

นายณัฐพล สมบัติพานิช

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบ สร้าง และศึกษาระบบควบคุมความชื้นในลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ลมร้อนที่ออกจากฟลูอิดไดซ์คอลัมน์ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงควรหมุนเวียนกลับมาใช้ได้อีกเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน แต่ขณะเดียวกันลมร้อนที่ไหลผ่านฟลูอิดไดซ์คอลัมน์แต่ละครั้งจะรับความชื้นจากเมล็ดพืชและสะสมมากขึ้น จึงจำเป็นต้องปล่อยลมร้อนนี้ทิ้งไปบ้าง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดสภาวะความชื้นอิมิตัว ระบบควบคุมประกอบด้วยประตูลมทำหน้าที่ปล่อยทิ้งลมร้อนที่มีความชื้นเกินกำหนดเป็นระยะๆ ควบคุมด้วยระบบควบคุมซึ่งประกอบด้วย เซอร์โวมอเตอร์ เครื่องควบคุม และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น การทดสอบเครื่องควบคุมให้ผลการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วลม ความชื้น และอุณหภูมิของระบบได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในท่อเปล่า โดยให้มีการหมุนเวียนลมร้อนกลับหมดพบว่าความชื้นสัมพัทธ์จะแปรตามอุณหภูมิเป็นหลัก และจะแปรตามความเร็วลมเล็กน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับตัวแปรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบเป็นดังนี้ เมื่อพื้นที่ช่องเปิดประตูลมเพิ่มขึ้น ปริมาณลมร้อนที่นำกลับมาใช้ในระบบจะลดลง แวะขณะเดียวกัน อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title The humidity control system of hot air in fluidized dryer process

By Miss Kanokporn Petsuntad

Mr. Kritsada Chotiwiiriyakun

Mr. Nattapol Sombutpanich

Advisor Asst.Prof.Dr. Paisal Nakpipat

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

In this project, the design, construction and study of the humidity control system of the hot air in fluidized-bed dryer were performed. Generally, the temperature of the air leaving the fluidized-bed column remains high. In order to save the energy, some parts of this hot air should be recycled, but this operation will cause the accumulation of humidity in the system. So that, to prevent this increase in humidity, a part of the hot air must be purged from the system time to time. The humidity control system is consisted by a motorized shutter, process controller, and an humidity sensor. This control system will control the hot air speed, the humidity, and the temperature,

The experiments have done on the influence of the hot air speed. The humidity of the system without crop and with full recycle of the hot air, depends mainly on temperature and depends a little bit on the hot air speed. In relation to the aperture of shutter's opening and the variables of the system, when the heat radiation remained constant, the shutter's opening was increased, then the percentage of relative humidity was decreased, and the amount of recycled heat was also decreased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือในการค้นคว้าจน
ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ดังต่อไปนี้

ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

ผู้ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ ในการค้นคว้า การ
ทดลองตลอดจนการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

ผู้ให้ความสะดวกในส่วนของอุปกรณ์ในการทดลองและ
การเข้าใช้ห้องปฏิบัติการ

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์

ผู้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการจัดทำ รวมถึงการ
ประกอบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ฌ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป	ด
สัญลักษณ์	บ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การอบแห้ง	3
2.1 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช	3
2.2 ความชื้นในวัสดุ	4
2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็งและของไหล	5
2.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryer)	10
บทที่ 3 ฟลูอิดไดซ์ชันและฟลูอิดไดซ์เบด	12
3.1 ประเภทของฟลูอิดไดซ์ชัน	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของฟลูอิดไดซ์เบด	14
3.3 สถานะของฟลูอิดไดซ์เบด	16
3.4 สมบัติของอนุภาค	17
3.5 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด	18
3.6 ขอบเขตความเร็วของของไหล	21
3.7 ทฤษฎี 2 ภูมิภาคสำหรับฟลูอิดไดซ์เบด	22
3.8 การผสมในฟลูอิดไดซ์เบด	22
3.9 การเลือกความเร็วลม : การใส่ฟองอากาศ	24
3.10 การถ่ายเทความเร็วจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบด	25
3.11 พฤติกรรมการอบแห้งของอนุภาคที่ฟลูอิดไดซ์เบด	30
บทที่ 4 การควบคุมกระบวนการ	30
4.1 การควบคุมกระบวนการ	30
4.2 องค์ประกอบของการควบคุมกระบวนการ	30
4.3 ชนิดของการควบคุมอัตโนมัติ	33
4.4 การออกแบบระบบควบคุม	38
4.5 การควบคุมแบบป้อนกลับ	40
4.6 แผนภาพการควบคุมของกระบวนการ	42
4.7 เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ	43
บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมความชื้น	46
5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม	46
5.2 เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบของกระบวนการ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
5.3	เลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการ	48
5.4	กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม	51
5.5	กำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม	52
5.6	หลักการการทำงานของระบบควบคุมความชื้นของลมร้อนของ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการทำงานของเครื่องอบแห้ง.....	52
บทที่ 6	การทดลอง	55
6.1	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์.....	55
6.2	การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของลมร้อนที่ หมุนเวียนกลับมาใช้ในระบบ	56
6.3	การทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลู- อิดไดซ์เบด	56
บทที่ 7	ผลการทดลอง	58
7.1	การทดลองที่ 1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์.....	58
7.2	การทดลองที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ อินเวอร์เตอร์ (Hz) ของเครื่องเป่าลมร้อน ความเร็วลม (m/s) และอุณหภูมิ (°C)	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิด ประตูลมกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณลมร้อนที่ หมุนเวียนกลับมาใช้ในระบบ	70
7.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่อง อบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด	73
บทที่ 8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	86
8.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
8.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก ข้อมูลของผลการทดลอง	89
ภาคผนวก ข ตารางความชื้นสมมูลของเมล็ดพืช	105
ภาคผนวก ค รูป Control circuit diagram	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 7.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และ ความชื้นของชุดการทดลองที่ 1	58
ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และ ความชื้นของชุดการทดลองที่ 2	58
ตารางที่ 7.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และ ความชื้นของชุดการทดลองที่ 3	59
ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลม ของชุดการทดลองที่ 1	59
ตารางที่ 7.5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลม ของชุดการทดลองที่ 2	60
ตารางที่ 7.6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลม ของชุดการทดลองที่ 3	60
ตารางที่ 7.7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และ ความชื้นของชุดการทดลองทั้ง 3 เฉลี่ย	61
ตารางที่ 7.8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ความเร็วลม (m/s) และอุณหภูมิ ของชุดการทดลองทั้ง 3 เฉลี่ย	61
ตารางที่ 7.9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	70
ตารางที่ 7.10 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับอุณหภูมิของลมร้อน	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 7.11 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับปริมาณลมร้อนที่นำกลับมาใช้	72
ตารางที่ 7.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่พื้นที่ ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1	73
ตารางที่ 7.13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่พื้นที่ ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2	75
ตารางที่ 7.14 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กัน	77
ตารางที่ 7.15 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ของลมร้อนกับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดของประตูลมต่าง ๆ กันของ ชุดการทดลองที่ 1	79
ตารางที่ 7.16 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ของลมร้อนกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดของประตูลมต่าง ๆ กันของ ชุดการทดลองที่ 2	81
ตารางที่ 7.17 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยของลมร้อนกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กัน	83
ตารางที่ 7.18 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับ ปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้ง	85
ตาราง ก.1.1 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ก.1.2 ตารางค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เปรียบเทียบกับของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่าง ๆ กัน ของชุดการทดลองที่ 1	89
ตาราง ก.1.3 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1	90
ตาราง ก.1.4 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1	90
ตาราง ก.1.5 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองชุดการทดลองที่ 2	91
ตาราง ก.1.6 ตารางค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เปรียบเทียบกับของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่าง ๆ กัน ของชุดการทดลองที่ 2	91
ตาราง ก.1.7 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2	92
ตาราง ก.1.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2	92
ตาราง ก.1.9 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองชุดการทดลองที่ 3	93
ตาราง ก.1.10 ตารางค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เปรียบเทียบกับของเซนเซอร์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่าง ๆ กัน ของชุดการทดลองที่ 3	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

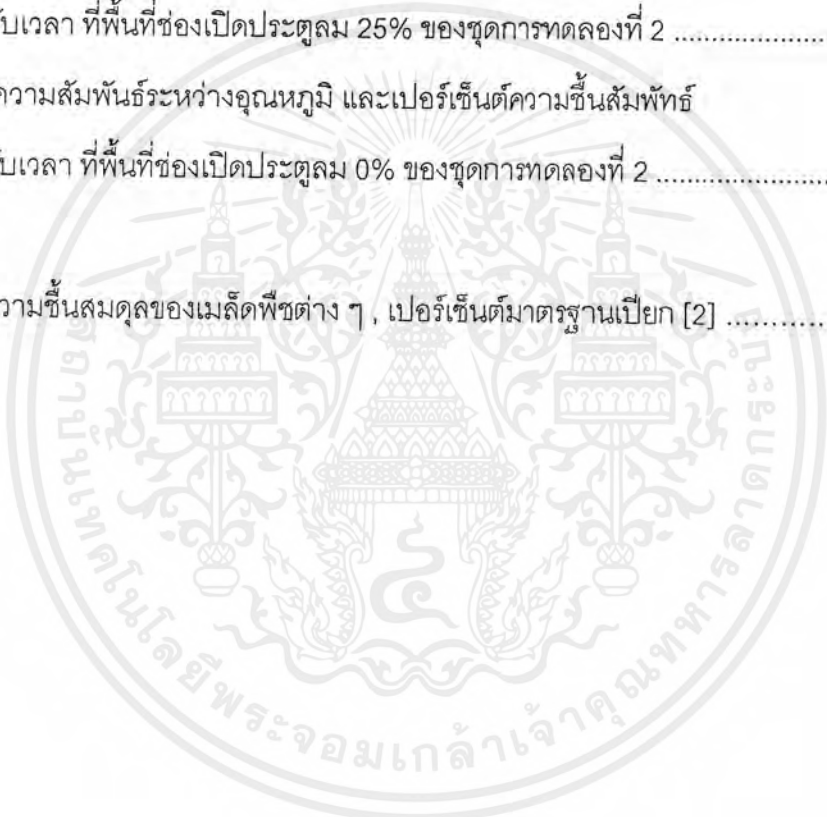
ตาราง ก.1.11 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่างๆ	
กั้นของชุดการทดลองที่ 3	94
ตาราง ก.1.12 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz)	
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กั้นของชุดการทดลองที่ 3	94
ตาราง ก.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 100% ของชุดการทดลองที่ 1	95
ตาราง ก.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 75% ของชุดการทดลองที่ 1	96
ตาราง ก.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 50% ของชุดการทดลองที่ 1	97
ตาราง ก.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 1	98
ตาราง ก.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 1	99
ตาราง ก.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 100% ของชุดการทดลองที่ 2	100
ตาราง ก.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 75% ของชุดการทดลองที่ 2	101
ตาราง ก.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 50% ของชุดการทดลองที่ 2	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ก.2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 2	103
ตาราง ก.2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	
กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 2	104
ตาราง ข.1 ความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชต่าง ๆ , เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก [2]	105



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การแพร่ของมวลระหว่างผิวของแข็งและของไหล	6
รูปที่ 2.2 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง	10
รูปที่ 3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของฟลูอิดไดซ์เบดที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของ ของไหลเพิ่มขึ้น	13
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของผลต่างของความดันกับความเร็วลมในเบด	15
รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแพร่ [7]	23
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากผนังสู่เบดกับความเร็วของของไหลที่ใช้ฟลูอิดไดซ์ [7]	25
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งของการอบแห้งและเส้นโค้งของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ [7]	27
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิใน การแลกเปลี่ยนความร้อน	31
รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมหลักการควบคุมแบบป้อนกลับ	34
รูปที่ 4.3 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)	35
รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า	36
รูปที่ 4.5 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อน ล่วงหน้า-ป้อนกลับ (Feedback-Feedforward)	37
รูปที่ 4.7 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	40
รูปที่ 4.8 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอย่างง่าย	42
รูปที่ 5.1 เครื่องวัดความชื้นพร้อมลักษณะการติดตั้ง	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมลักษณะการติดตั้งเครื่องวัดความชื้น	47
รูปที่ 5.3 แผ่นวงแหวนโลหะส่วนล่าง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)	49
รูปที่ 5.4 แผ่นวงแหวนโลหะส่วนบน (หน่วยเป็นเซนติเมตร)	50
รูปที่ 5.5 ใบเปิด-ปิด ทำจากแผ่นทองแดง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)	50
รูปที่ 5.6 รูปประตูลมที่ประกอบจริง	51
รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงของการควบคุม	51
รูปที่ 5.8 รูปเครื่องควบคุมโปรแกรมการทำงาน และลักษณะการติดตั้ง	52
รูปที่ 5.9 ภาพเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชันโดยติดตั้งระบบควบคุมความชื้น	54
รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ ความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 1	62
รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ ความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 2	63
รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ ความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 3	64
รูปที่ 7.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ ต่าง ๆ ของผลการทดลองชุดการทดลองที่ 1	65
รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ ต่าง ๆ ของผลการทดลองชุดการทดลองที่ 2	66
รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ ต่าง ๆ ของผลการทดลองชุดการทดลองที่ 3	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ ความเร็วลม ของผลการทดลองทั้ง 3 เฉลี่ย	68
รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ ต่าง ๆ ของผลการทดลองทั้ง 3 เฉลี่ย	69
รูปที่ 7.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับเปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ของชุดการทดลองทั้ง 3	70
รูปที่ 7.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับอุณหภูมิ ของลมร้อนของชุดการทดลองทั้ง 3	71
รูปที่ 7.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับปริมาณ ลมร้อนที่นำกลับมาใช้ของชุดการทดลองทั้ง 3	72
รูปที่ 7.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตู ลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1	74
รูปที่ 7.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตู ลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2	76
รูปที่ 7.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิด ประตูลมต่าง ๆ กัน	78
รูปที่ 7.15 กราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับ เวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1	80
รูปที่ 7.16 กราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับ เวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.17	กราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของ ลมร้อนกับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่าง ๆ กัน	81
รูปที่ 7.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับปริมาณน้ำ ที่ระเหยในการอบแห้งเฉลี่ย	85
รูปที่ ค.1	Control circuit diagram	112



สัญลักษณ์

- A พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร หรือ ตารางฟุต)
- C ค่าคงที่ของสมการ
- C_A ความเข้มข้นของมวลสาร A (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- C_{AS} ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- C_d สัมประสิทธิ์การเสียดทาน
- D_{AB} สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจาย (ตารางเมตร/ชั่วโมง)
- D_p ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง (เมตร)
- d มวลของวัสดุ (ไม่มีความชื้น) (กิโลกรัม)
- g อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที)² หรือ ฟุต/วินาที)²
- g_c ค่ามาตรฐานของความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก
- h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (กิโลจูล/ตารางเมตร ชั่วโมง องศาเซลเซียส)
- h_o สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร [กิโลกรัม/ชั่วโมง ตารางเมตร(กิโลกรัม/ลูกบาศก์-เมตร)]
- k สภาพการนำความร้อนของของไหล (กิโลจูล/เมตร ชั่วโมง องศาเซลเซียส)
- L_m ความสูงของเบดขณะเกิดฟลูอิดไดซ์เบดต่ำสุด (เมตร)
- M_d ความชื้นมาตรฐานแห้ง , อัตราส่วน
- M_w ความชื้นมาตรฐานเปียก , อัตราส่วน
- N_A ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
- Nu ตัวเลขนัสเซล
- Nu_o ค่าของตัวเลขนัสเซลที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

- ΔP ความแตกต่างของความดันในเบด (นิวตัน/ตารางเมตร หรือ ปอนด์/ตารางฟุต)
- q อัตราการถ่ายเทความร้อน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)
- Re ค่าของเรย์โนลด์
- Re_p ค่าของเรย์โนลด์ คัดจากขนาดของเม็ดของแข็ง
- Sh ตัวเลขเชอร์วูด
- Sh_0 ค่าของตัวเลขเชอร์วูดที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุลอย่าง
เดียว
- T อุณหภูมิของของไหล (องศาเซลเซียส)
- T_s อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดของแข็ง (องศาเซลเซียส)
- T_∞ อุณหภูมิของกระแสของไหล (องศาเซลเซียส)
- U_m ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์ (เมตร/วินาที หรือ ฟุต/วินาที)
- U_i ความเร็วในการตกอิสระ (เมตร/วินาที หรือ ฟุต/วินาที)
- W มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)
- X ระยะที่มวลสารเคลื่อนที่ไป (เมตร)

อักษรกรีก

- ε_m ค่าสัดส่วนช่องว่าง (void fraction) ในเบด ขณะเกิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วต่ำ
สุด
- ϕ_s แฟกเตอร์รูปร่าง
- μ ค่าความหนืดของของไหล (เซนติพอยต์ หรือ ปอนด์/ฟุต วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

อักษรกรีก (ต่อ)

- ρ ความหนาแน่น (ตัวห้อย s หมายถึงของแข็ง g หมายถึงของไหล) (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร หรือ ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในวงการอุตสาหกรรมหลายประเภท ข้อดีของการอบแห้งวิธีนี้มีมากมาย เช่น

- ความสามารถในการทำงานแบบต่อเนื่อง
- ความสามารถในการควบคุมการทำงานโดยอัตโนมัติ
- การป้องกันการจับตัวของผลิตภัณฑ์
- สามารถ แยกขนาดวัสดุได้พร้อม ๆ กับการอบแห้ง
- อัตราการอบแห้งสูง
- ขนาดเครื่องไม่ใหญ่นัก
- สามารถเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งให้สูงขึ้นได้มาก
- การดูแลรักษาทำได้ง่าย

ในการอบแห้งวิธีนี้ อากาศที่ผ่านกระบวนการจะยังมีความร้อนหลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หากผสมกับอากาศใหม่บางส่วนเพื่อควบคุมความชื้นในอากาศให้อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นโครงการนี้จึงทำการศึกษาการปรับกระบวนการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดให้มีการหมุนเวียนของอากาศกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

1.2.2 ศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบควบคุมความชื้นของอากาศร้อน ในการนำอากาศร้อนหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ เพื่อประหยัดพลังงาน

1.2.3 ศึกษา และพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบอัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ออกแบบ และสร้างระบบควบคุมความชื้นของอากาศร้อนเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

1.3.2 ทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการที่มีการหมุนเวียนอากาศกับกระบวนการที่ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้ง กระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด และกระบวนการควบคุม

1.4.2 ออกแบบระบบควบคุมความชื้นของอากาศที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

1.4.3 จัดหาอุปกรณ์สำหรับระบบควบคุม

1.4.4 ทำการสร้างระบบควบคุม ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมและระบบทั้งหมด

1.4.5 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับความรู้ ความเข้าใจในวิธีการอบแห้งโดยใช้หลักการฟลูอิดไดซ์เบด

1.5.2 ได้รับความรู้ ความเข้าใจพื้นฐานของระบบควบคุม สามารถออกแบบระบบควบคุม และสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนนี้คือความร้อนแฝงของการระเหย ผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยว ทำให้เก็บรักษาไม่ได้นาน การอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น มีราคาสูงขึ้น ผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญ ๆ และต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง เป็นต้น

เกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชขณะเมล็ดพืชยังมีความชื้นสูง เพื่อลดการสูญเสียของเมล็ดพืชอันเนื่องจากการร่วงหล่นก่อนการเก็บเกี่ยวและระหว่างการเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยวที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองได้ แต่เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวนั้นยังคงมีความชื้นสูงทำให้ขายไม่ได้ราคา และมีเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียสูง เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงขายได้ราคาดี และสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลาขายในขณะที่ยังมีผลผลิตมีราคาดี นอกจากนี้การอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถช่วยให้เปอร์เซ็นต์การออกของเมล็ดพันธุ์สูง ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้เมล็ดพืชที่มีความชื้นต่ำตามที่ต้องการ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดสุกไม่เหมาะที่จะใช้ทำเมล็ดพันธุ์ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และ เทคนิคที่ใช้ในการอบแห้งที่ทันสมัยโดยมากมักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งได้เร็ว และสามารถสร้างเครื่องอบแห้งให้มีขนาดเล็กลงทำให้ต้นทุนต่ำ ในขณะที่วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมมักใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้ง ขณะที่อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืช จะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลชื้นพร้อม ๆ กัน ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืช และทำให้น้ำที่บริเวณผิวเมล็ดระเหย และถ่ายเทเข้าไปอยู่ในอากาศ เป็นผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงขึ้น ส่วนเมล็ดพืชจะมีความชื้นลดต่ำลง และหากความชื้นลดลงจนถึงระดับหนึ่งแล้วอุณหภูมิของเมล็ดพืชก็จะเริ่มสูงขึ้นด้วย จนในที่สุดเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้ง หากว่าความชื้นลดลงจนถึงความชื้นสมดุล เมื่อเมล็ดพืชแห้งดีแล้ว เรามักจะผ่านอากาศแวดล้อมเข้าชั้นเมล็ดพืชเพื่อให้อุณหภูมิลดลง หากเก็บเมล็ดพืชทั้งที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่อาจเกิดปัญหาการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติ อันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งมีผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ทำให้เมล็ดพืชในบริเวณที่มีการควบแน่นมีความชื้นสูงขึ้น โดยมากมักจะเป็นที่ชั้นบน ๆ และจะเป็นจุดเริ่มต้นของการแพร่เชื้อราและแมลงต่อไป

2.2 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้น หรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ [2]

2.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = (w - d) / w \quad (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, อัตราส่วน

w คือ มวลของวัสดุ (ขึ้น), กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ มวลของวัสดุ (แห้ง) , กิโลกรัม

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในวงการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์

(100 M_w)

2.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

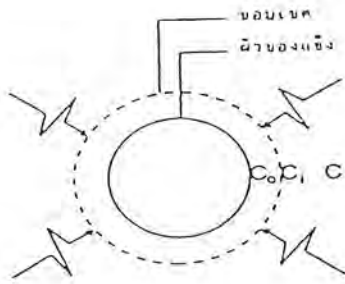
$$M_d = (w - d) / d \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง , อัตราส่วน

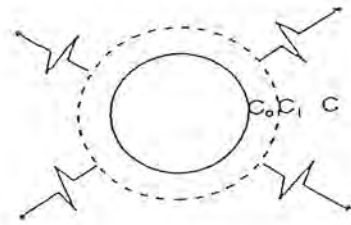
ความชื้นแบบนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยทำให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่ว่าเกือบคงที่นี้ เพราะผลผลิตทางการเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเพียงเล็กน้อย

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวของแข็งและของไหล [2]

ปริมาณการถ่ายเทมวลลย่อมขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของสาร ที่ได้มีมวลมากกว่าก็จะกระจายไป หรือเดินทางไปยังที่ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าดังรูปที่ 1 รูปที่ 1ก แสดงลักษณะของมวลของไหลไปเกาะติดอยู่บนผิวของเม็ดของแข็งขณะที่ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็ง



ก) จากของไหลไปยังผิวของแข็ง



ข) จากผิวของแข็งไปยังของไหล

รูปที่ 2.1 การแพร่ของมวลระหว่างผิวของแข็งและของไหล

ที่ความเร็วขนาดหนึ่ง ของไหลจะไหลอย่างมีระเบียบที่บริเวณใกล้เคียงกับเม็ดของแข็ง บริเวณนี้มีชั้นของขอบเขตหนาน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับขนาดความเร็วของไหล ที่ไหลผ่านเข้ามา ภายในอาณาบริเวณของเขตนี้ การถ่ายเทมวลสารเป็นไปอย่างช้า ๆ ซึ่งมีขนาดเท่ากับการฟุ้งกระจายของโมเลกุล นอกเหนือจากชั้นขอบเขตแล้ว การถ่ายเทมวลสารจะเป็นลักษณะการพา มวลด้วยกำลังบังคับ (forced convection mass transfer) ความเข้มข้นของสารในกระแสของ ไหล (C) ต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ขอบเขต (C₀) และความเข้มข้นที่ขอบเขตต้องสูงกว่าความเข้มข้นที่ผิวของเม็ดของแข็ง (C₁) ในทางตรงกันข้าม ถ้ามวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายใน กระแสของไหลดังแสดงในรูป 1ข ค่า C₀ ย่อมสูงกว่าค่า C₁ และค่า C₁ ย่อมสูงกว่าค่า C

การถ่ายเทของมวลสารที่ผิวของเม็ดของแข็งที่เป็นแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุล สามารถคำนวณได้จากสมการของ Fick คือ

$$N_A = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \quad (2.3)$$

เมื่อ N_A คือ ปริมาณของมวลสารที่เกิดจากการถ่ายเท

D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์ของการฟุ้งกระจาย

A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งและของไหล

C_A คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x คือ ระยะที่มวลสารเคลื่อนที่ไป

การถ่ายเทมวลสารที่เป็นแบบการถ่ายเทแบบกำลังบังคับระหว่างขอบเขตจำกัดกับกระแสของการไหล มักจะเขียนเป็นสมการทั่วไปของระบบที่มวลจากของแข็งละลายหรือแพร่กระจายไปในกระแสของไหลได้ว่า

$$N_A = h_D A (C_{AS} - C_A) \quad (2.4)$$

เมื่อ h_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

C_{AS} คือ ความเข้มข้นของมวลสาร A ที่อิ่มตัว

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล ปริมาณมวลสารในสมการ (2.3) เท่ากับปริมาณมวลสารในสมการ (2.4) จะได้

$$h_D A (C_{AS} - C_A) = -D_{AB} A dC_A / dx$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง D_p และจัดเทอมเสียใหม่ จะได้ว่า

$$h_D D_p / D_{AB} = -(dC_A / dx) / [(C_{AS} - C_A) / D_p] \quad (2.5)$$

เทอม $h_D D_p / D_{AB}$ นี้เรียกว่าตัวเลขเชอร์วูด (Sherwood number) สำหรับความเข้มข้นของสาร A ในกระแสของไหลนั้นย่อมขึ้นอยู่กับขนาดการไหลของของไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด ซึ่งเมื่อกระจายออกไปแล้วเราสามารถแสดงอยู่ในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และตัวเลขชมิต (Schmid number) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย มักได้รูปแบบความสัมพันธ์ของตัวเลขต่าง ๆ ดังนี้

$$Sh = Sh_0 + a Re^m Sc^n \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Sh_0 คือ ค่าของตัวเลขเซอรันด์ที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการฟุ้งกระจายของโมเลกุลอย่างเดียว

ในขณะที่มีการถ่ายเทมวลสาร การถ่ายเทความร้อนก็อาจเกิดขึ้นด้วยพร้อม ๆ กัน ซึ่งทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ พิจารณารูปที่ 1ก ถ้าของไหลที่บริเวณขอบเขตมีอุณหภูมิสูงกว่าที่บริเวณผิวของเม็ดยของแข็ง ความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณขอบเขตสู่บริเวณผิวของเม็ดยของแข็ง การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวของของแข็งเป็นแบบการนำความร้อน ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier คือ

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

- เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน
 k คือ สภาพการนำความร้อนของของไหล
 T คือ อุณหภูมิของของไหล

การถ่ายเทความร้อนที่เป็นแบบการถ่ายเทแบบบังคับระหว่างขอบเขตจำกัดกับกระแสของไหล มักเขียนเป็นสมการทั่วไปของระบบที่ความร้อนจากของแข็งถูกพาไปในกระแสของไหลได้ว่า

$$q = hA(T_\infty - T_s) \quad (2.8)$$

- เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของเม็ดยของแข็ง
 T_∞ คือ อุณหภูมิของกระแสของไหล

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล และสมมุติว่ามีการแผ่รังสีความร้อนน้อยมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนในสมการ (2.7) และ (2.8) จะเท่ากัน จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h A (T_{\infty} - T_s) = -k A dT / dx$$

เมื่อคูณด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง และจัดเทอมเสียใหม่ จะได้ว่า

$$h D_p / k = -(dT / dx) / [(T_{\infty} - T_s) / D_p] \quad (2.9)$$

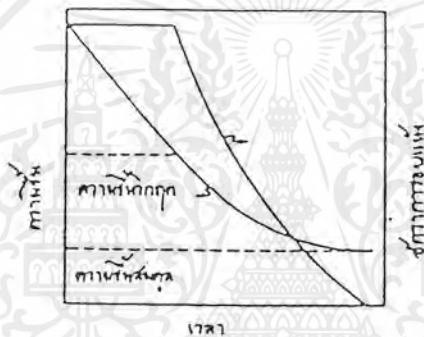
เทอม $h D_p / k$ นี้เรียกว่าตัวเลขนัสเซล (Nusselt number) สำหรับอนุภาคนิวตันในกระแสของไหลนั้นย่อมขึ้นอยู่กับขนาดการไหลของของไหล และคุณสมบัติทางกายภาพของระบบทั้งหมด ซึ่งเมื่อกระจายออกไปแล้ว สามารถแสดงอยู่ในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และตัวเลขพรานเทิล (Prandtl number) จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์เทอมไม่มีหน่วย จะได้ความสัมพันธ์ของตัวเลขต่าง ๆ ดังนี้

$$Nu = Nu_0 + a Re^m Pr^n \quad (2.10)$$

เมื่อ Nu_0 คือ ค่าของตัวเลขนัสเซลที่เกิดจากการถ่ายเทแบบการนำเพียงอย่างเดียว ในการอบแห้งวัสดุทั่ว ๆ ไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.8) ในขณะที่เดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสนอากาศดังสมการ (2.4) ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคนิวตันและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอนุภาคนิวตัน ความชื้น และความเร็วมวลของกระแสนอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้ว อนุภาคนิวตันและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อนุภาคนิวตันจะสูงขึ้น และความเข้มข้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา ภายใต้อนุภาคนิวตัน ความชื้น และความเร็วมวลของกระแสนอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งลดลงเรียกว่าความชื้นวิกฤต วัสดุการเกษตรส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถแบ่งการอบแห้งได้เป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกในขณะที่ยังมีความชื้นสูงอยู่ การอบแห้งมักเป็นแบบอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อวัสดุมีความชื้นลดต่ำลงจนถึงความชื้นวิกฤต น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือน้ำ แล้วจึงระเหย แล้วเคลื่อนที่ไปยังกระแสน้ำอากาศ เป็นที่เข้าใจว่า การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวจะเกิดขึ้นในระยะแรกขณะที่วัสดุยังมีความชื้นสูงพอประมาณ เมื่อผนังของช่องว่างอาจมีความหนาเพียงสองสามชั้นของโมเลกุล



รูปที่ 2.2 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง

2.4 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryer)

ในเครื่องอบแห้งแบบนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูง วัสดุอบแห้งอยู่ในลักษณะของแข็งเป็นชิ้นเล็ก ๆ ลมร้อนถูกเป่าด้วยความเร็วสูงพอที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของวัสดุ และทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศได้ ทำให้มีคุณลักษณะเหมือนของไหล ความเร็วลมที่นิยมใช้กันอยู่ในช่วง 100 – 200 เมตร/นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาด และรูปร่างของวัสดุ

การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิดไดซ์แบบกะ โดยพัฒนาสมการการอบแห้งของข้าวเปลือกในฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกในเบดเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนไหลเข้าเบด และอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลจำเพาะของอากาศ (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห่งต่อมวลแห้งของข้าวเปลือกใน
เบด) นอกจากนี้ยังพัฒนาระบบสมการเพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น
อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

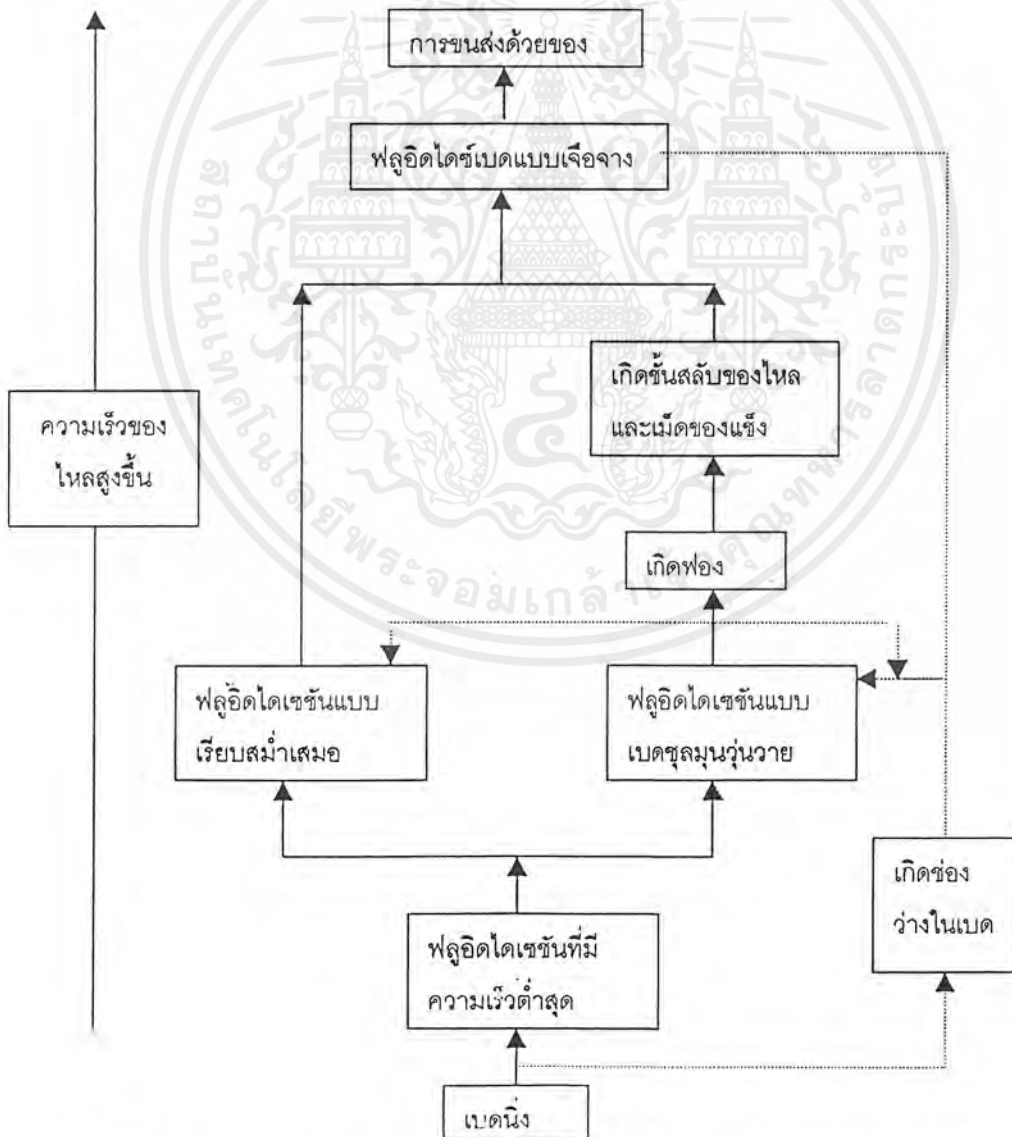
ฟลูอิดไดเซชันและฟลูอิดไดซ์เบด

เมื่อมีของไหล ไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็ง จะทำให้เกิดความดันลดขึ้นตามสมการของ Ergun เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้น ความดันลดที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มความเร็วจนถึงค่า ๆ หนึ่ง ความดันลดที่เกิดขึ้นจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ในขณะนั้นแรงที่เกิดจากความดันลดจะมีค่าเท่ากับแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักอนุภาคเอง เบดจะค่อย ๆ ขยับตัว และแขวนลอยอยู่ในของเหลวในที่สุด เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization) หรือ ฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed) ในสภาวะฟลูอิดไดเซชัน ของแข็งจะประพฤติตัวคล้ายของไหลซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมได้มากมาย

3.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน [1]

เมื่อป้อนของไหลที่ความเร็วต่ำ ๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (fixed bed) เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนห่างออกจากกัน เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดขยายตัว (expanded bed) เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันลดในพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ของเบด จะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างพื้นที่หน้าตัดนั้น ๆ เบดในสภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบด (incipiently fluidized bed) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด (minimum fluidization) เมื่อของไหลมีความเร็วมากขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ห่างจากกันมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามความเร็วของของไหล และเมื่อของไหลมีความเร็วมากขึ้น อนุภาคของแข็งจะเริ่มหมุนเวียนดี ขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดการผสมกันและการไหลเวียนของของแข็งรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะนี้เรียกว่า บับบลิ้งฟลูอิดไดซ์เบด (bubbling fluidized bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (emulsion phase) ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถบ่งบอกถึงระดับเบดได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) เมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหล สถานะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง (lean-phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยการไหล



รูปที่ 3.1 ลักษณะต่างๆของฟลูอิดไดซ์เบดที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์และประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของฟลูอิดไดซ์เบด [1]

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า ความเร็วของของไหลเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ในที่นี้จะขออธิบายถึงลักษณะของเบดที่พบเห็นบ่อย ๆ ในการทำงาน โดยจะเขียนแยกเป็นชนิด ๆ ไปแสดงดังรูปที่ 3.1

3.2.1 ฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วของไหลต่ำสุด

หมายถึงฟลูอิดไดเซชันในช่วงความเร็วของไหลแคบมาก ๆ คือ ช่วงความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบด ผิวน้ำของเบดราบเรียบไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของไหลหรือก๊าซ เม็ดของแข็งเริ่มลอยอยู่ในกระแสน้ำระหว่างเม็ดน้อยมาก การเคลื่อนไหวก็น้อยมากเพราะอยู่ในกระแสของไหลระยะห่างระหว่างเม็ดน้อยมาก เม็ดต่อเม็ดเกือบติดกัน การเคลื่อนไหวก็น้อยมากเพราะอยู่ในวงจำกัด ในทางปฏิบัติมักใช้ความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดอย่างน้อย 1.5 เท่า

3.2.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบและแบบซุลมุน

WILHELM และ KWAWK [1] ได้อธิบายไว้ว่า ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบมีลักษณะเม็ดของแข็งแยกจากกันโดยอิสระ ระยะห่างระหว่างเม็ดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ระยะห่างนี้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเร็วของของไหล เบดมีเนื้อสม่ำเสมอหรือกล่าวอีกประการหนึ่งคือมีความหนาแน่นของเม็ดของแข็งสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้มักเกิดขึ้นในฟลูอิดไดเซชันของเหลว ส่วนในก๊าซฟลูอิดไดซ์เบดเกิดขึ้นยาก นอกจากเบดที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วต่ำสุดเล็กน้อย

ส่วนเบดซุลมุน เม็ดของแข็งไม่ได้เคลื่อนที่อย่างอิสระ มันมีแนวโน้มที่จะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ๆ การเคลื่อนไหวของกลุ่มเป็นไปอย่างซุลมุน นอกจากนี้บางส่วนของของไหลก่อตัวเป็นฟองที่ส่วนล่างของเบด แล้วฟองนี้ก็จะชักนำให้เม็ดของแข็งลอยตามขึ้นไปจนถึงเบด ถ้าของไหลเป็นของเหลวการก่อตัวเป็นฟองมีส่วนคล้ายกับการเกิดฟองของก๊าซ เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้น เบดจึงมีลักษณะเหมือนกับของเหลวกำลังเดือด เบดจึงไม่สม่ำเสมอ ภายในเบดประกอบ

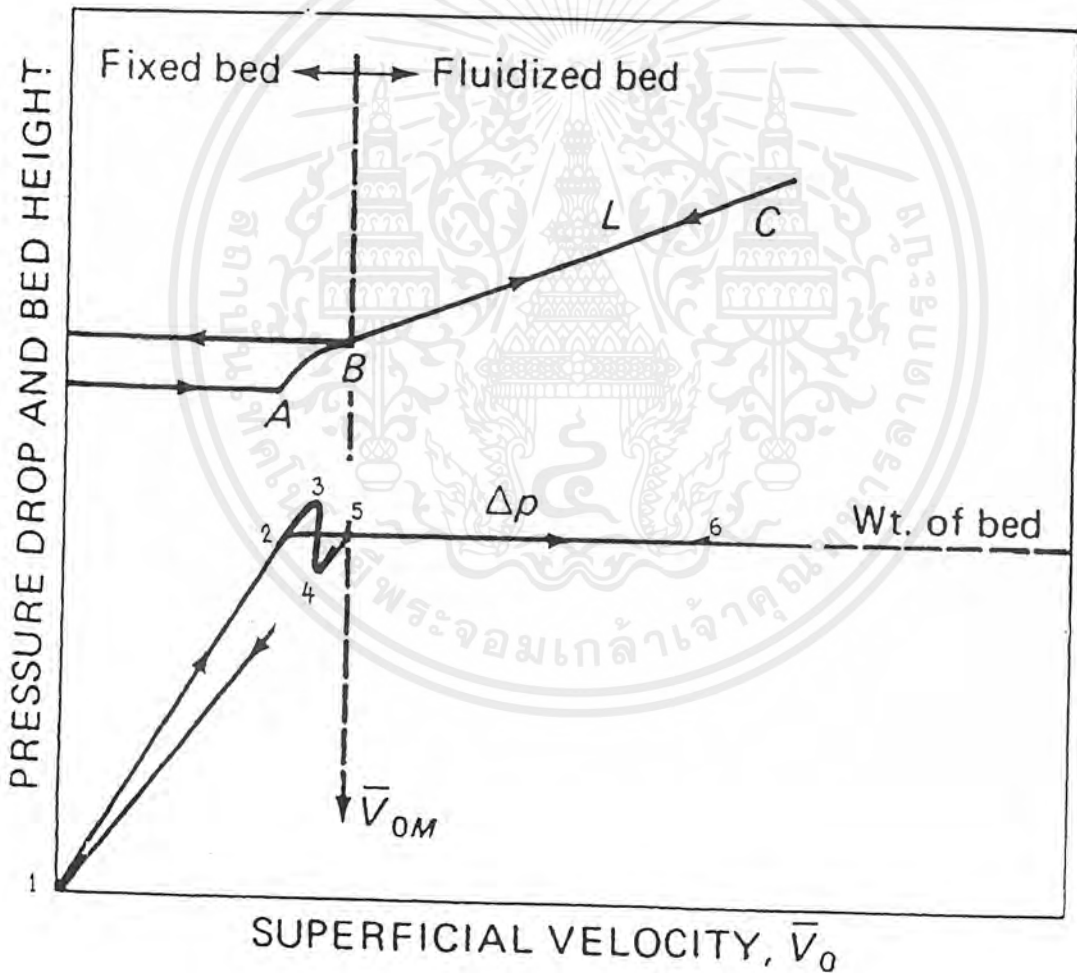
ไปด้วยสถานะ 2 สถานะ คือ เบดหนาแน่น และเบดเจือจางอยู่พร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาในการปฏิบัติ ฟลูอิดไดเซชันแบบซูลมุนจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องใช้เม็ดของแข็ง และของไหลที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันมาก ๆ ซึ่งได้แก่ ก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น

3.2.3 การเกิดฟองก๊าซและชั้นสลับของไหลกับเม็ดของแข็ง

ลักษณะของเบดทั้งสองเกิดขึ้นเฉพาะในเบดซูลมุนเท่านั้น ฟองที่เกิดขึ้นคล้ายกับเกิดตุ่งก๊าซ เริ่มแรกเกิดขึ้นที่ส่วนกลางเหนือแผ่นกระจาย หลังจากนั้นก็หลุดลอยผ่านชั้นเบดขึ้นไปจนถึงผิวหน้าของเบดแล้วก็แตกกระจายออก



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของผลต่างของความดันกับความเร็วลมในเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นสลับเกิดขึ้นได้เมื่อฟองก๊าซหลาย ๆ ฟอง มารวมกันแล้วเป็นฟองขนาดใหญ่จนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบด ฟองก๊าซก็แยกของแข็งออกเป็นชั้น ๆ ให้เห็นชัดเจน การเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งจะเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

เม็ดของแข็งเคลื่อนที่จนถึงความสูงระดับหนึ่ง ก็แยกออกตกกลับลงมาในเบดเหมือนฝนตก แล้วก่อตัวเป็นเบดซุลมุนใหม่ เบดชนิดนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกับเบดที่มีความสูงมาก และเบดที่มีความเร็วของก๊าซมาด้วย

3.3 สถานะของฟลูอิดไดเซชัน [5]

เม็ดของแข็งที่บรรจุลงไปนั้น จะเป็นแบบไม่เป็นระเบียบ (แบบสุ่ม) เม็ดของแข็งจะก่อกันอยู่ทำให้เกิดช่องว่างมากกว่าช่องว่างต่ำสุดที่เป็นเบดนิ่ง เมื่อผ่านของไหลเข้าไปในเบด สถานะของเบดจะเปลี่ยนตามความเร็วของของไหล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปความดันลดกับความเร็ว ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

เมื่อผ่านของไหลเข้าไปในเบดขณะที่ยังเป็นเบดนิ่ง ความดันลดของเบดที่วัดได้จะเคลื่อนที่ตามเส้น 1-2 ที่จุด 2 นั้น ความเร็วของไหลใกล้กับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน จากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนถึงจุด 5 แล้วจะคงที่ไปจนถึงจุด 6

เมื่อลดความเร็วของไหลจนถึงจุด 5 ความดันจะคงที่ แต่จากจุด 5 ความดันลดของเบดจะลดลงตามเส้น 5-1 ถ้าเราทำการทดลองใหม่จากเบดเดิมนั้น ความดันลดจะเป็นไปตามเส้น 1-5 เพราะเบดขณะที่เปลี่ยนจากฟลูอิดไดเซชันเบดเข้าสู่เบดนิ่ง เม็ดของแข็งเริ่มจัดระเบียบตัวเองแล้ว เมื่อทำการทดลองใหม่จึงไม่ต้องเสียพลังงานในการจัดระเบียบอีก (ตามเส้น 1-2) ที่จุด 5 นี้ เรียกว่า จุดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

การที่ความดันลดของเบดเริ่มแรกสูงกว่าความดันลดในขณะที่เป็นระเบียบ เพราะช่องว่างภายในเบดจัดไม่เป็นระเบียบ การไหลจึงสูญเสียพลังงานมากกว่าปกติ จากการทดลองพบว่าความดันลดในครั้งแรกมากกว่าความดันลดในเบดที่เป็นระเบียบประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์

3.4 สมบัติของอนุภาค [7]

ความสามารถในการลอยตัวของเม็ดวัสดุ เป็นปัจจัยการตัดสินใจในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันของเม็ดวัสดุบางชนิดจะลดความเค้นเฉือนวิกฤติ (critical shear stress) ให้เข้าใกล้ศูนย์ (ความเค้นเฉือนวิกฤติ คือ ปริมาณความเค้นเฉือนที่จะต้องใช้ในการทำให้วัสดุลอย) แต่ทว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ด (cohesive) จะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิว ซึ่งจะทำการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้ยากหรือทำไม่ได้เลย วิธีการบางอย่างสามารถบอกถึงความสามารถในการลอยตัวของวัสดุ แต่จะไม่ได้รับความเชื่อถือเมื่อใช้วัสดุที่มีความเหนียว

วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมักมีลักษณะดังนี้

- 1) ขนาดของอนุภาคมักอยู่ในช่วง 20 ไมโครเมตร ถึง 10 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการเกิดช่อง (channeling) และการเกิดการกระแทบอย่างแรง (slugging) เม็ดอนุภาคที่เล็กมากจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกาะติดเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (แปรผันตามขนาดพื้นที่ผิว) มีค่ามาก ทำให้การเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันทำได้ยาก
- 2) ขนาดของอนุภาคจะต้องสม่ำเสมอ หรือใกล้เคียงกัน เพื่อให้สามารถเลือกอัตราการไหลของการทำงานมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด
- 3) อนุภาคจะต้องมีรูปร่างเหมาะสม
- 4) ทำลายการรวมกลุ่มกันของสารป้อนที่เปียก เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้
- 5) อนุภาคจะต้องแข็งแรงพอ ที่จะทนทานต่อการขัดสี ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่เกิดฟลูอิดไดเซชันเมื่อเกิดการผสมกันอย่างรุนแรงเนื่องจากการลอยตัวขึ้นของฟองอากาศ
- 6) ผลึกภัณฑ์ที่ได้จะต้องไม่เหนียว ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง หรือความชื้นที่ต้องการ เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาค

3.5 ความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน [1]

ในการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วต่ำสุดจะมีแรง 2 แรง ที่กระทำต่ออนุภาคของแข็ง คือ แรงที่เกิดจากการไหลของของไหลจะอยู่ในรูปความดันลด (ΔP) และแรงจากน้ำหนักของอนุภาคเองอยู่ในสมดุลกันเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta P = AL_m(1 - \varepsilon_m)(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (3.1)$$

- เมื่อ ΔP คือ ความดันลด (เมตร หรือ ฟุต)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดคอลัมน์ (ตารางเมตร หรือ ตารางฟุต)
 L_m คือ ความสูงของเบดในขณะที่เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วต่ำสุด (เมตร หรือ ฟุต)
 ε_m คือ ค่าสัดส่วนช่องว่าง (void fraction) ในเบดในขณะที่เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วต่ำสุด
 ρ คือ ความหนาแน่น (ตัวห้อย s แสดงถึงของแข็ง g แสดงถึงของไหล) (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร หรือ ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต)
 g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที)² หรือ ฟุต/วินาที)²
 g_c คือ ค่ามาตรฐานของความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก

เมื่อนำสมการนี้ไปแทนลงในเทอมความดันลดในสมการของ Ergun จะได้ว่า

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_m^3} \frac{(D_p U_m \rho_g)^2}{\mu} + \frac{150(1 - \varepsilon_m)}{\phi_s^2 \varepsilon_m^3} \frac{(D_p U_m \rho)}{\mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร หรือ ฟุต)

U_m คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (เมตร/วินาที หรือ ฟุต/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ϕ_s คือ Shape factor

μ คือ ค่าความหนืดของของไหล (เซนติพอยต์ หรือ ปอนด์/ฟุต-วินาที)

จากสมการที่ได้ด้านซ้ายมือแบ่งออกเป็น 2 เทอม โดยเทอมแรกจะมีความสำคัญมากกว่า เทอม 2 เมื่อ $Re < 1000$ จะได้สมการ

$$U_m^2 = \frac{\phi_s D_p (\rho_s - \rho_g)}{1.75 \rho_g} * g \varepsilon_m^3 \quad (3.3)$$

และเทอมที่ 2 ของพจน์ผลบวกจะมีความสำคัญมากกว่าเทอมแรก เมื่อ $Re < 20$ จะได้สมการ

$$U_m = \frac{(\phi_s D_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g}{150 \mu} \frac{\varepsilon_m^3}{1 - \varepsilon_m} \quad (3.4)$$

แต่เนื่องจากว่าการหาเทอม ϕ_s และ ε_m ทำได้ยาก จึงมีผู้ทำการทดลองโดยเปลี่ยนเทอมที่มีตัวแปรทั้ง 2 ให้อยู่ในรูปเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง เช่น ผลงานของ Leva และทีมงาน [1] ได้เสนอสมการ

$$U_m^2 = \frac{CD_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \quad (3.5)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่เป็นฟังก์ชันกับ Re

เมื่อของไหลมีค่า $Re < 5$ จะได้ค่าเป็น $C = 0.0007 Re^{-0.063}$ แทนค่า g และ C ลงในสมการจะได้

$$U_m = \frac{688 D_p^{1.82} (\rho_s - \rho_g)^{0.94}}{\mu^{0.88}} \quad (3.6)$$

ค่า U_m มีหน่วยเป็นฟุตต่อชั่วโมง D_p มีหน่วยเป็นนิ้ว ความหนาแน่นมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อลบ.ฟุต และความหนืดมีหน่วยเป็นเซนติพอยส์

WEN และ YU [1] ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_m^3} = 14 \quad (3.7)$$

$$\frac{1 - \varepsilon_m}{\phi_s^2 \varepsilon_m^3} = 11 \quad (3.8)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.3 จะได้

$$U_m^2 = \frac{D_p (\rho_s - \rho_g)}{24.5 \rho_g} * g \quad (3.9)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_m = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \rho_g} \quad (3.10)$$

เมื่อ U_m มีหน่วยเป็นฟุตต่อชั่วโมง

นอกจากนั้นยังมีผลงานของท่านอื่นอีก เช่น Miller และ Longwinuk Johnson เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขอบเขตความเร็วของของไหล

ในการทำฟลูอิดไดเซชันความเร็วของของไหลจะอยู่ระหว่างค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน และความเร็วในการตกอิสระของวัตถุ ซึ่งเป็นความเร็วที่วัตถุจะหลุดออกจากคอลัมน์ที่ทำการฟลูอิดไดซ์ โดยความเร็วในการตกอิสระ (U_t) ของวัตถุหาจากสมการ

$$U_t = \left(\frac{4gD_p(\rho_s - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

เมื่อ C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยจะหาได้จากสมการ

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad \text{สำหรับ } Re < 0.4 \quad (3.12)$$

$$C_d = \frac{11}{Re_p^{1/2}} \quad \text{สำหรับ } 0.4 < Re < 500 \quad (3.13)$$

$$C_d = 0.43 \quad \text{สำหรับ } 500 < Re < 200000 \quad (3.14)$$

Pinchbeck และ Popper [1] ได้สร้างสมการอัตราส่วนของความเร็วในการตกอิสระต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ($\frac{U_t}{U_m}$) โดยใช้สมการของ Wen และ Yu รวมเข้ากับสมการความเร็วในการตกอิสระจะได้ว่า

$$\text{เมื่อ } Re < 0.4 \text{ จะได้ } \frac{U_t}{U_m} = 91.6 \quad (3.15)$$

$$\text{เมื่อ } Re > 1000 \text{ จะได้ } \frac{U_t}{U_m} = 8.72 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ทฤษฎี 2 วัฏภาคสำหรับฟลูอิดไดเซชัน [7]

เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นมากกว่า U_m จะทำให้ก๊าซที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ทะลุผ่านเบต ในลักษณะฟองก๊าซ หลักการของทฤษฎีที่ง่ายที่สุดที่ใช้อธิบายคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟลูอิดไดซ์เบต คือ ทฤษฎี 2 วัฏภาค

ฟลูอิดไดซ์เบต ประกอบด้วย 2 วัฏภาคดังนี้

1) วัฏภาคของแข็ง ประกอบด้วย มวลของสารเนื้อเดียวที่มีสัดส่วนช่องว่าง (void-fraction) เป็น ϵ_m และความเร็วของก๊าซเป็น U_m

2) วัฏภาคของฟองก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซที่เหลื่อมมีอนุภาคแขวนลอยเล็กน้อยมาก ฟองก๊าซไหลผ่านชั้นของอนุภาคอย่างรวดเร็ว และจะมีผลถึงการผสมกันของวัฏภาคของแข็ง วัฏภาคนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมของฟลูอิดไดซ์เบต

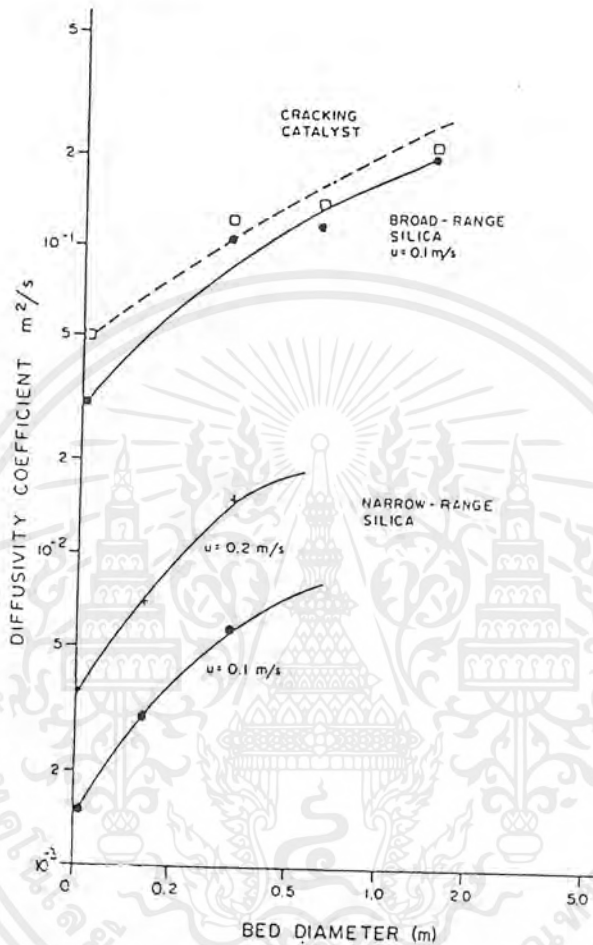
ฟองก๊าซเกิดขึ้นจากการพ่นก๊าซเข้ามาโดยผ่านรูขนาดเล็กของตัวกระจายก๊าซ และฟองก๊าซจะรวมตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะความดันลดลงเมื่อฟองก๊าซไหลผ่านชั้นฟลูอิดไดซ์เบต

3.8 การผสมในฟลูอิดไดซ์เบต

การผสมในฟลูอิดไดซ์เบต จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคและก๊าซ อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก เพราะว่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับก๊าซมีค่ามาก ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนและมวลจึงไม่ใช่ปัจจัยที่จะกำหนดอัตราการอบแห้ง

นอกเหนือจากการถ่ายเทความร้อนและมวลแล้ว สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งไม่ใช่แค่การกระจายตัวของก๊าซ แต่คือรูปแบบของอุณหภูมิตลอดเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบต โดยปกติแล้วการเกิดขึ้นของฟองก๊าซจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ อนุภาคเหล่านี้จะกระจายตัวไปยังจุดต่าง ๆ มีการเพิ่มขึ้นของกระแสอนุภาคหลังจากผ่านฟองก๊าซเข้าไป

Fluidized Bed Drying



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การแพร่ [7]

เนื่องจากการผสมเป็นขั้นตอนแรกของการเกิดฟองก๊าซ ซึ่งการเกิดฟองก๊าซขึ้นกับปริมาตรรวมของฟองก๊าซ และการเพิ่มสภาวะเหล่านั้นจะสามารถสร้างฟองได้อย่างเร็ว เช่น ฟองในเครื่องอบขนาดใหญ่ การผสมในแนวตั้งจะใช้เวลามากกว่าการผสมในแนวราบ อัตราการผสมของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง เช่นเดียวกับอนุภาคที่ราบเรียบจะผสมได้เร็วกว่าอนุภาคที่ขรุขระ DeGroot [7] ได้ทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดหลากหลาย ดังรูปที่ 3.3 นอกจากนั้นแบบช่วงกว้าง จะดีกว่าแบบช่วงแคบ และจากเส้นผ่านศูนย์กลาง-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลางของเบต ยังบอกผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางเบตต่อการผสม ที่เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.3 เมตร การสังเกตจุดนี้สำหรับการนำไปใช้จริงในโรงงานควรระวังเรื่องการขยายขนาดด้วย

3.9 การเลือกความเร็วลม : การใส่ฟองอากาศ

ในการเลือกความเร็วลมเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเสมอ ความเร็วลมที่ต้องใช้ในฟลูอิดเบดอย่างน้อยต้องเป็นสามเท่าของความเร็วที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน สำหรับในทางอุตสาหกรรมเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเบดต้องทำให้มีการผสมของอนุภาคอย่างเพียงพอ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าจะมีการกระจายอนุภาคนิวทั้งหมดตลอดชั้นของอนุภาค และถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ในกรณีนี้ควรออกแบบเครื่องอบให้มีขนาดเล็ก ความเร็วที่ใช้ควรจะเลือกให้มีขนาดมากพอที่ระบบการปล่อยอนุภาคจะยอมรับได้

วัสดุบางชนิดอาจสูญหายออกจากชั้นของอนุภาคได้เมื่ออนุภาคผ่านไปอยู่ที่ว่างเหนือเบต วัสดุตามธรรมชาติจะมีแนวโน้มที่จะลอยไปตามลมที่ปล่อยออก ในทางปฏิบัติแล้วถ้าความเร็วของก๊าซใกล้เคียงกับค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค ความเร็วสุดท้ายสำหรับการไหลแบบราบ-เรียบสามารถอธิบายได้โดยกฎของ Stokes

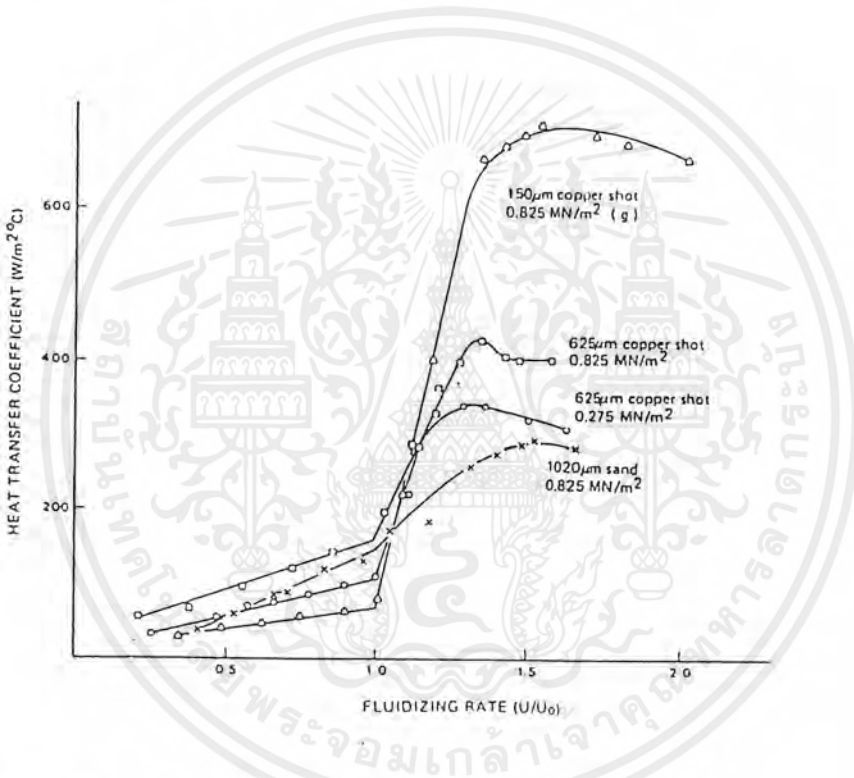
$$U_t = \frac{(\rho_s - \rho_g)gd^2}{18\mu} \quad (3.17)$$

สมการที่ 3.17 เป็นตัวกำหนดขอบเขตบนของการเลือกความเร็วลม มันจะบอกว่าคุณค่าของฟรีบอร์ด (free board) เหนือชั้นของฟลูอิดไดซ์ที่มีความสำคัญต่อกระแสที่เกิดจากการรวมกันของอนุภาคที่สูญเสียกับลมที่ปล่อยออก ขณะที่ความเข้มข้นของอนุภาคเหนือชั้นของฟลูอิดไดซ์มีค่าสูงมากเพราะว่าการเกิดฟองอย่างฉับพลัน ความสูงของฟรีบอร์ดจะสูงกว่าความสูงของช่วงการหยุดการเคลื่อนย้ายเบต (transport disengaging) เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบด

ก๊าซฟลูอิดไดซ์เบดจะมีคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนได้ดี ระหว่างชั้นฟลูอิดไดซ์ กับพื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในฟลูอิดไดซ์เบด สมการในการหาค่าโดยประมาณการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อนทั่วไป



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผนังสื่อบดกับความเร็วของของไหลที่ใช้ฟลูอิดไดซ์ [7]

การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับความจุความร้อนของอนุภาค และระดับการหมุนเวียนของอนุภาคที่พื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านของฟองก๊าซ ดังรูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังกับเบด จะเพิ่มขึ้นเมื่อเบดเปลี่ยนจากเบดหยุดนิ่งไปเป็นบับบลิ้งฟลูอิดไดซ์เบดโดยการผสมของอนุภาคอย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 3.4 เม็ดทองแดงขนาด

150 ไมโครเมตร จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าเม็ดทองแดงขนาด 625 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นว่าการผสมระหว่างก๊าซกับอนุภาคจะดีขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง Schlunder ได้อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนนี้ โดยกำหนดให้ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปในชั้นฟลูอิดไดซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคมีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร จะมีผลกระทบโดยตรงจากการพาความร้อน โดยอนุภาคที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิฟลูอิดไดซ์เบดเฉลี่ย มาสัมผัสกับพื้นผิวที่ร้อนเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ก่อนที่จะถูกแทนที่โดยอนุภาคอื่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยอนุภาคที่ได้รับความร้อนโดยวิธีนี้จะกระจายความร้อนอย่างรวดเร็วให้อนุภาคอื่น ๆ ในชั้นของฟลูอิดไดซ์ Schlunder ได้แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความถูกต้องในการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผนังไปยังชั้นฟลูอิดไดซ์เบด

ข้อสังเกต

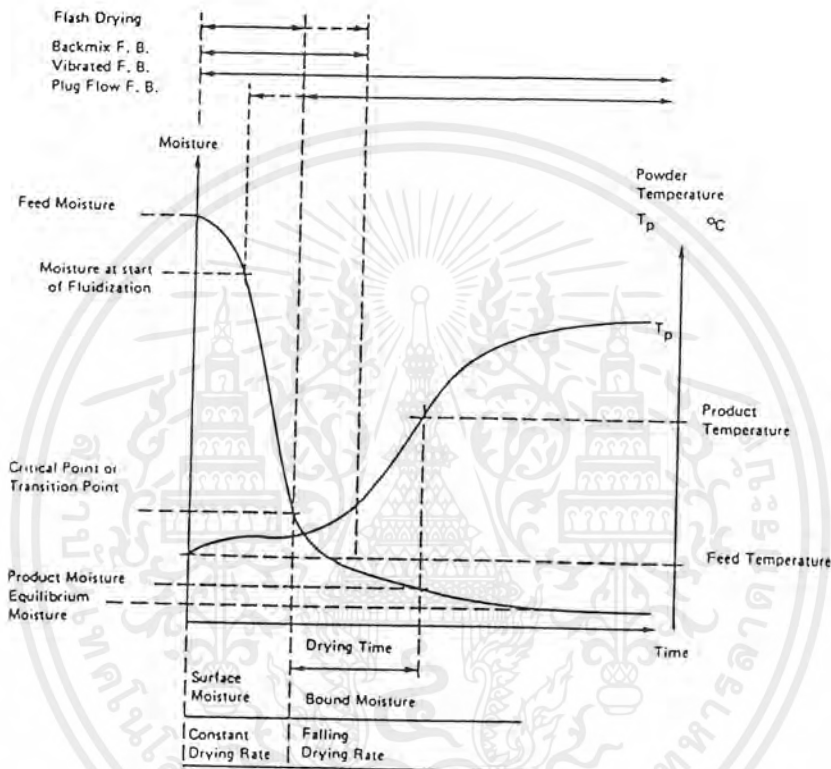
- 1) อัตราการแทนที่และการกระจายตัวที่มีค่ามากระหว่างอนุภาค มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน
- 2) การแทนที่ของอนุภาค (เย็น) ที่ผนัง (ร้อน) จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิ (Δt) คงที่มากที่สุดค่าหนึ่ง
- 3) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถเพิ่มถึงค่ามากที่สุดได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของฟองก๊าซที่ผนัง
- 4) การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเข้าไปสู่ภายในเบดสามารถเกิดขึ้นได้ดี เพราะค่าความจุความร้อนโดยปริมาตรของอนุภาคมีค่ามากกว่าค่าความจุความร้อนโดยปริมาตรของก๊าซมีสมการจำนวนมากที่ใช้ในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อน แต่อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์จริง ๆ มักจะทำการวัดในการทดลองภายใต้สภาวะที่ปฏิบัติงานจริง เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นที่ยอมรับสำหรับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดในโรงงานอุตสาหกรรม

3.11 พฤติกรรมการอบแห้งของอนุภาคที่ฟลูอิดไดเซชัน

แต่ละผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเส้นโค้งของการอบแห้งเฉพาะตัวหลายลักษณะ เส้นโค้งของการอบแห้งสามารถวัดจากการทดสอบในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันขนาดเล็ก โดยทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดจุดข้อมูลของสารที่สามารถระเหยได้ที่เหลืออยู่ (residual volatiles) กับเวลา ตัวอย่างของเส้นโค้งของการอบแห้งแสดงในรูปที่ 3.5 พร้อมกับเส้นโค้งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการวัดในระหว่างที่ทำการทดลองการอบแห้งด้วยวิธีฟลูอิดไดเซชันแบบกะ



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งของการอบแห้งและเส้นโค้งของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ [7]

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ความชื้นที่พื้นผิวจะระเหยอย่างรวดเร็วเข้าไปในเฟสของก๊าซที่ใช้อบแห้ง และจะถึงจุดที่เรียกว่าจุดเปลี่ยนแปลง (transition point) หรือจุดวิกฤติ (critical point) ของเส้นโค้งของการอบแห้ง แต่ทว่า ช่วงที่วัสดุมีความชื้นต่ำลง การอบแห้งจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ของความชื้นภายในอนุภาค และอัตราการอบแห้งจะลดลง เมื่อต้องการให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่าต่ำมาก ๆ จะต้องใช้เวลาในการอบแห้งหลายชั่วโมง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์หลังจากช่วงเริ่มต้นระหว่างการระเหยของความชื้นจะทำให้อุณหภูมิลดลง หรือเพิ่มขึ้นใกล้กับอุณหภูมิของก๊าซที่ใช้ในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแลกเปลี่ยนความร้อนกับความชื้นในฟลูอิดไดซ์เบดแบบกะจะถูกจำกัด เพราะก๊าซจะถึงจุดอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว สำหรับสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบกะที่ใช้เวลานานความชื้นที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์สุดท้ายมากกว่าแบบต่อเนื่องที่มีการผสมกันของวัสดุเก่าและวัสดุใหม่ การสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ถูกฟลูอิดไดซ์ที่เปียกและแห้งจะเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้น

Reay และ Allen [7] แสดงให้เห็นว่า สำหรับวัสดุที่มีความต้านทานการแพร่ของมวลภายในเมล็ดอยู่ในระดับต่ำหรือปานกลาง เวลาที่ต้องการเพื่อให้ปริมาณความชื้นในเมล็ดในการทดสอบการอบแห้งแบบกะถึงค่าที่ต้องการ สามารถสมมติให้แปรผันตรงกับน้ำหนักของเบดต่อหน่วยพื้นที่ และแปรผกผันกับความเร็วก๊าซ สมดุลมวลและความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ที่ที่มีการผสมกันอย่างดีในกรณีปกติจะอธิบายระบบเพียงพอแล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่มีความยุ่งยาก อุณหภูมิสูงสุดของก๊าซที่ใช้ในการอบแห้งอาจทำการวัดโดยใช้ความไวของการเปลี่ยนแปลงความร้อน และค่าความเป็นเทอร์โมพลาสติกของผลิตภัณฑ์ ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงเกินไป มันจะมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนบนแผ่นกระจายอากาศ และฟลูอิดไดซ์จะหยุดอุณหภูมิที่จำกัดอาจวัดโดยการทดลองการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์ในกระบวนการผลิตจำลอง

ในแต่ละการทดสอบจะวัดขีดจำกัดในการปฏิบัติ สำหรับความเร็วของก๊าซที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ ค่าที่ต่ำกว่าค่าบางค่า ฟลูอิดไดซ์อาจจะไม่เกิดหรือเกิดไม่ทั่วถึง ค่าที่เหนือกว่าค่าบางค่า การแขวนลอยที่มากเกินไปของอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดขึ้นจากชั้นที่มีการฟลูอิดไดซ์ ปริมาตรรวมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและขนาดของเครื่องอบแห้งจะเป็นฟังก์ชันกับความร้อนที่ต้องการในการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิและความเร็วในการฟลูอิดไดซ์ที่กำหนด

เมื่อการอบแห้งถูกควบคุมโดยการแพร่ของความชื้นในเมล็ด การทดสอบการอบแห้งแบบกะจะสามารถหาเวลาของการอบแห้งก็จำเป็นสำหรับสภาวะบางค่าในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์แบบที่มีการไหลที่มีความเร็วเท่ากันทั่วพื้นที่หน้าตัด (ideal plug flow) ถ้าสามารถทราบการผสมของอนุภาคสำหรับขนาดเครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็สามารถคำนวณโดยใช้ขั้นตอนที่อธิบายโดย Poersch [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดรวมทั้งการอบแห้งรวดเร็ว (flash drying)

แสดงไว้ในรูปที่ 3.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การควบคุมกระบวนการ

ขอบเขตของงานที่ได้ศึกษาจะเกี่ยวข้องกับการควบคุมความชื้นของระบบ ให้เหมาะสม สำหรับการอบแห้งเมล็ดพืช ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการที่เป็น พื้นฐานในการออกแบบระบบ

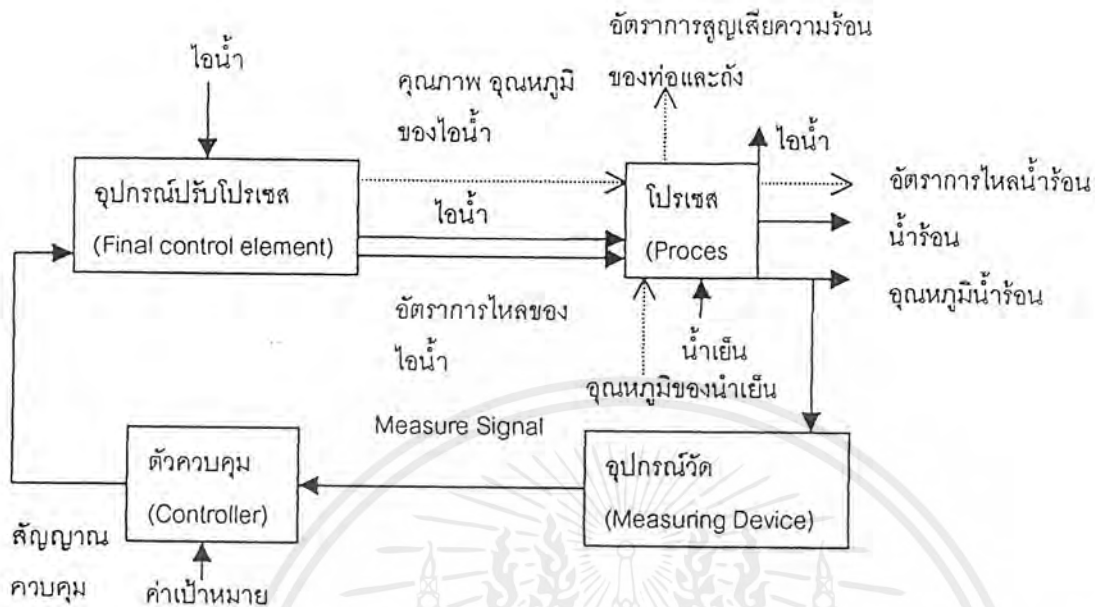
4.1 การควบคุมกระบวนการ [4]

การควบคุมกระบวนการ หมายถึง การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น อัตราการไหล ฯลฯ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมมากที่สุด แม้ว่าสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาก็ตาม ในการควบคุมกระบวนการจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ หลายส่วนมาประกอบกันและทำงานร่วมกัน เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ตามที่เราต้องการ

4.2 องค์ประกอบของการควบคุมกระบวนการ

โดยปกติองค์ประกอบของระบบควบคุม ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบใดจะประกอบด้วย องค์ประกอบหลักดังนี้ คือ 1. กระบวนการ (Process) 2. อุปกรณ์วัด (Measuring Device) 3. ตัวควบคุม (Controller) 4. อุปกรณ์ปรับโปรเซส (Final Control Element) โดยทั้ง 4 ส่วนจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กัน ดังแสดงตัวอย่างจากบล็อกไดอะแกรม ที่แสดงการควบคุมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรม แสดงองค์ประกอบสำคัญในการควบคุมอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.2.1 กระบวนการ (Process)

หมายถึง ขบวนการทางฟิสิกส์ที่เราต้องการควบคุมให้มีสภาวะตามที่เรต้องการ ขณะที่สภาวะการทำงาน หรือ สภาพแวดล้อมอาจจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ตัวแปรทางฟิสิกส์ซึ่งแสดงสภาวะทางฟิสิกส์ของกระบวนการ เราเรียกว่า ตัวแปรของกระบวนการ (Process Variable) เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระดับ ความชื้น เป็นต้น

เราสามารถเปลี่ยนค่าของตัวแปรของกระบวนการได้ โดยการปรับค่าอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนตัวแปรของกระบวนการ (Manipulated Variable) เช่น การปรับวาล์วเพื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหล

นอกจากนี้ตัวแปรของกระบวนการยังเปลี่ยนค่าตามสิ่งรบกวนกระบวนการ (Process Disturbance) ซึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อม

ของกระบวนการ เราสามารถจำแนกสิ่งรบกวนกระบวนการได้เป็น 2 ประเภทคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Supply Disturbance (หรือ Supply Load Change) คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงาน(วัตถุ)ขาเข้า เช่น การเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำขาเข้า

Demand Disturbance (Demand Load changes) คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงาน(วัตถุ)ขาออก เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลขาออก

4.2.2 อุปกรณ์วัด (Measuring Device)

เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณขาออกซึ่งมีขนาดสัมพันธ์เป็นสมการที่คงที่กับขนาดของตัวแปรทางฟิสิกส์ที่เราต้องการวัด โดยทั่วไปแล้วความสัมพันธ์ดังกล่าวควรเป็นสมการเชิงเส้น

4.2.3 เครื่องควบคุม (Controller)

หมายถึง สิ่งที่ทำหน้าที่ออกคำสั่ง หรือกำเนตสัญญาณควบคุม (Control Signal) ตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control Law) ที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า คำสั่งหรือสัญญาณควบคุมนี้เป็นฟังก์ชันกับสัญญาณขาเข้าที่ได้รับจากอุปกรณ์วัด หรืออาจจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา

4.2.3 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของกระบวนการ (Final Control Element)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของตัวแปรหลักที่ต้องการควบคุม เช่น การเปลี่ยนแปลงช่องเปิดของวาล์ว เพื่อควบคุมอัตราการไหล ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับ

ในการควบคุมทั่วไป คำสั่งหรือสัญญาณควบคุมจะมีขนาดหรือพลังงานน้อย ๆ ส่วนอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรจะต้องการขนาดหรือจำนวนพลังงานมาก

4.3 ชนิดของการควบคุมอัตโนมัติ

ในการควบคุมไม่ว่าจะเป็นแบบ Manual หรือแบบอัตโนมัติจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญสี่ส่วน โดยหลักการแล้วความแตกต่างของการควบคุมทั้งสองประเภทอยู่ที่ แบบแรกใช้คน ส่วนแบบที่สองใช้เครื่องเป็นตัวควบคุม ปัจจุบัน เทคโนโลยีโดยเฉพาะทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้เครื่องควบคุมอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทำงานของมนุษย์มาก ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงเฉพาะชนิดของการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control) เท่านั้น

การแบ่งประเภทของการควบคุมแบบอัตโนมัติอาจทำได้หลายลักษณะ เช่นการแบ่งประเภทตามพื้นฐานของการออกแบบ (Basic Design Philosophy) จะแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) และการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control)

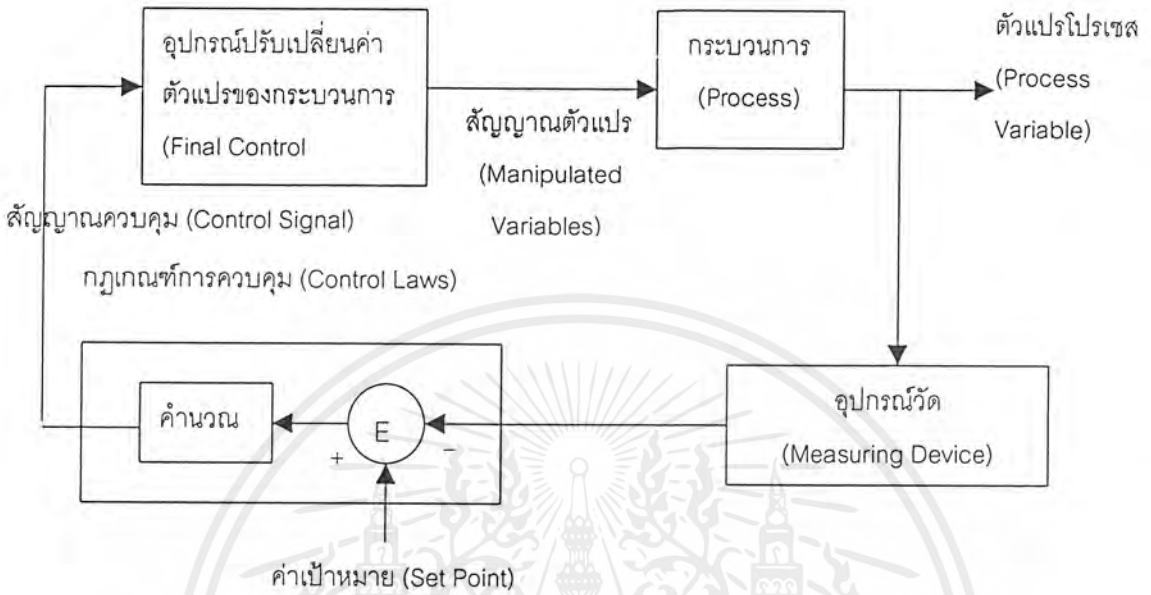
4.3.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรของกระบวนการ (Manipulate Variable) ถูกกำหนดโดยสัญญาณที่ได้จากตัวแปรหลักที่เราต้องการควบคุม

หลักสำคัญของการควบคุมแบบนี้ เริ่มจากการวัดหาค่าตัวแปรแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Design Value Set Point) ระบบจะเริ่มทำงานก็ต่อเมื่อค่าตัวแปรที่วัดได้มีค่าแตกต่างกับค่าเป้าหมาย โดยผลต่างของการเปรียบเทียบ (Deviation) หรือความคลาดเคลื่อน (Error) จะถูกนำไปคำนวณหาสัญญาณควบคุม (Control Signal) ที่เหมาะสม ป้อนกลับไปปรับเปลี่ยนตัวแปรของกระบวนการ การทำงานจะกระทำซ้ำ ๆ จนตัวแปรโปรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย จึงจะหยุดพร้อมกับคงค่าสัญญาณควบคุมเดิมไว้ จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอีกจึงจะเริ่มทำงานใหม่

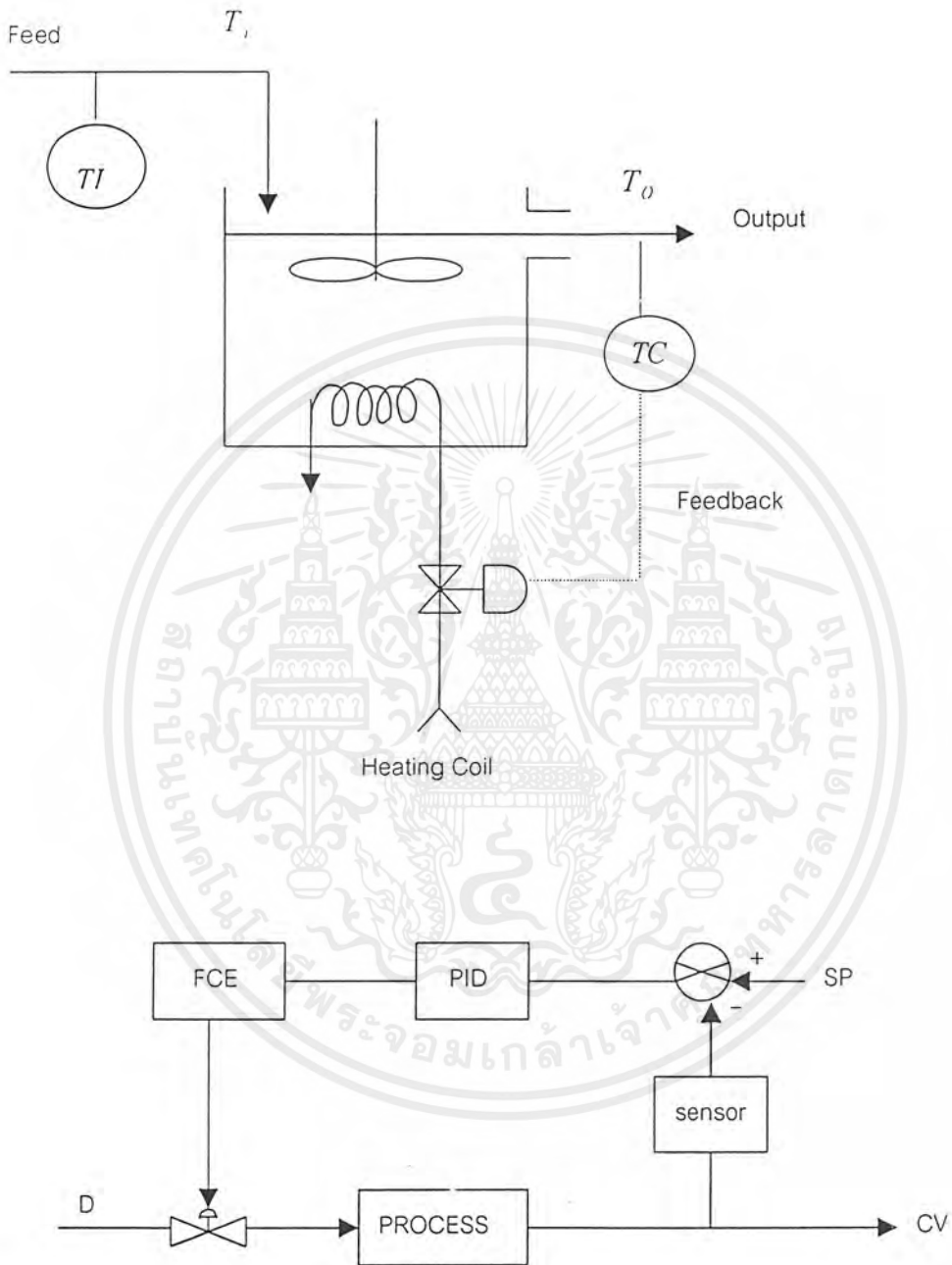
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งรบกวนกระบวนการ (Process Disturbance)



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ
(Feedback Control)

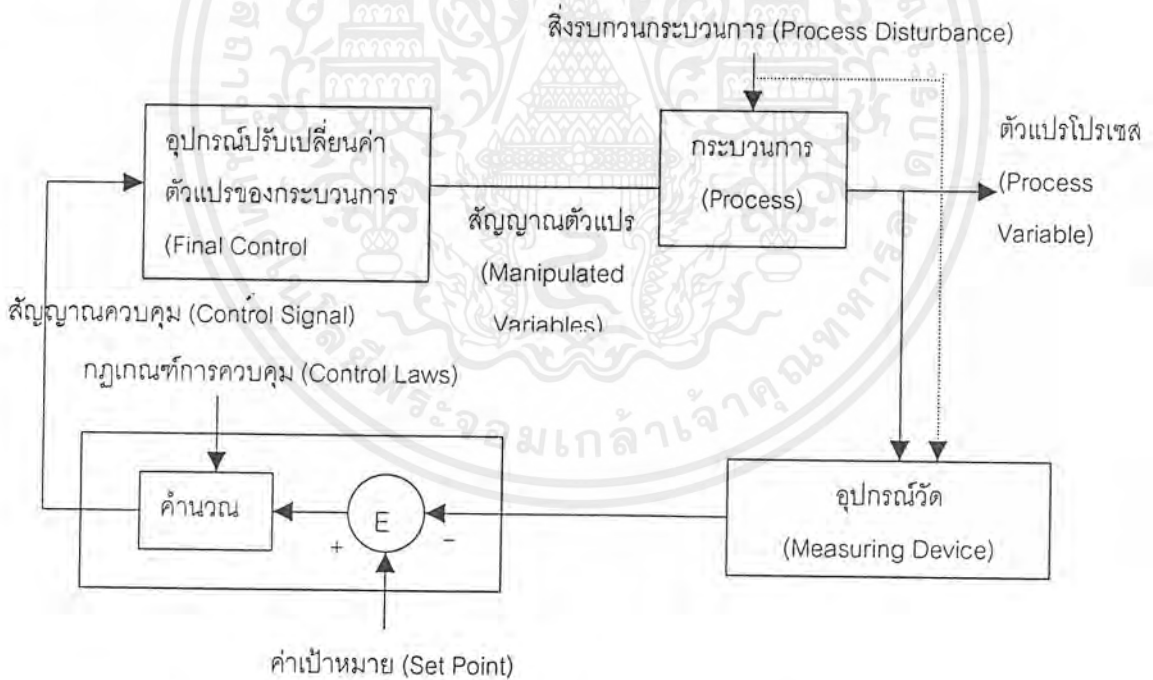
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นแบบที่พบบ่อยที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรม ตัวควบคุมที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบ ON-OFF หรือ PID Controller

4.3.2 การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า (Feedforward Control) ตัวแปรปรับโปรเซส (Manipulate Variable) ไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรโปรเซส (Process Variable) แต่จะถูกกำหนดด้วยสิ่งรบกวนโปรเซส (Process Disturbance)

หลักการสำคัญของการควบคุมแบบนี้ เริ่มจากการวัดค่าสิ่งรบกวนโปรเซส แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมป้อนล่วงหน้าไปปรับโปรเซสต้านกับสิ่งรบกวนก่อนที่ตัวแปรโปรเซสจะเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนล่วงหน้าจำเป็นต้องทราบอย่างชัดเจนว่า ตัวแปรปรับโปรเซสสัมพันธ์อย่างไรกับสิ่งรบกวนโปรเซส ค่าเป้าหมาย และสัญญาณวัด แต่โดยทั่วไประบบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบขึ้นด้วยขั้นตอนดังนี้

- 4.4.1 กำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม
- 4.4.2 เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพกระบวนการ
- 4.4.3 เลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการ
- 4.4.4 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม
- 4.4.5 กำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

4.4.1 การกำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม

วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายในการควบคุม เป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุม วัตถุประสงค์หลักทั่วไปในการควบคุมกระบวนการอุตสาหกรรมประกอบด้วย

- 4.4.1.1 การกำจัดผลการรบกวนภายนอก
- 4.4.1.2 การรักษาเสถียรภาพของกระบวนการ
- 4.4.1.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการ

การตรวจสอบผลการควบคุมมักใช้วิธีตรวจสอบสภาพของกระบวนการจากค่าวัด

ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการควบคุมที่ต้องการและได้กำหนดไว้แล้ว

4.4.2 การเลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบกระบวนการ

เมื่อกำหนดเป้าหมายในการควบคุมเรียบร้อยแล้ว ปัญหาการออกแบบระบบควบคุมที่ตามมา คือควรตรวจสอบสภาพกระบวนการอย่างไรให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ได้วางไว้ เลือกค่าวัดจากกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ระดับของเหลว เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบสภาพของกระบวนการ บางครั้งสภาพของกระบวนการไม่สามารถตรวจสอบได้จากค่าวัดของกระบวนการโดยตรง ต้องใช้ค่าวัดอื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าวัดของกระบวนการโดยตรง ต้องใช้ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดอื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าวัดที่ต้องการแทน โดยใช้การคำนวณเพื่อช่วยตรวจสอบสภาพกระบวนการ ค่าวัดที่สามารถแสดงสภาพของกระบวนการได้โดยตรงเรียกว่า ค่าวัดปฐมภูมิ (Primary measurement) และสภาพของกระบวนการที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงต้องใช้วัดค่าอื่นและการคำนวณช่วย ค่าวัดที่ใช้ในการคำนวณเรียกว่า ค่าวัดทุติยภูมิ (Secondary measurement) โดยแสดงสภาพของกระบวนการที่ต้องการทราบของค่าวัดจริงเป็นฟังก์ชันของค่าวัดจริง

ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของสภาพกระบวนการและค่าวัดจริง อาจคำนวณได้จากทฤษฎีพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ และผลการทดลอง

4.4.3 การเลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพของกระบวนการ

การเลือกสัญญาณควบคุมที่ใช้ปรับสภาพกระบวนการ ควรพิจารณาเลือกตัวแปรที่มีผลให้สภาพกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยตรง สามารถปรับค่าและสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

4.4.4 การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม

การออกแบบระบบควบคุม เมื่อสามารถกำหนดเป้าหมายการควบคุม เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพของกระบวนการ และเลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพของกระบวนการแล้ว ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมอันดับสุดท้ายคือ การกำหนดรายละเอียดการควบคุม โดยจัดโครงสร้างของระบบควบคุม (Control Configuration) หรือเลือกวงของระบบควบคุม (Control Loop) ที่เหมาะสม เพื่อให้การควบคุมได้ผลดีที่สุด

โครงสร้างของระบบควบคุมหรือวงของการควบคุมหมายถึง การติดตั้งอุปกรณ์วัดและควบคุม เพื่อนำสัญญาณจากเครื่องวัดมาสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โครงสร้างของระบบควบคุมแบ่งออกเป็นดังนี้

4.4.4.1 สัญญาณควบคุมจากจุดเดียวกันได้จากค่าวัดตรงจุดกัน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การพิมพ์จากจุดเดียวกันได้จากค่าวัดตรงจุดกัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

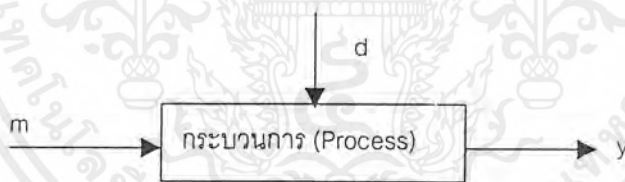
4.4.4.2 สัญญาณควบคุมต่างจุดกันได้จากค่าวัดจุดเดียวกัน

4.4.5 การกำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

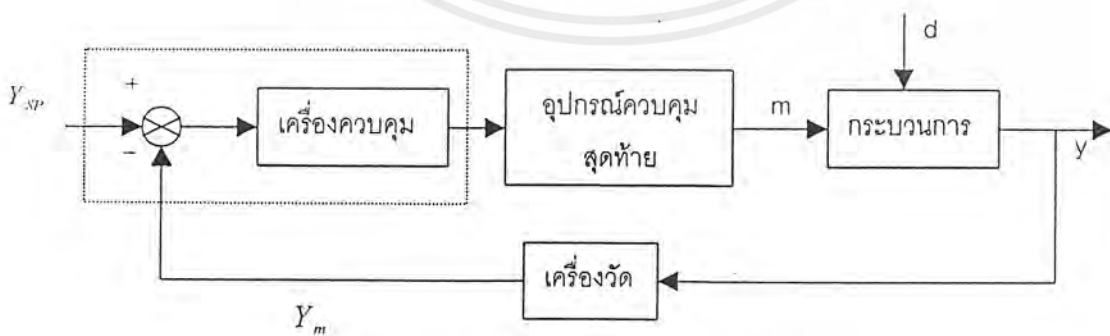
กระบวนการอุตสาหกรรมทุกกระบวนการต้องใช้เครื่องควบคุมปรับสภาพกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมาย โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมและค่าวัดของกระบวนการจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นกับคุณสมบัติของเครื่องควบคุมแต่ละชนิด

4.5 การควบคุมแบบป้อนกลับ [3]

การควบคุมแบบป้อนกลับคือการควบคุมที่เลือกนำมาใช้ในงานที่ได้ศึกษานี้ เนื่องจากมีพื้นฐานที่เข้าใจง่ายเป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป ผังสัญญาณควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 4.7



(ก) ผังสัญญาณของกระบวนการอุตสาหกรรม



(ข) ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

รูปที่ 4.7 สัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรออกหรือสภาพของกระบวนการ $y(t)$ จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าของกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วย ตัวแปรปรับกระบวนการ $m(t)$ จากเครื่องควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายและการควบคุมภายนอก $d(t)$ หรือสภาพแวดล้อมภายนอกที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของสภาพกระบวนการ การควบคุมสภาพของกระบวนการหรือตัวแปรออกของกระบวนการให้มีค่าตามเป้าหมายที่ต้องการในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ มีลำดับขั้นตอนดังนี้

4.5.1 เครื่องวัด ตรวจสอบสภาพและวัดค่าตัวแปรของกระบวนการ y เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของเหลว และได้ค่าวัด y_m ของกระบวนการจากเครื่องวัด ที่ใช้เป็นตัวแทนแสดงสภาพของกระบวนการ

4.5.2 อุปกรณ์เปรียบเทียบจะเปรียบเทียบค่าวัดของกระบวนการ y_m กับค่าสภาพของกระบวนการที่ต้องการ ซึ่งเป็นเป้าหมายในการควบคุม y_{sp} และคำนวณค่าคลาดเคลื่อนในการควบคุม

$$\varepsilon = y_{sp} - y_m$$

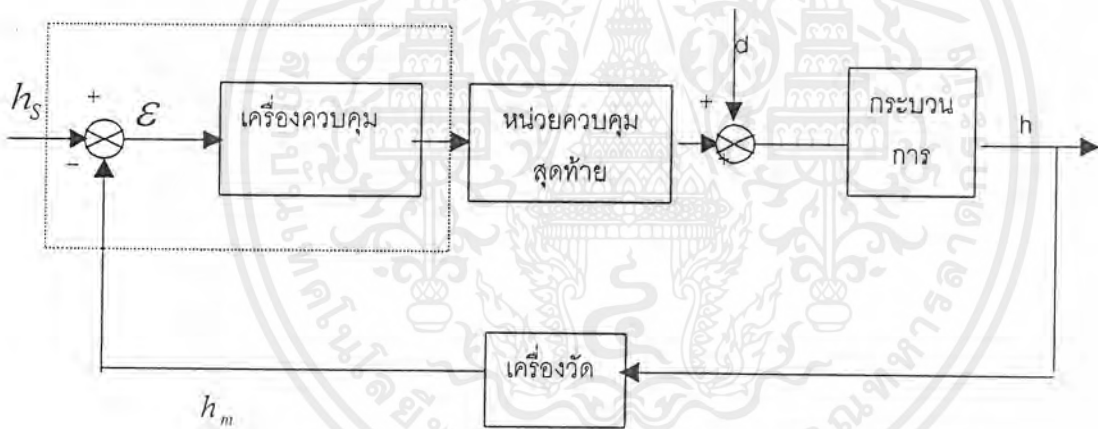
4.5.2.1 เครื่องควบคุมนำค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณเพื่อปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยส่งสัญญาณควบคุม c ไปยังกระบวนการเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุม แต่สัญญาณจากเครื่องควบคุมมักจะไม่สามารถใช้ปรับสภาพของกระบวนการได้โดยตรง เครื่องควบคุมจึงต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายเพื่อเปลี่ยนรูปหรือเพิ่มขนาดของสัญญาณควบคุมให้มีกำลังมากพอสำหรับใช้ปรับสภาพของกระบวนการ โดยสัญญาณจากอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายนี้มักจะเรียกว่าสัญญาณปรับกระบวนการ m

ผังสัญญาณของกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) เรียกว่า ระบบวงเปิด(open loop) และผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ข) เรียกว่า ระบบวงปิด(close loop) เนื่องจากการนำค่าตัวแปรออก y ป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรขาเข้าของระบบควบคุม y_{sp}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 แผนภาพกรอบควบคุมของกระบวนการ

เราจะแสดงระบบควบคุมด้วยแผนภาพกรอบดังแสดงในรูปที่ 4.8 แผนภาพกรอบทำให้เราเห็นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมได้ง่ายขึ้น จากแผนภาพกรอบเราจะเห็นคำว่า จุดปรับตั้ง(set point) และ ภาระ(load) จุดปรับตั้งหมายถึง ค่าของตัวแปรที่ถูกควบคุมของระบบที่เราต้องการ เช่น ระดับของเหลวที่เราต้องการ คือ 1 เมตร หรืออุณหภูมิของของเหลวในถังที่เราต้องการคือ 50°C เป็นต้น ส่วนภาระจะหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้าซึ่งทำให้ตัวแปรที่ถูกควบคุมของระบบเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราไหลเข้าของของเหลว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลเข้า เป็นต้น



รูปที่ 4.8 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอย่างง่าย

การควบคุมในรูปที่ 4.8 เรียกระบบวงปิด (close loop system) หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feed back control system) เพราะระบบจะป้อนค่าที่ได้จากการวัดของตัวแปรที่ถูกควบคุมกลับไปยังเครื่องเปรียบเทียบ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับจุดปรับตั้ง ถ้ามีความแตกต่างหรือความผิดพลาดเกิดขึ้นเครื่องควบคุมจะสั่งการให้หน่วยควบคุมสุดท้ายทำงาน เพื่อลดขนาดของความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 เครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ

เครื่องควบคุม ถือว่าเป็นสมองของระบบควบคุม เพราะเครื่องควบคุมมีหน้าที่ตัดสินใจว่าจะทำอะไร เพื่อที่จะทำให้ตัวแปรที่ถูกควบคุมกลับมายังจุดปรับตั้ง หลังจากที่เกิดการแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเข้า

เครื่องควบคุมทำหน้าที่ตัดสินใจโดย

- เปรียบเทียบค่าปรับตั้ง กับสัญญาณที่มาจากเครื่องวัด
- ส่งสัญญาณไปยังหน่วยควบคุมสุดท้าย เพื่อหน่วยควบคุมสุดท้ายทำการปรับตัวแปรที่ถูกควบคุมให้กลับไปสู่ค่าปรับตั้ง

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม เครื่องควบคุมจะทำหน้าที่ตรวจสอบสภาพของกระบวนการโดยใช้ค่าวัดของตัวแปรกระบวนการจากเครื่องวัด y_m เปรียบเทียบกับเป้าหมายการควบคุม y_{sp} และสร้างสัญญาณควบคุม c เพื่อปรับสภาพของกระบวนการโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $e = y_{sp} - y_m$ ในการตัดสินใจ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม e กับสัญญาณควบคุม c ของเครื่องควบคุมจะมีลักษณะอย่างไรขึ้นกับชนิดและคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

ปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างของการทำงานได้ 3 แบบ คือ เครื่องควบคุมแบบนิวแมติกส์ ทำงานโดยใช้สัญญาณจากลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทำงานโดยใช้วงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้นสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิตอล ทำงานโดยใช้วงจรรวม หรือไมโครโปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุมโดยการเขียนแบบและจำลองการทำงานของเครื่องควบคุมแบบนิวแมติกส์และเครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องควบคุมแบบเดิม เครื่องควบคุมแบบพื้นฐานที่ใช้ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับในกระบวนการอุตสาหกรรมมี 3 แบบ คือ เครื่องควบคุมแบบพี เครื่องควบคุมแบบพีไอ เครื่องควบคุมแบบพีไอดี

4.7.1 เครื่องควบคุมแบบพี (Proportional controller หรือ P controller) สัญญาณควบคุม

จะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + C_s \quad (4.1)$$

เมื่อ K_c คือ อัตราการควบคุมแบบพี (proportional gain) ของเครื่องควบคุม C_s คือ สัญญาณถ่วง (bias signal) ของเครื่องควบคุมเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมมีค่า 0

เครื่องควบคุมแบบพี สามารถแสดงอัตราการควบคุม 2 วิธี คือ อัตราการควบคุมแบบพี K_c และแถบการควบคุมแบบพี (PB proportional band) โดย $PB=100/K_c$ % แถบการควบคุมแบบพี หมายถึงค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม ε ที่ทำให้สัญญาณควบคุมมีค่าสูงสุด

4.7.2 เครื่องควบคุมแบบพีไอ (proportional-integral controller หรือ PI controller) สัญญาณควบคุมมีความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมตามสมการ

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + c_s \quad (4.2)$$

เมื่อ τ_I คือ ค่าคงที่ของช่วงเวลารวมอินทิเกรต (integral time constant) หรือช่วงเวลาเริ่มต้นอินทิเกรต (reset time) ของเครื่องควบคุมแบบไอ

เครื่องควบคุมแบบไอแสดงอัตราการควบคุมโดยใช้ค่าคงที่ของช่วงเวลารวมอินทิเกรต หรือช่วงเวลาเริ่มต้นอินทิเกรต มีหน่วยเป็นนาที/ครั้ง หรือ แสดงการควบคุมโดยใช้อัตราการเริ่มต้นอินทิเกรตมีหน่วยเป็น ครั้ง/นาที มีค่า $1 / \tau_I$

4.7.3 เครื่องควบคุมแบบพีไอดี (proportional – Integral – derivative controller หรือ PID controller) สัญญาณควบคุมของเครื่องควบคุมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d}{dt} \varepsilon_c(t) + c_s \quad (4.3)$$

เมื่อ τ_D คือ ค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์ (derivative time constant) ของเครื่องควบคุมแบบดี เครื่องควบคุมสร้างสัญญาณควบคุมแบบดีจากพจน์ $d\varepsilon/dt$ ในสมการ(4.3)ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงทันทีที่ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุม $\varepsilon(t)$ มีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง และสัญญาณควบคุมแบบดีจะถูกสร้างขึ้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมล่วงหน้าทันที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

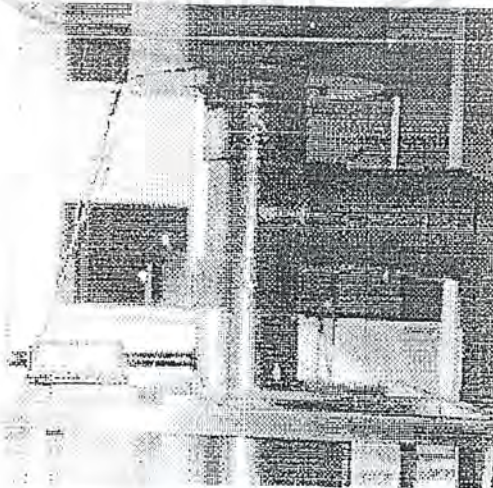
การออกแบบระบบควบคุมความชื้น

ระบบที่ศึกษานั้นเป็นระบบการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของลม เพื่อที่จะให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น จากขอบเขตที่ได้ทำการศึกษานั้นคือการนำลมร้อนกลับมาใช้ซ้ำ โดยมีการออกแบบระบบควบคุมความชื้นซึ่งขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบระบบควบคุมความชื้นนั้นมีดังนี้

5.1 กำหนดวัตถุประสงค์ในการควบคุม

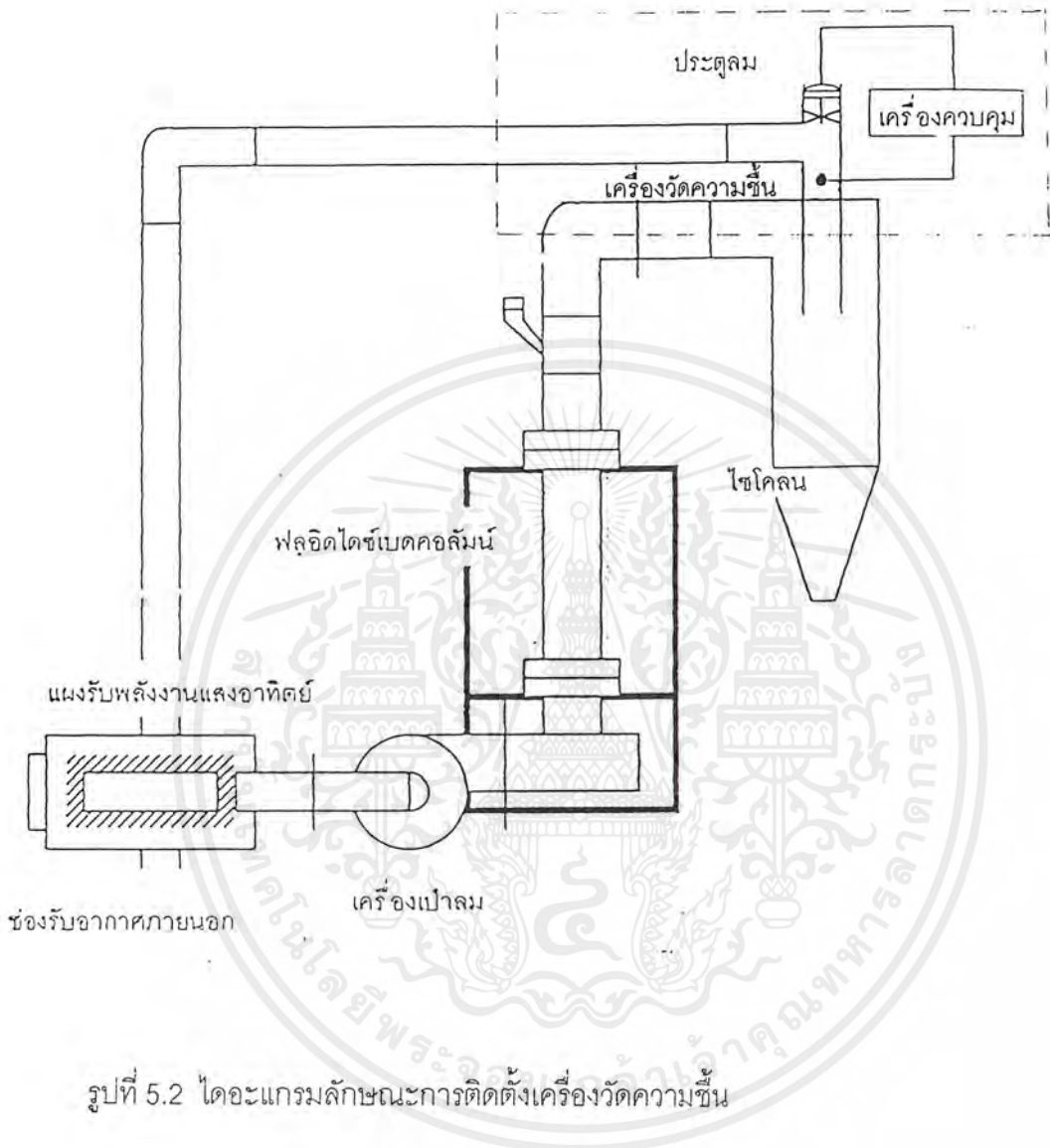
เราต้องการนำลมร้อนกลับมาใช้ซ้ำแต่ในการอบแห้งค่าความชื้นของลมในระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องการควบคุมความชื้นในระบบการอบแห้งให้มีค่าที่เหมาะสมกับการอบแห้ง

5.2 เลือกสัญญาณวัดเพื่อตรวจสอบสภาพของกระบวนการ



รูปที่ 5.1 เครื่องวัดความชื้นพร้อมลักษณะการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมลักษณะการติดตั้งเครื่องวัดความชื้น

สัญญาณวัดที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพของกระบวนการ คือ ค่าความชื้นของลมในระบบ โดยใช้เครื่องวัดความชื้นติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของไซโคลน ดังรูปที่ 5.1 เมื่อมีลมผ่านบริเวณดังกล่าวเครื่องวัดความชื้นของลม แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องควบคุม เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้กับค่าที่ตั้งไว้ โดยที่ค่าความชื้นที่วัดได้จะแสดงในรูปความชื้นสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 เลือกสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพกระบวนการ

ตัวแปรที่จะควบคุมเพื่อปรับสภาพของระบบให้มีความขึ้นตามที่เรากำลังต้องการ คือ อัตราการไหลออกของลมร้อนในระบบ เพื่อให้มีการถ่ายเทความขึ้นออกจากระบบและนำลมใหม่จากภายนอกระบบมาผสมเพื่อที่จะลดค่าความขึ้นในระบบ

อุปกรณ์ที่เราใช้ในการควบคุมอัตราการไหลออกของลมร้อนในระบบ คือ ประตุลมซึ่งมีลักษณะและการทำงานดังนี้

5.3.1 การทำงานของประตุลม

ประตุลมจะรับสัญญาณจากเครื่องควบคุมซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้า ทำให้มอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ เปิด-ปิดประตุลมตามค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ถ้าลมร้อนในระบบมีค่าความขึ้นมากกว่าค่าที่ตั้งไว้ มอเตอร์ก็จะหมุนในทิศทางที่ทำให้ประตุลมเปิดกว้างขึ้น ทำให้ลมร้อนไหลออกจากระบบในปริมาณที่มากขึ้น ในทางกลับกันถ้าหากว่าความขึ้นในระบบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ มอเตอร์ก็จะหมุนในทิศทางที่ทำให้ประตุลมปิดลง เพื่อลดปริมาณลมร้อนที่ไหลออกจากระบบทำให้มีลมร้อนไหลวนในระบบมากขึ้น ขณะเดียวกันนี้จะเพิ่มการประหยัดพลังงานความร้อนในระบบพร้อมกันไปด้วย

ในส่วนใบเปิด-ปิดประตุลม จะติดกับเฟือง เมื่อเฟืองเคลื่อนที่ใบเปิด-ปิดจะเคลื่อนที่ตามเพื่อเปิด-ปิดประตุลม

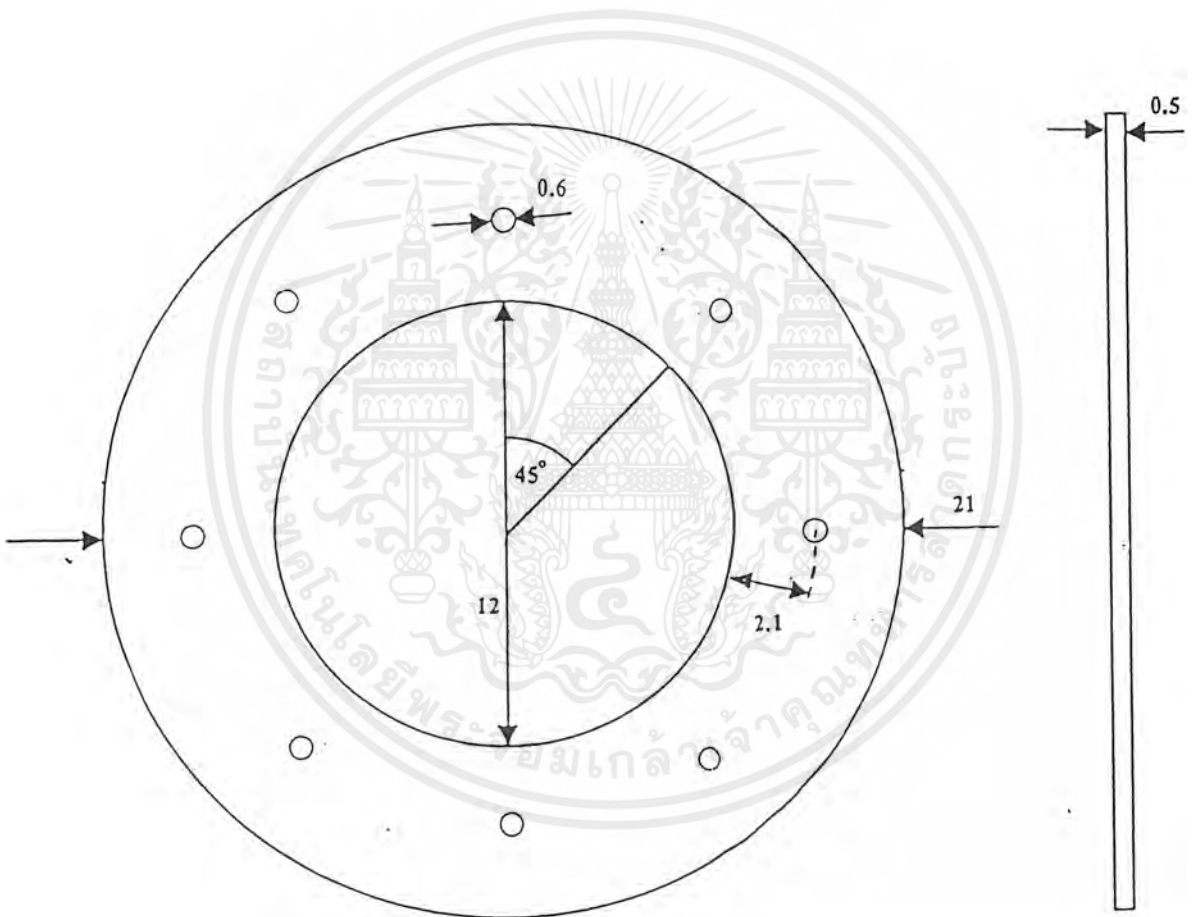
5.3.2 ลักษณะของประตุลม

ประตุลมจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนวงแหวนโลหะ และส่วนใบเปิด-ปิด ส่วนของวงแหวนโลหะจะประกอบด้วยแผ่นโลหะวงแหวนสองแผ่น แผ่นที่อยู่ด้านล่างจะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ โดยจะยึดติดกับปล่องเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 21 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 ซม. ภายในวงแหวนจะเจาะรู 8 รู ระยะห่างของแต่ละรูเท่า ๆ กันเพื่อยึดติดกับใบเปิด-ปิดความหนาของแผ่นวงแหวนโลหะหนา 0.5 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

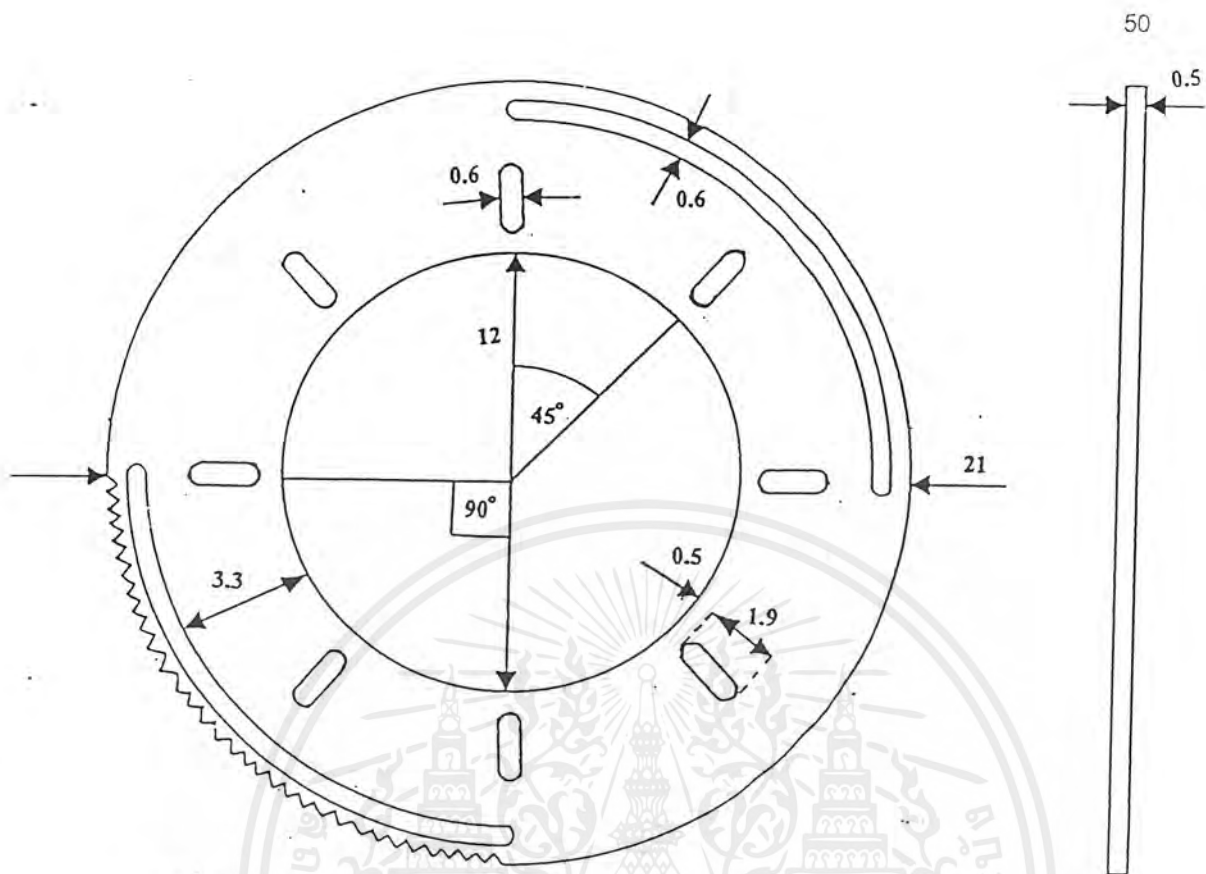
แผ่นวงแหวนที่อยู่ด้านบนจะกัดเฟืองไว้ เพื่อติดกับมอเตอร์ ขนาดของแผ่นวงแหวนด้านบนจะเท่ากับแผ่นวงแหวนด้านล่าง ในส่วนวงแหวนจะเจาะรูไว้ 8 รู เช่นเดียวกับวงแหวนด้านล่างแต่มีขนาดใหญ่กว่า

ในส่วนของใบเปิด-ปิด จะทำด้วยแผ่นทองแดงชนิดบางจำนวน 8 แผ่น ลักษณะโค้งเวลาเปิด-ปิด จะสานกันทำให้ควบคุมความกว้างช่องเปิดของประตูลมได้

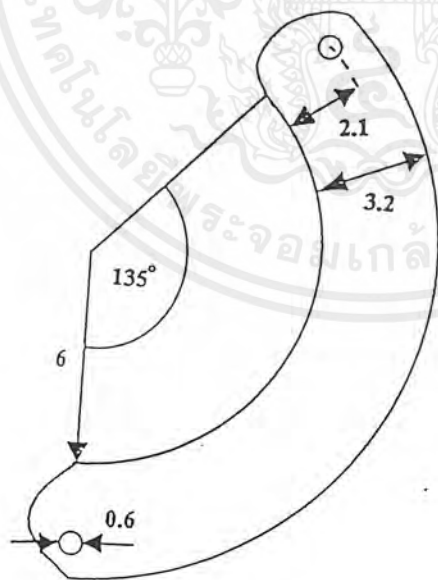


รูปที่ 5.3 แผ่นวงแหวนโลหะส่วนล่าง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

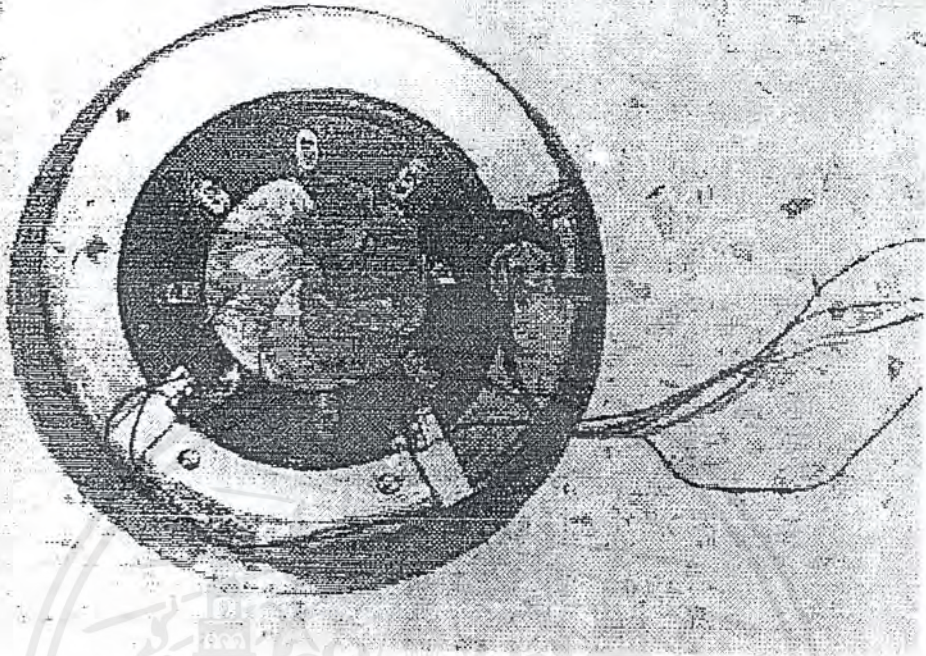


รูปที่ 5.4 แผ่นวงแหวนโลหะส่วนบน (หน่วยเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 5.5 ไขเปิด-ปิด ทำจากแผ่นทองแดง (หน่วยเป็นเซนติเมตร)

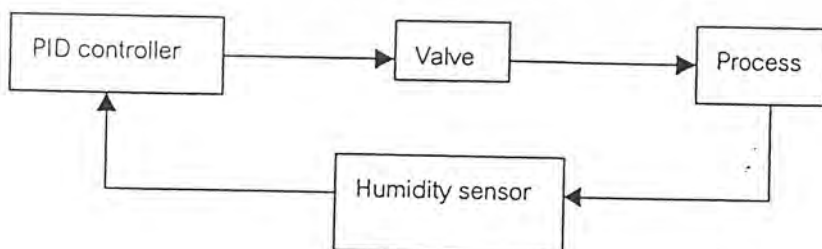
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 รูปประตูลมที่ประกอบจริง

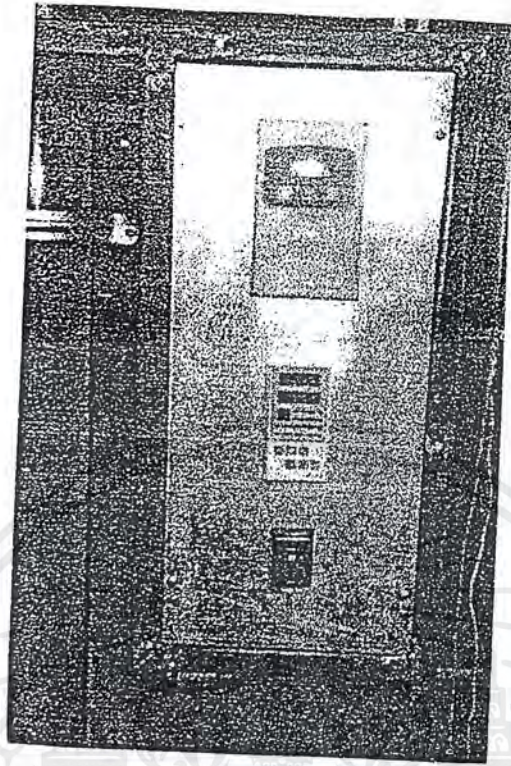
5.4 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดและสัญญาณควบคุม

การจัดโครงสร้างของระบบควบคุมหรือวงของการควบคุม (Control Loop) ที่ใช้ในการควบคุมความชื้นนี้แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงวงของการควบคุม (Control Loop)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 รูปเครื่องควบคุมโปรแกรมการทำงาน และลักษณะการติดตั้ง

5.5 กำหนดคุณสมบัติของเครื่องควบคุม

เครื่องควบคุมที่ใช้ในการควบคุมความชื้น เป็นเครื่องควบคุมที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ทั้งแบบพีไอดี (PID) และแบบ เปิด-ปิด (on-off) โดยเครื่องควบคุมนี้จะทำงานโดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้กับค่าที่ตั้งไว้ (set point) โดยสามารถตั้งค่าได้ตั้งแต่ 0-100% เมื่อสัญญาณที่วัดได้มีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมออกมาเพื่อให้มอเตอร์หมุนในทิศทางที่เปิดหรือปิดประตูลม

5.6 หลักการทำงานของระบบควบคุมความชื้นของลมร้อนของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดและการทำงานของเครื่องอบแห้ง

1. แฉงรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะเก็บสะสมพลังงานความร้อนจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาทิตย์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ไหลผ่าน

2. เครื่องเป่าลมร้อน จะดูดลมให้ไหลผ่านเข้ามายังแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ลมที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิสูงขึ้น กลายเป็นลมร้อน

3. ลมร้อนจะถูกเป่าเข้าสู่คอลลิมน์ฟลูอิดไดซ์เบดที่บรรจุวัสดุที่ต้องการอบอยู่ ทำให้วัสดุเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ซึ่งพื้นที่ผิวของวัสดุในการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว

4. วัสดุที่สูญเสียความชื้นจะมีน้ำหนักต่อปริมาตร (น้ำหนักต่อพื้นที่ผิว) ลดลง จึงหลุดลอยออกจากคอลลิมน์ไปยังไซโคลนได้ก่อนวัสดุที่มีความชื้นมากกว่า จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถแยกวัสดุที่มีความชื้นน้อยออกจากวัสดุที่มีความชื้นมากได้โดยอัตโนมัติ

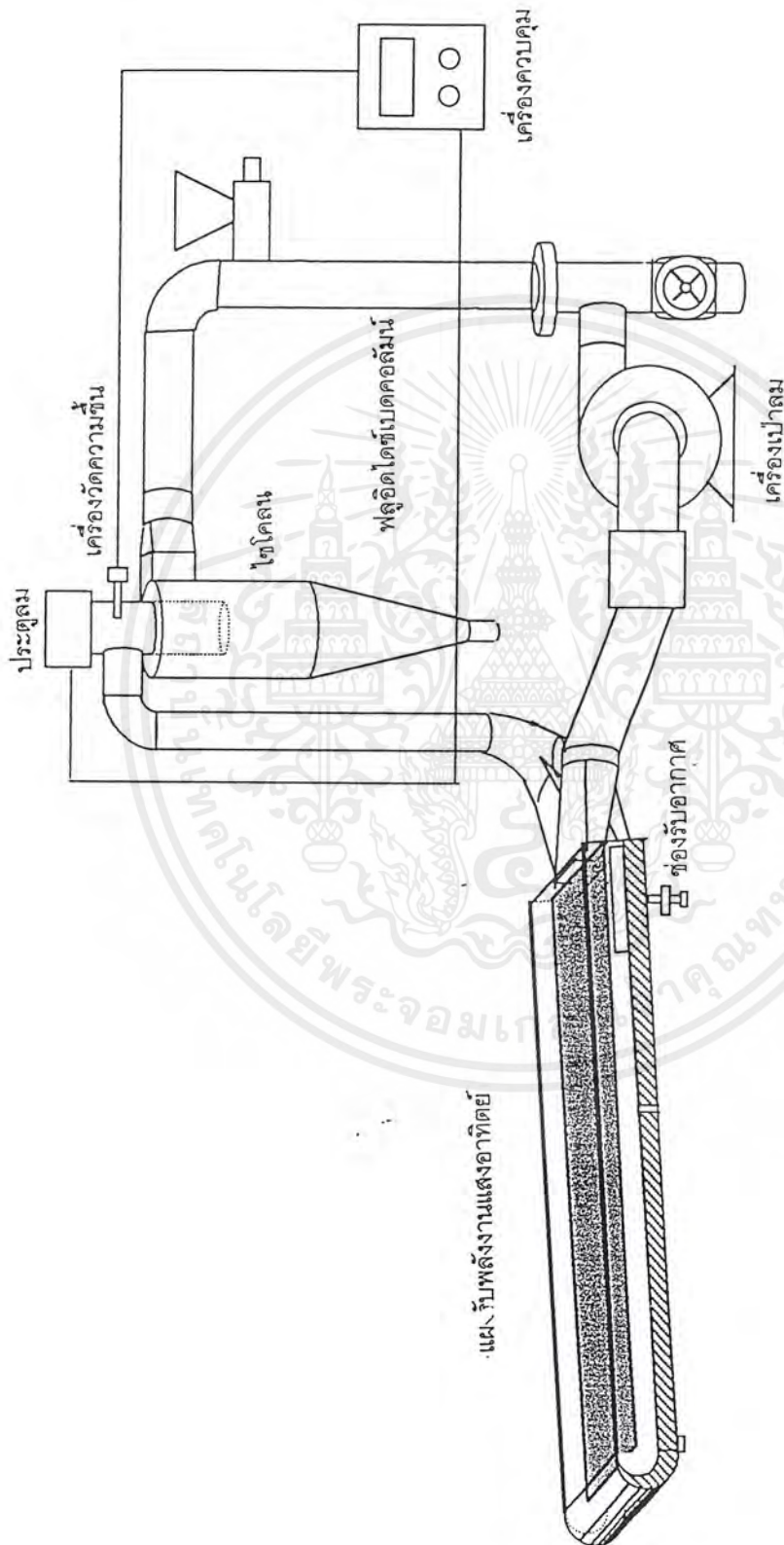
5. เมื่อวัสดุถูกพัดเข้าสู่ไซโคลน ไซโคลนจะทำหน้าที่แยกวัสดุกับลมร้อนที่ผ่านการอบแห้งแล้ว

6. ลมร้อนที่ผ่านการอบแห้งแล้วยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ แต่มีความชื้นเพิ่มขึ้น สามารถนำลมร้อนบางส่วนที่ใช้แล้วผ่านเข้าสู่แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผสมกับอากาศใหม่เป็นการประหยัดพลังงานความร้อนได้ส่วนหนึ่ง แล้วนำมาใช้อบแห้งวัสดุได้ต่อไป การที่ไม่นำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมดเพื่อป้องกันมิให้เกิดความชื้นอิมิดวในลมร้อน

7. ในการหมุนเวียนลมร้อนกลับมาใช้ในระบบใหม่นั้นต้องทำการควบคุมความชื้น ด้วยระบบควบคุมความชื้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นที่บริเวณด้านบนของไซโคลนซึ่งเป็นทางออกของลมร้อนก่อนถึงท่อที่นำลมร้อนกลับมาหมุนเวียนและทางระบายออก ถ้าลมร้อนยังมีความชื้นต่ำอยู่ เครื่องควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์เปิดประตูลมเพื่อนำลมร้อนนั้นหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ เป็นปริมาณที่มากกว่าลมร้อนที่ปล่อยทิ้ง

8. เมื่อลมร้อนมีความชื้นสูง เครื่องควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์เปิดประตูลมให้กว้างขึ้น เพื่อระบายลมร้อนที่มีความชื้นสูงออกไปมากกว่าลมร้อนที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ จะผสมลมร้อนที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่กับอากาศภายนอกเพื่อทำให้ความชื้นต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ภาพเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยติดตั้งระบบควบคุมความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลอง

- 6.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์
- 6.1.1) จัดอุปกรณ์การทดลอง
 - 6.1.2) วัดความชื้นของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ อุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง
 - 6.1.3) ปรับความถี่ของเครื่องควบคุมเครื่องเป่าลมให้อยู่ที่ 30 Hz ปล่อยให้อุณหภูมิคงที่
 - 6.1.4) ทำการวัดอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด อุปกรณ์วัด (sensor) และ อุณหภูมิของลม (จากเครื่องมือวัดที่ทางเข้าหอพลูอิดไดซ์)
 - 6.1.5) เปลี่ยนความเร็วรอบไปเป็น 35,40,45,50 Hz ตามลำดับ แล้วทำซ้ำข้อ 6.1.4)
 - 6.1.6) เปลี่ยนอุณหภูมิตามที่กำหนด (38, 42, 46, 50 องศาเซลเซียส) ทำซ้ำข้อ 6.1.3) ถึง 6.1.5)
 - 6.1.7) ขณะทำการลดอุณหภูมิ เปลี่ยนความเร็วลมไปที่ 30 Hz
 - 6.1.8) เมื่ออุณหภูมิลดถึง 50 องศาเซลเซียส ทำการวัดความเร็วลม
 - 6.1.9) เปลี่ยนความเร็วรอบไปเป็น 35,40,45,50 Hz ตามลำดับ แล้วบันทึกค่าความเร็วม
 - 6.1.10) ทำซ้ำข้อ 6.1.7) ถึง 6.1.9) ที่อุณหภูมิ 38, 42, 46, 50 องศาเซลเซียส
 - 6.1.11) วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้งอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของลมร้อนที่หมุนเวียนกลับมาใช้ในระบบ

6.2.1) จัดอุปกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด เปิดช่องประตูลมที่ 100% (พื้นที่ช่องเปิด 9.5×10^{-3} ตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร) วางเครื่องให้ความร้อน (ในการทดลองใช้หลอดให้ความร้อน Infrapara heater AW-1 220 V 1000 W x 2) 4 ดวงเหนือแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ให้สูง 1 เมตร เปิดสวิตช์ ให้ความร้อนรอจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่โดยอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ไม่เปลี่ยนแปลง เป็นเวลา 5 นาที

6.2.2) บันทึก อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมเหนือช่องเปิดประตูลม ความเร็วลมในท่อที่นำลมร้อนกลับสู่แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิบนกระจกของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์

- 6.2.3) ทำเช่นเดียวกับ 6.3.1) และ 6.3.2) แต่เปลี่ยนพื้นที่ช่องเปิดประตูลมเป็นที่
- พื้นที่เปิดของประตูลม 75% (9.5 เซนติเมตร)
 - พื้นที่เปิดของประตูลม 50% (7.7 เซนติเมตร)
 - พื้นที่เปิดของประตูลม 25% (5.5 เซนติเมตร)
 - พื้นที่เปิดของประตูลม 0% (1 เซนติเมตร)

6.3 การทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

6.3.1) เปิดประตูลมให้อยู่ในตำแหน่งเปิดสุด (พื้นที่เปิดของประตูลม 100%)

6.3.2) จัดอุปกรณ์เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด วางเครื่องให้ความร้อนเหนือแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ เปิดเครื่องให้ความร้อนและเครื่องเป่าลมปรับความถี่ของมอเตอร์ไปที่ 50 Hz รอจนอุณหภูมิและความชื้นไม่เปลี่ยนแปลง บันทึกค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของระบบได้

6.3.3) ใส่เมล็ดข้าวโพด 200 กรัม เข้าสู่หอฟลูอิดไดซ์ แล้วเปิดเครื่องอบแห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.4) บันทึกค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ทุก ๆ นาที

6.3.5) เมื่อครบ 15 นาที นำเมล็ดข้าวโพดออกจากหอฟลูอิดไดซ์มาชั่ง บันทึกน้ำหนัก

หลังอบ

6.3.6) เปิดประตูลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด

- พื้นที่เปิดของประตูลม 75% (9.5 เซนติเมตร)
- พื้นที่เปิดของประตูลม 50% (7.7 เซนติเมตร)
- พื้นที่เปิดของประตูลม 25% (5.5 เซนติเมตร)
- พื้นที่เปิดของประตูลม 0% (1 เซนติเมตร)

ตามลำดับ ทำตามข้อ 6.3.1) ถึง 6.3.4) อีกครั้ง

6.3.7) บันทึกค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก และกระเปาะแห้งระหว่างการทดลอง

บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 การทดลองที่ 1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 7.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นของชุดการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความเร็วลมต่าง ๆ (m/s)				
	9.2	10.9	12.6	14.4	15.8
33.3	61.8	61.5	59.3	56.0	53.9
38.0	49.5	49.4	47.1	45.0	43.3
42.0	39.4	38.9	38.3	37.5	36.3
46.0	32.4	32.6	32.5	31.4	30.4
50.0	28.6	28.3	27.7	27.2	26.8

ตารางที่ 7.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นของชุดการทดลองที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความเร็วลมต่าง ๆ (m/s)				
	9.4	11.2	12.8	14.5	16.3
31.8	70.3	68.1	65.8	63.1	60.7
38.0	47.7	46.1	44.7	43.1	41.6
42.0	36.5	35.6	34.7	33.8	33.0
46.0	29.2	28.4	27.5	26.5	25.9
50.0	25.1	24.8	24.3	23.9	23.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.3 ผลการทดลองทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และ ความชื้นของชุดการทดลองที่ 3

อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความเร็วลมต่างๆ(m/s)				
	10.2	12.1	14	15.7	17.5
34.1	56.5	55.0	54.3	53.4	51.8
38.0	48.0	46.2	44.4	42.3	40.5
42.0	39.7	39.2	37.9	36.5	35.2
46.0	33.7	33.1	32.5	31.4	30.5
50.0	29.3	28.7	28.0	27.3	27.1

7.2 การทดลองที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ความเร็วลม (m/s) และ อุณหภูมิ

ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลมของชุด การทดลองที่ 1

Freq (Hz)	V (m/s) ที่อุณหภูมิ (°C)				ค่าเฉลี่ย
	38.0	42.0	46.0	50.0	
30.0	8.9	9.2	9.2	9.5	9.2
35.0	10.6	10.5	11.2	11.4	10.9
40.0	12.4	12.2	12.8	12.9	12.6
45.0	14.4	13.8	14.5	14.7	14.4
50.0	16.0	15.4	16.1	15.8	15.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลมของชุด
การทดลองที่ 2

Freq. (Hz)	V (m/s) ที่อุณหภูมิ (C)				ค่าเฉลี่ย
	38.0	42.0	46.0	50.0	
30.0	9.2	9.3	9.7	9.5	9.4
35.0	10.8	11.2	11.4	11.3	11.2
40.0	12.4	12.8	13.0	13.0	12.8
45.0	14.2	14.7	14.7	14.5	14.5
50.0	15.7	16.4	16.5	16.7	16.3

ตารางที่ 7.6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความเร็วลมของชุด
การทดลองที่ 3

Freq. (Hz)	V (m/s) ที่อุณหภูมิ (°C)				ค่าเฉลี่ย
	38.0	42.0	46.0	50.0	
30.0	10.0	10.4	10.1	10.2	10.2
35.0	11.7	12.5	12.0	12.1	12.1
40.0	13.6	14.3	14.0	14.0	14.0
45.0	15.5	15.9	15.7	15.7	15.7
50.0	17.4	17.4	17.5	17.6	17.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

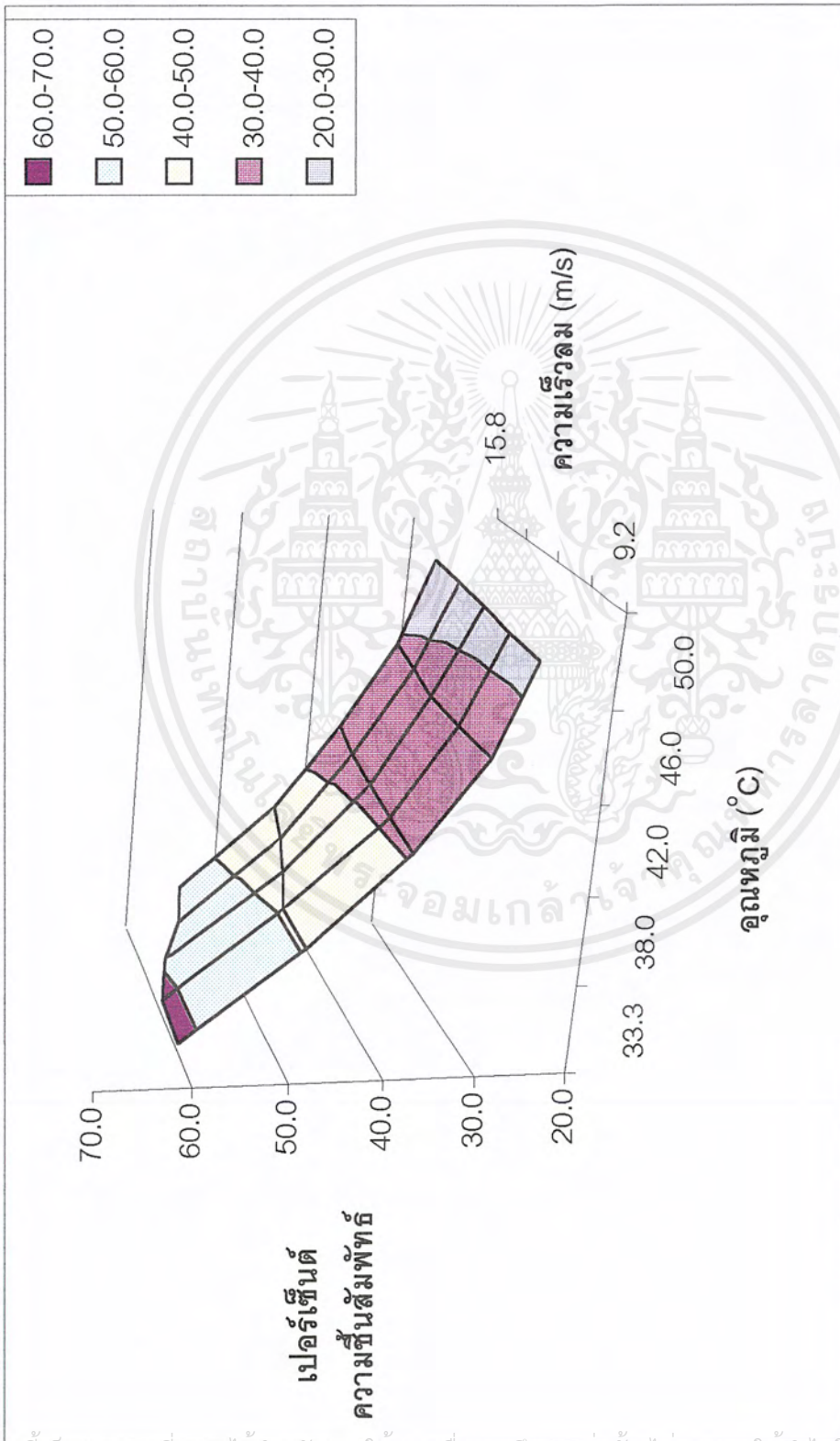
ตารางที่ 7.7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นของชุดการทดลองทั้ง 3 เซลล์

อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ที่ความเร็วลมต่าง ๆ (m/s)				
	9.6	11.4	13.1	14.9	16.5
30.0	61.8	49.5	39.4	32.4	28.6
35.0	61.5	49.4	38.9	32.6	28.3
40.0	59.3	47.1	38.3	32.5	27.7
45.0	56.0	45.0	37.5	31.4	27.2
50.0	53.9	43.3	36.3	30.4	26.8

ตารางที่ 7.8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) ความเร็วลม (m/s) และอุณหภูมิ ของชุดการทดลองทั้ง 3 เซลล์

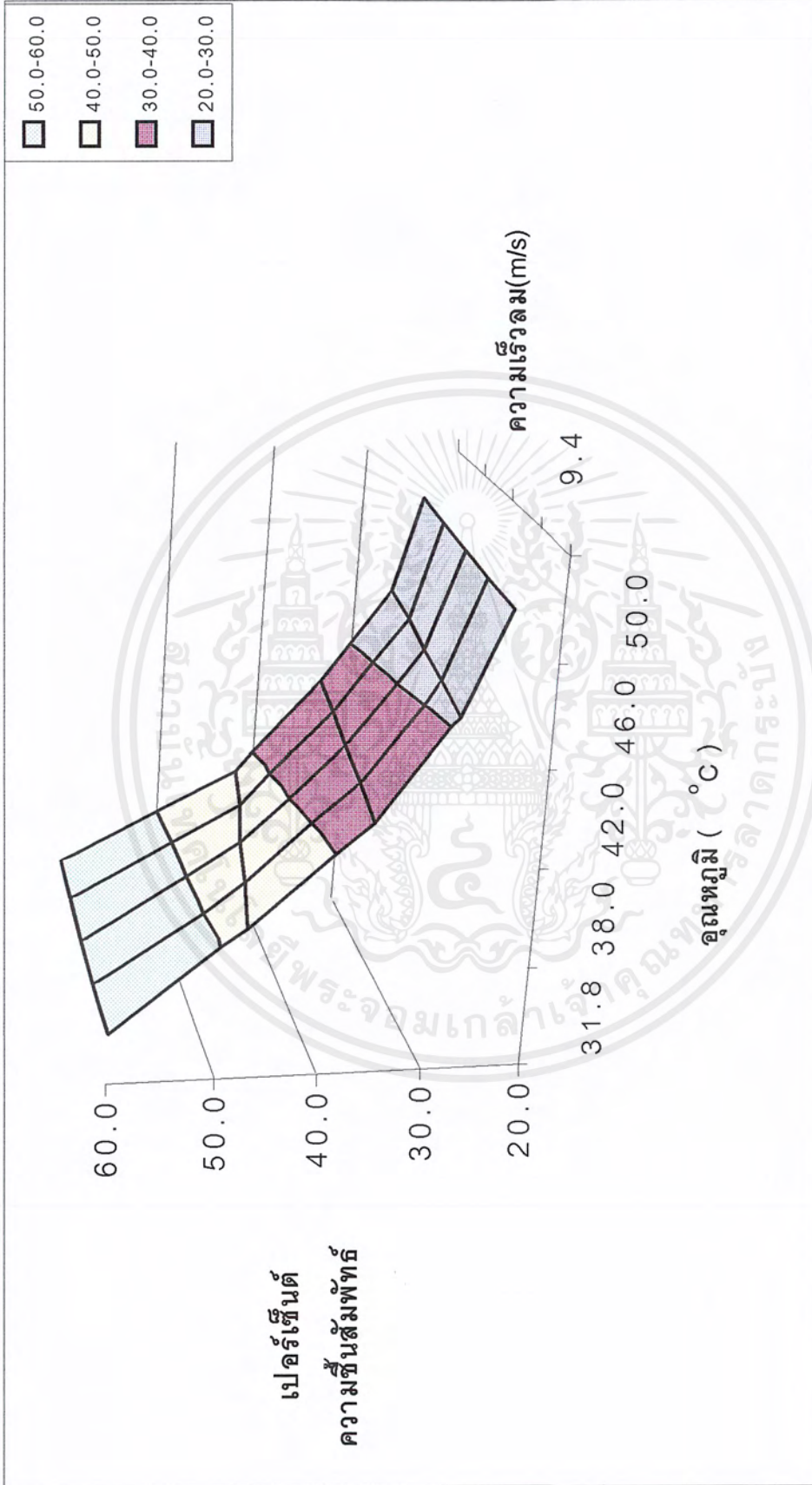
Freq. (Hz)	V (m/s) ที่อุณหภูมิ (°C)			
	38	42	46	50
30	9.4	9.6	9.7	9.7
35	11.0	11.4	11.5	11.6
40	12.8	13.1	13.3	13.3
45	14.7	14.8	15.0	15.0
50	16.4	16.4	16.7	16.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



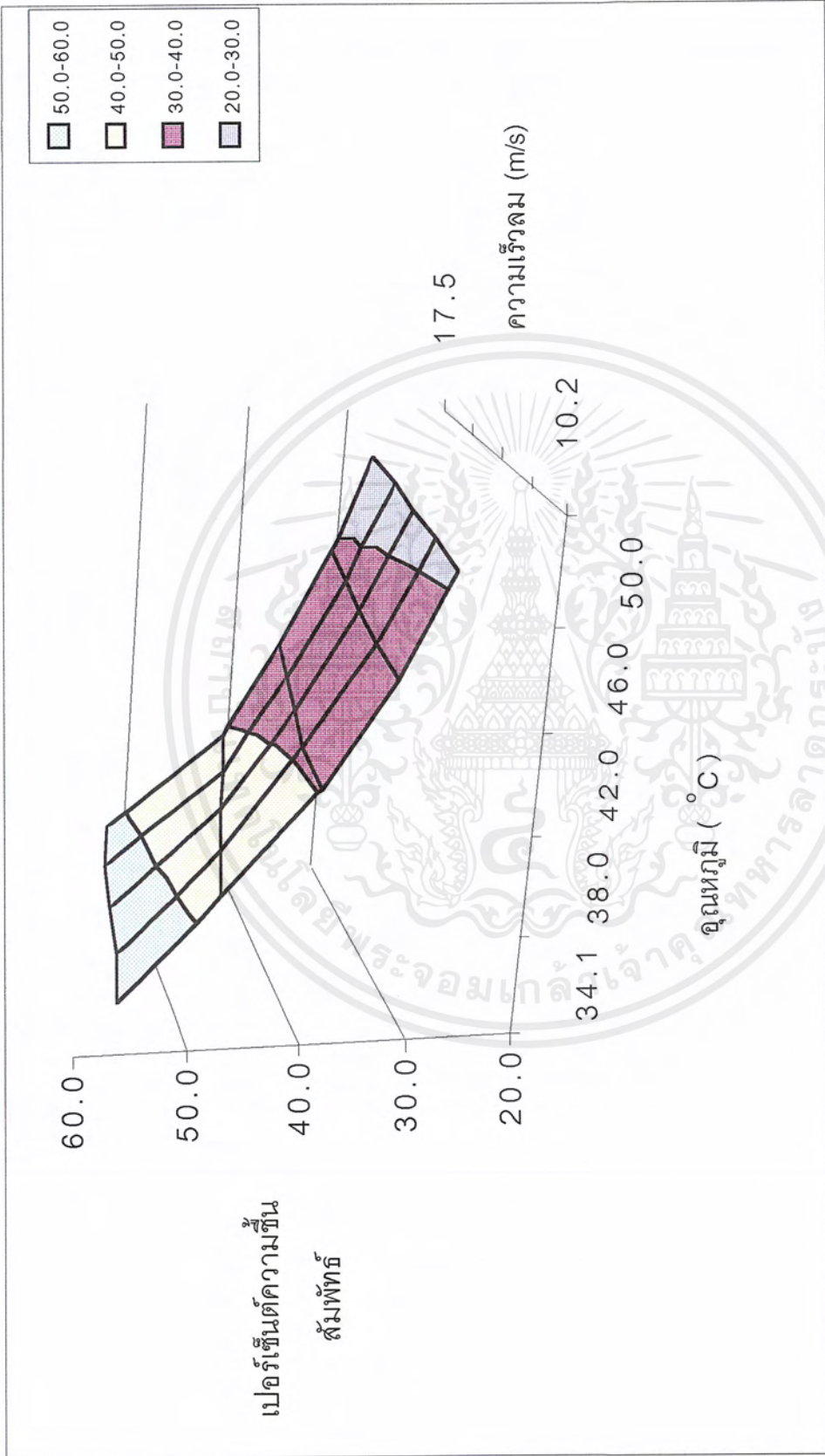
รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



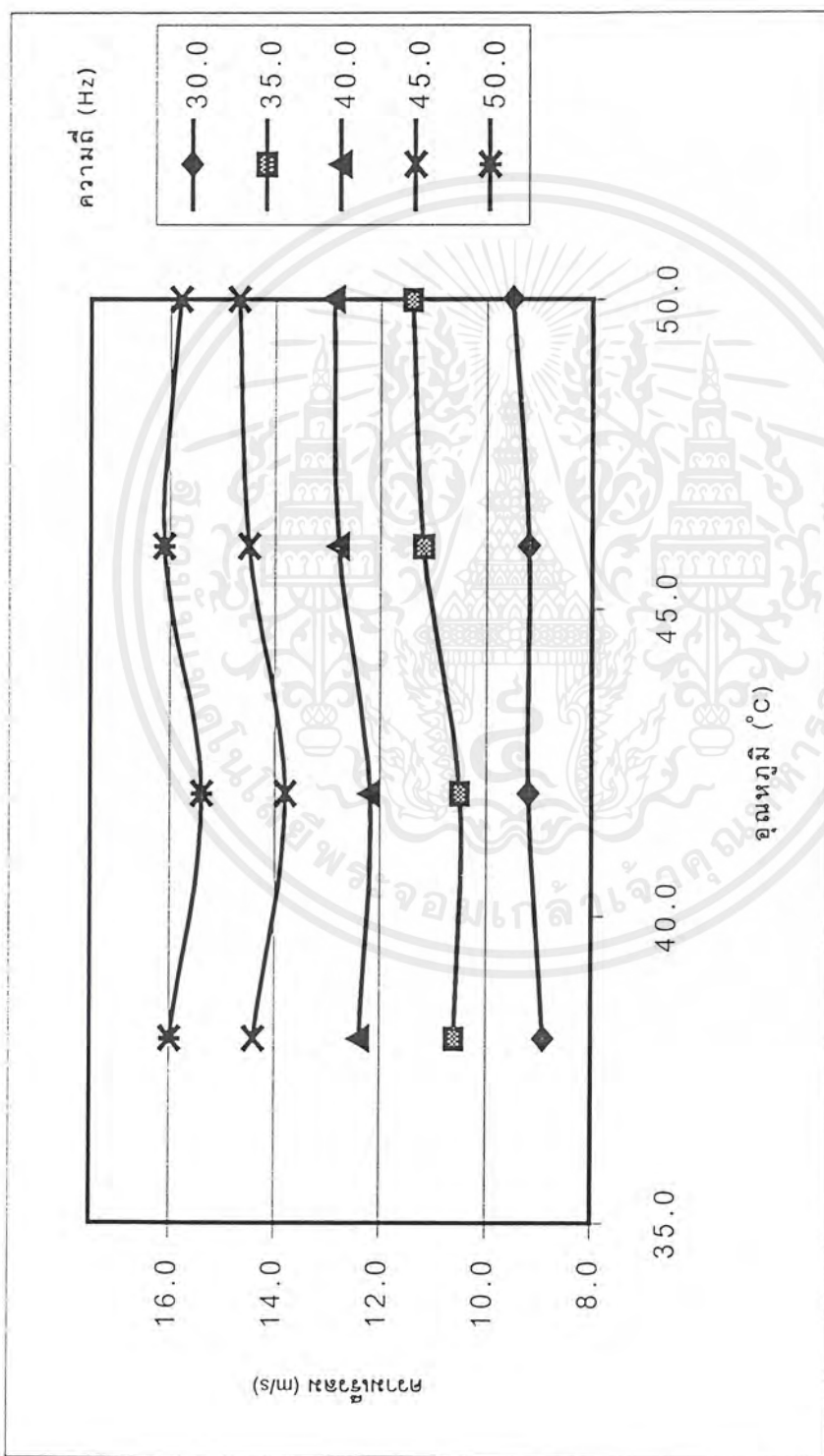
รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่สัมพันธ์กับ อุณหภูมิ และความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



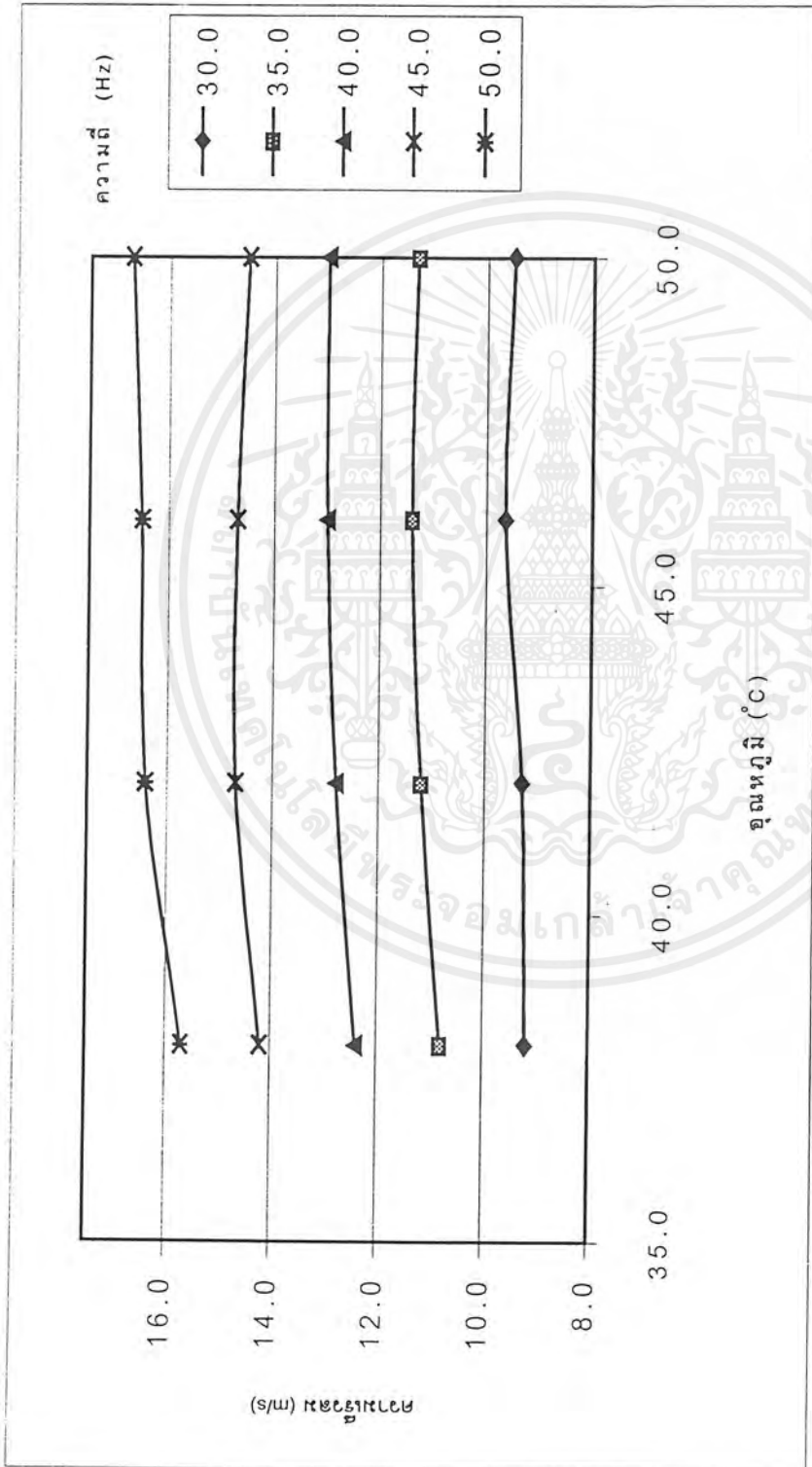
รูปที่ 7.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเร็วลม ของผลการทดลองชุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



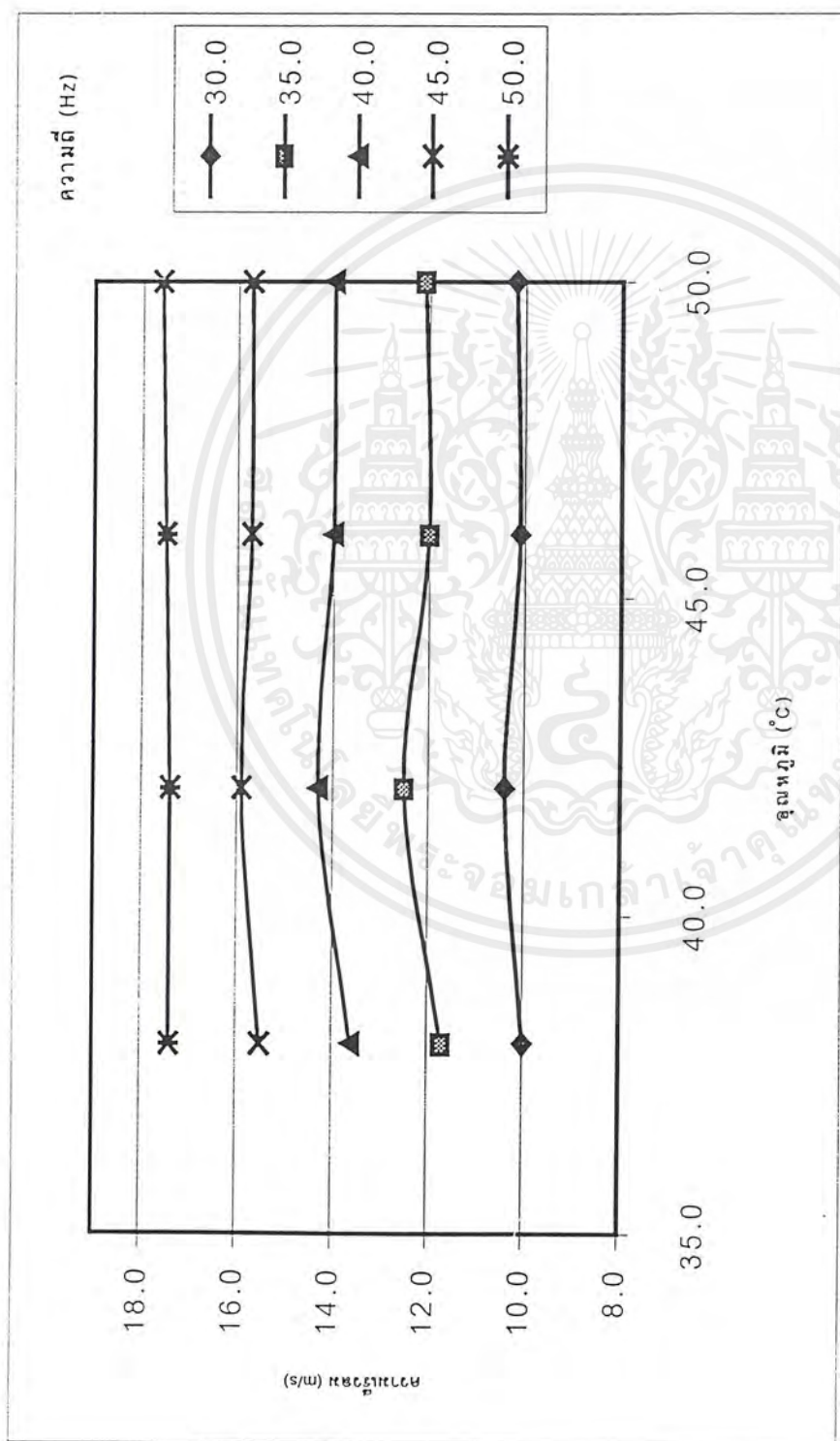
รูปที่ 7.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรวมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ต่าง ๆ ของผลการทดลองชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



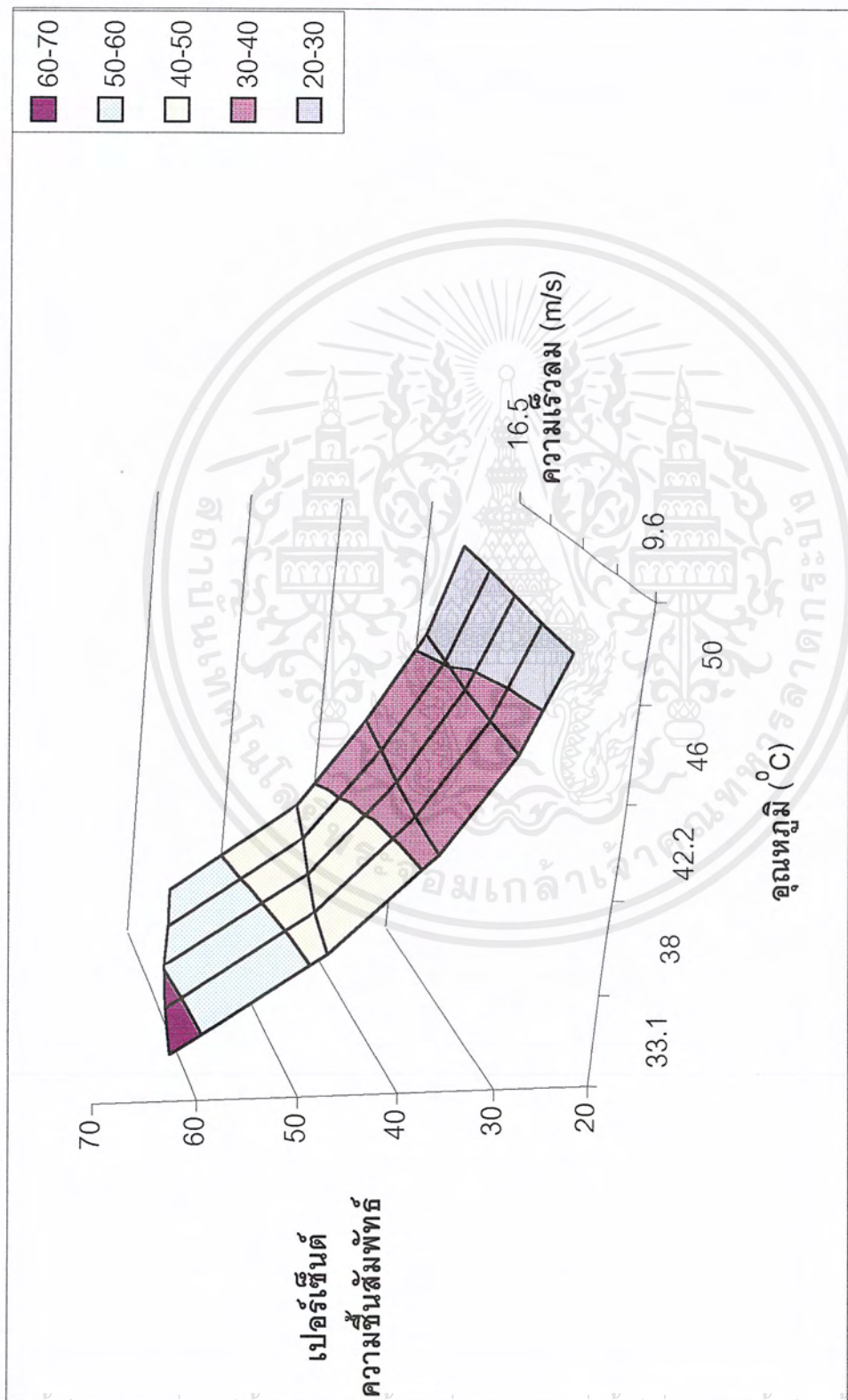
รูปที่ 7.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรวมกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ต่างๆของผลการทดลองชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



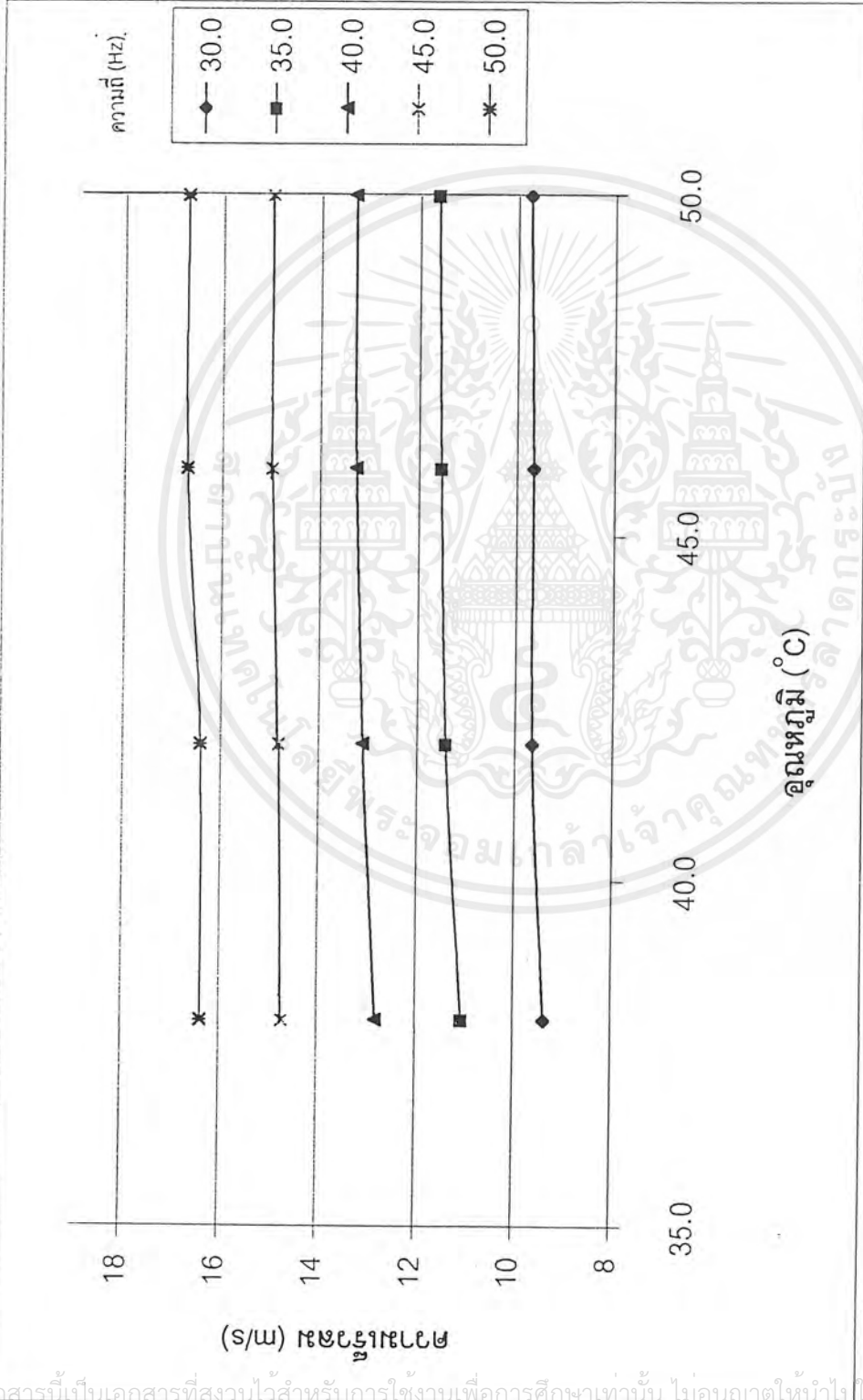
รูปที่ 7.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของผลการทดลองชุดที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.7 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่ขึ้นสัมพันธ์กับ อุณหภูมิ และความเร็วมลของผลการทดลองทั้ง 3 เติลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



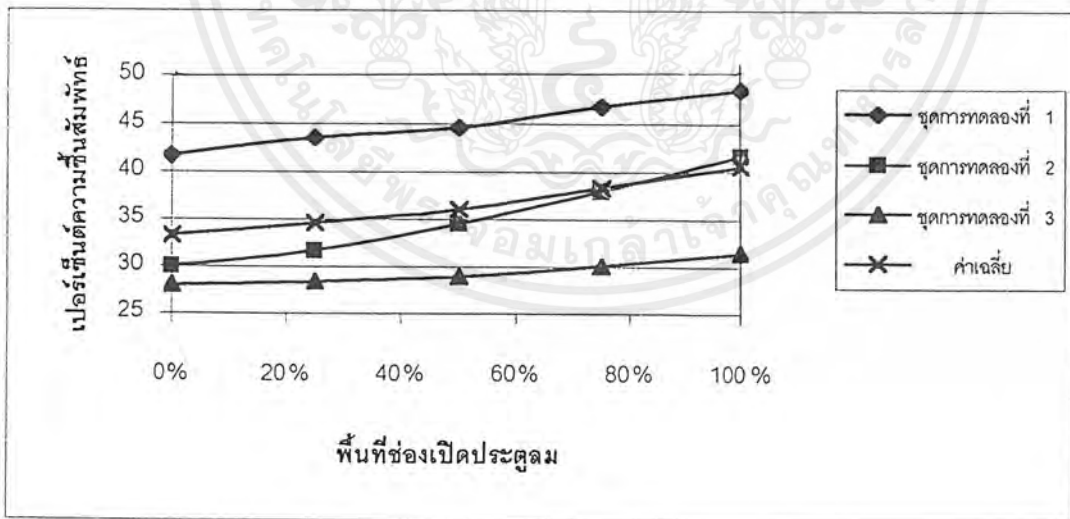
รูปที่ 7.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ที่ความถี่ต่าง ๆ ของผลการทดลองทั้ง 3 เผลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณลมร้อนที่หมุนเวียนกลับมาใช้ในระบบ

ตารางที่ 7.9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์

พื้นที่ช่องเปิดประตูลม	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			
	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3	เฉลี่ย
100%	48.6	41.8	31.5	40.6
75%	46.9	38.1	30.1	38.4
50%	44.7	34.6	28.9	36.1
25%	43.6	31.8	28.4	34.6
0%	41.8	30.1	28.0	33.3

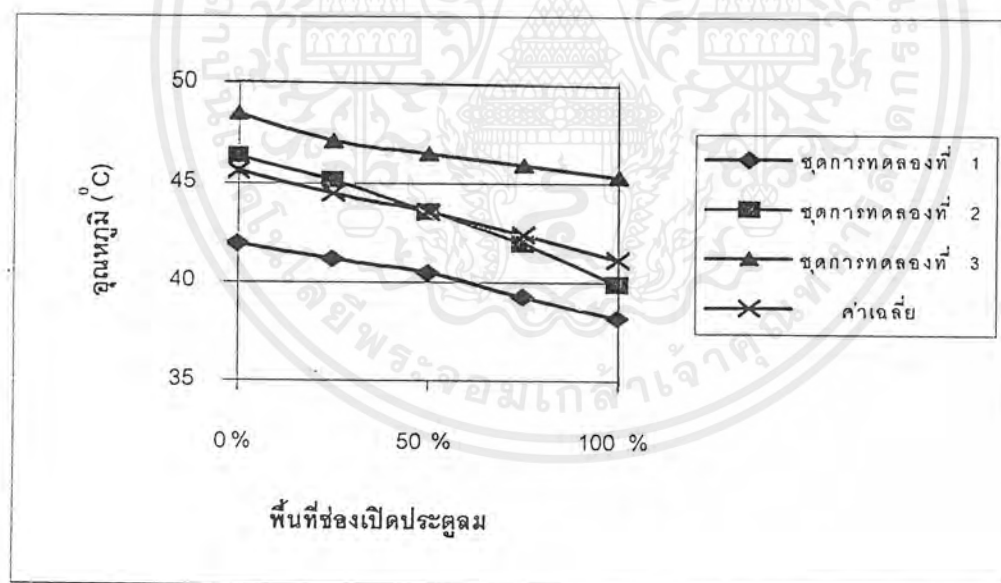


รูปที่ 7.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของชุดการทดลองทั้ง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.10 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับอุณหภูมิของลมร้อน

พื้นที่ช่องเปิด ประตูลม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	ชุดการทดลองที่ 1	39.9	45.3	เฉลี่ย
100%	38.2	42.0	45.9	41.1
75%	39.3	43.6	46.5	42.4
50%	40.5	45.2	47.1	43.5
25%	41.2	46.4	48.5	44.5
0%	42.0	46.4	48.5	45.6

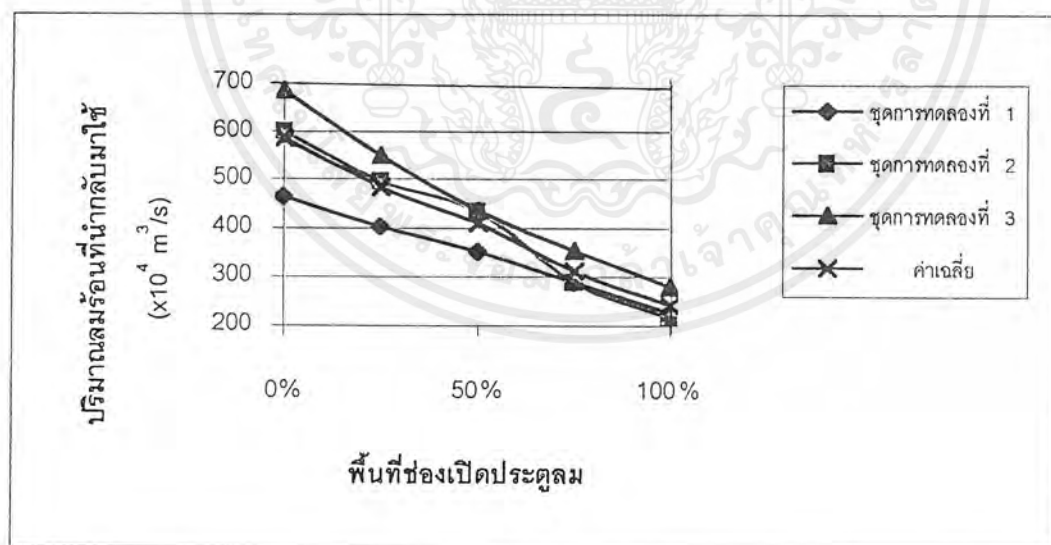


รูปที่ 7.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับอุณหภูมิของลมร้อนของชุดการทดลองทั้ง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.11 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่เปิดประตูลมกับปริมาณลมร้อนนำกลับมาใช้

พื้นที่ช่องเปิด ประตูลม	ปริมาณลมที่นำกลับมาใช้ ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$)			
	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3	เฉลี่ย
100%	228.49	218.1	280.0	242.2
75%	290.81	290.8	353.12	311.6
50%	353.12	436.21	436.21	408.5
25%	405.05	498.5	550.46	484.7
0%	467.37	602.34	685.48	585.1



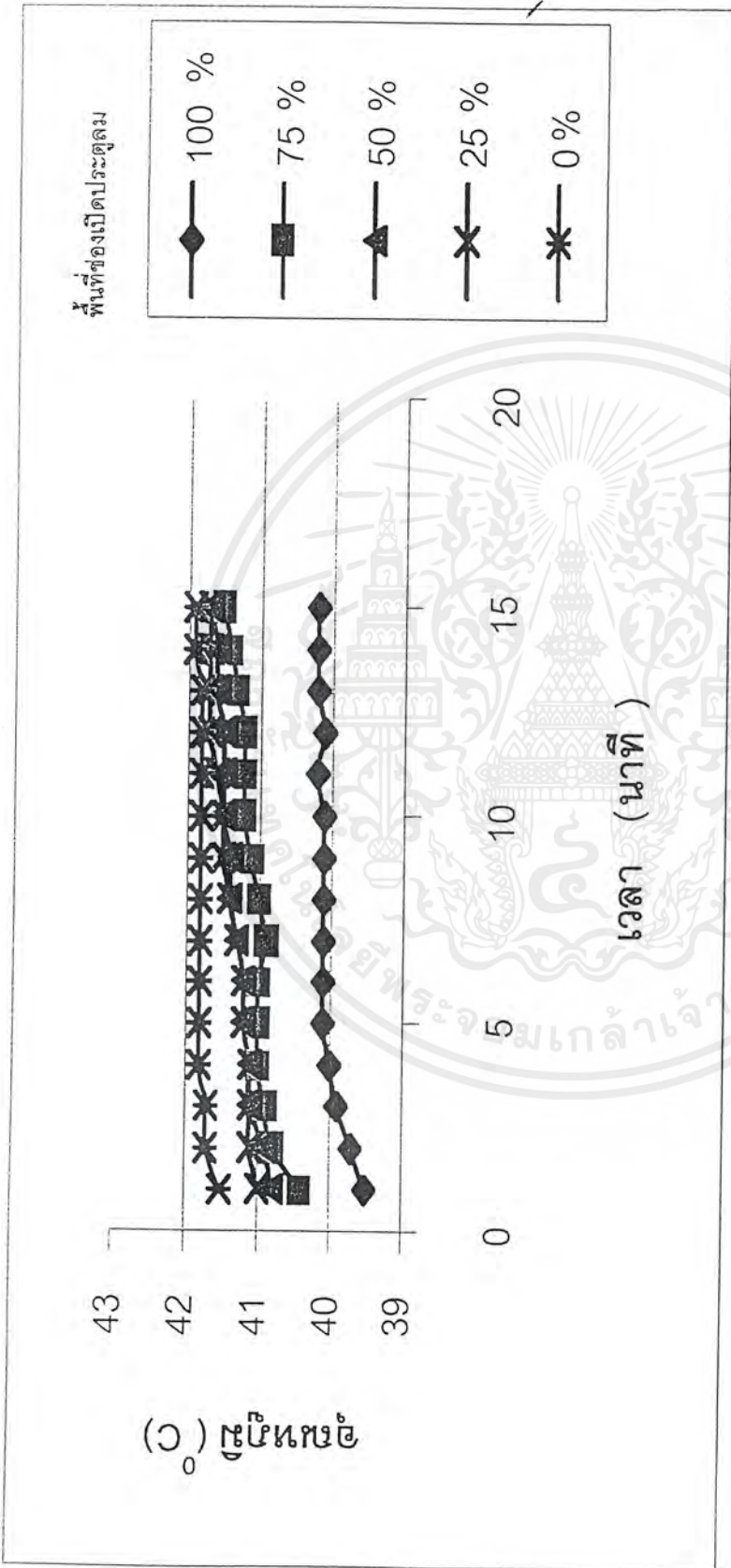
รูปที่ 7.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับปริมาณลมร้อนที่นำกลับมาใช้ของชุดการทดลองทั้ง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ตารางที่ 7.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดประจุลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1

พื้นที่ช่องเปิด	เวลา (นาที)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ประจุลม	39.5	39.7	39.9	40.0	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.2	40.1	40.2	40.2	40.2
100%	40.4	40.8	40.9	41.0	41.0	41.0	40.9	41.0	41.1	41.2	41.2	41.2	41.3	41.4	41.5
75%	40.8	40.9	41.1	41.1	41.2	41.2	41.3	41.4	41.4	41.5	41.5	41.5	41.6	41.6	41.7
50%	41.0	41.1	41.1	41.1	41.2	41.2	41.3	41.4	41.5	41.5	41.6	41.7	41.7	41.7	41.7
25%	41.5	41.7	41.7	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.9	41.9
0%															

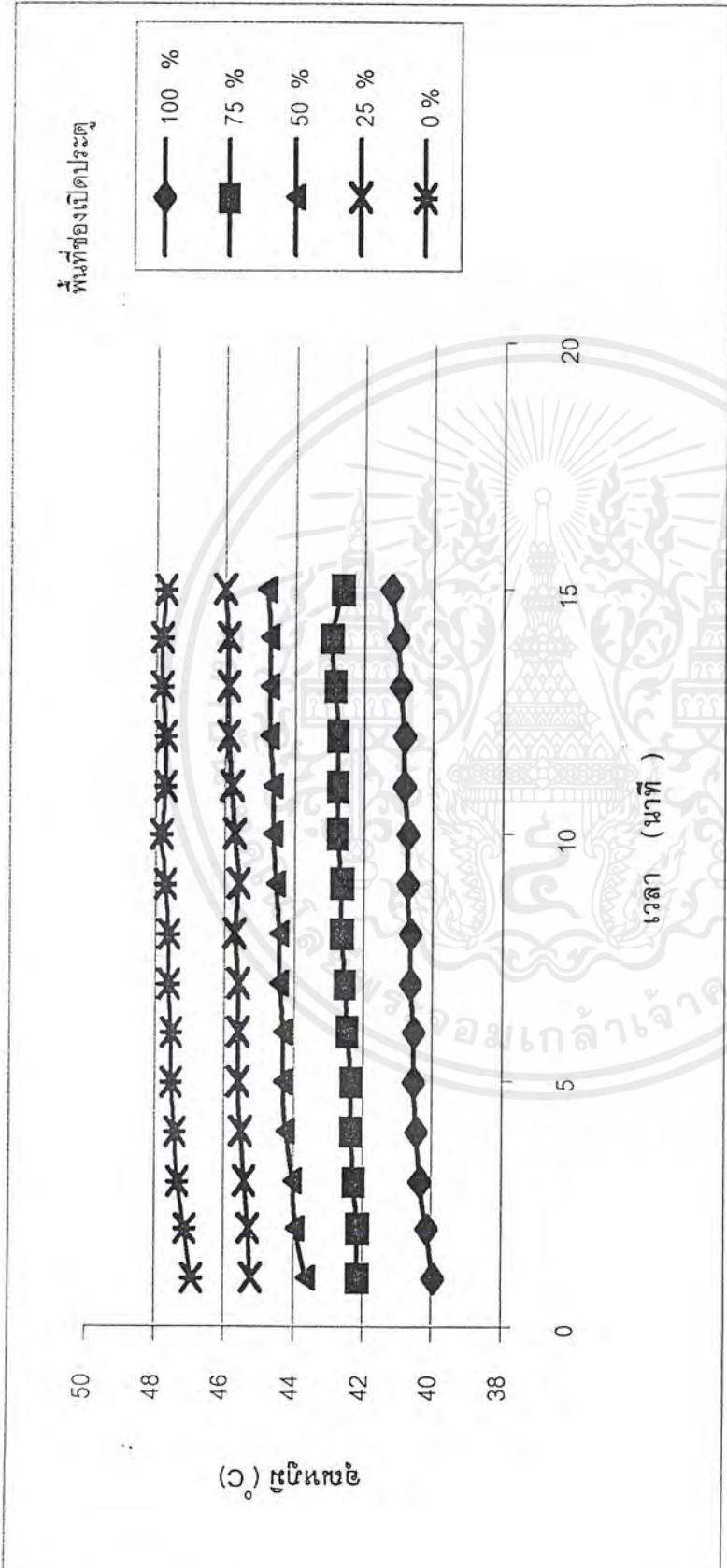


รูปที่ 7.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่พื้นที่ของเปิดประตูลดต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่พื้นที่ของเปิดประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2

พื้นที่ของเปิด	เวลา (นาที)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ	39.9	40.1	40.3	40.4	40.5	40.5	40.6	40.6	40.7	40.7	40.8	40.8	40.9	41.0	41.2
(องศาเซลเซียส)	42.1	42.1	42.2	42.3	42.3	42.4	42.5	42.6	42.6	42.7	42.7	42.7	42.8	42.9	42.6
	43.6	43.9	44.0	44.2	44.3	44.3	44.4	44.4	44.5	44.6	44.6	44.7	44.7	44.7	44.8
	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.6	45.6	45.7	45.6	45.7	45.8	45.9	45.9	45.9	46.0
	46.9	47.1	47.3	47.4	47.5	47.5	47.6	47.6	47.7	47.8	47.7	47.7	47.8	47.8	47.7

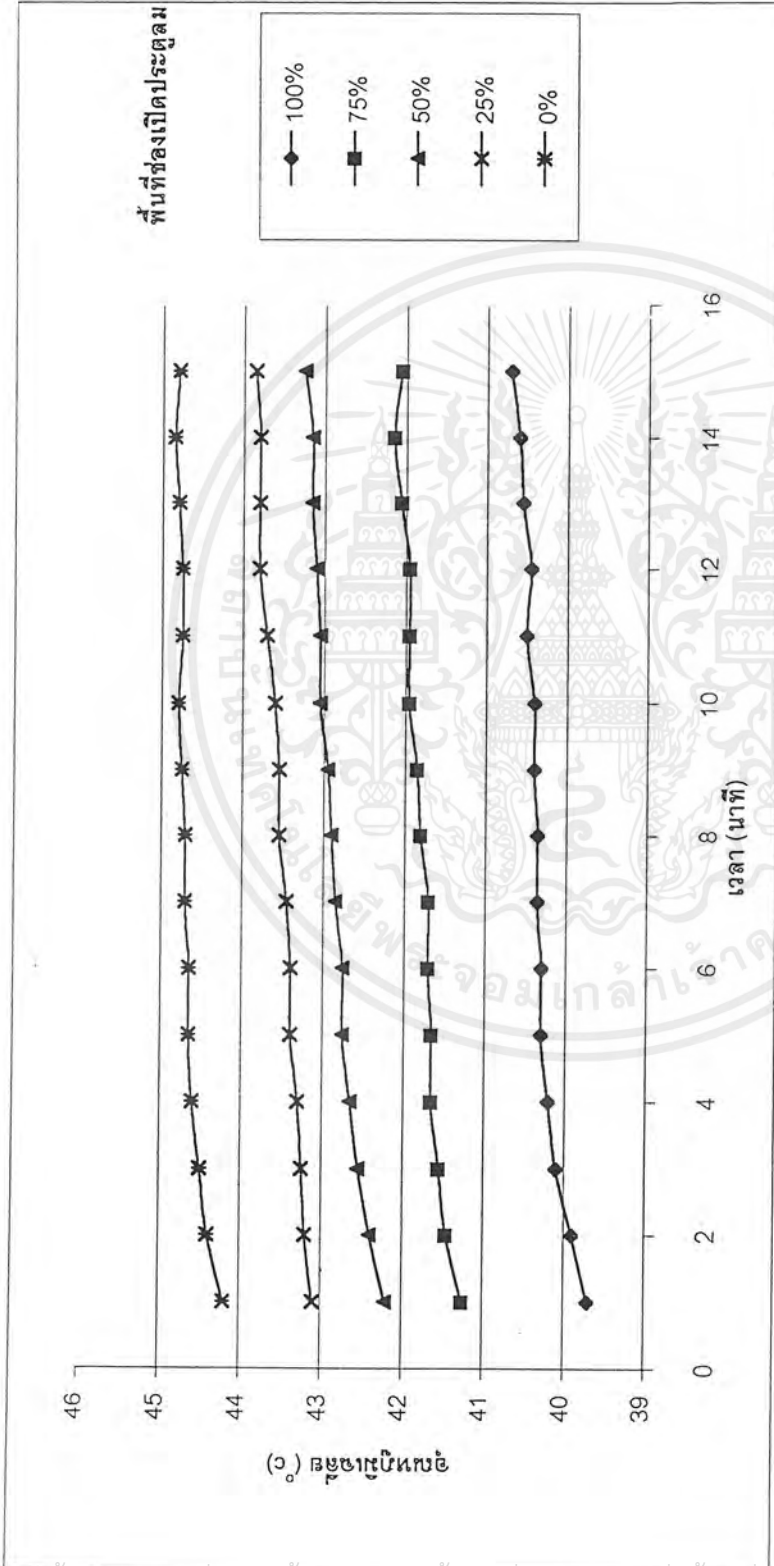


รูปที่ 7.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตูลดมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.14 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตูลมต่าง ๆ กัน

พื้นที่ของเปิด	เวลา (นาที)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ประตูลม																
อุณหภูมิเฉลี่ย	38.80	39.70	39.90	40.10	40.20	40.30	40.30	40.35	40.35	40.40	40.40	40.50	40.45	40.55	40.6	40.70
(องศาเซลเซียส)	40.40	41.25	41.45	41.55	41.65	41.70	41.70	41.70	41.80	41.85	41.95	41.95	41.95	42.05	42.15	42.05
	41.40	42.20	42.40	42.55	42.65	42.75	42.75	42.85	42.90	42.95	43.05	43.05	43.10	43.15	43.15	43.25
	42.30	43.10	43.20	43.25	43.30	43.40	43.40	43.45	43.55	43.55	43.60	43.70	43.80	43.80	43.8	43.85
	43.15	44.20	44.40	44.50	44.60	44.65	44.65	44.70	44.70	44.75	44.80	44.75	44.75	44.80	44.85	44.80

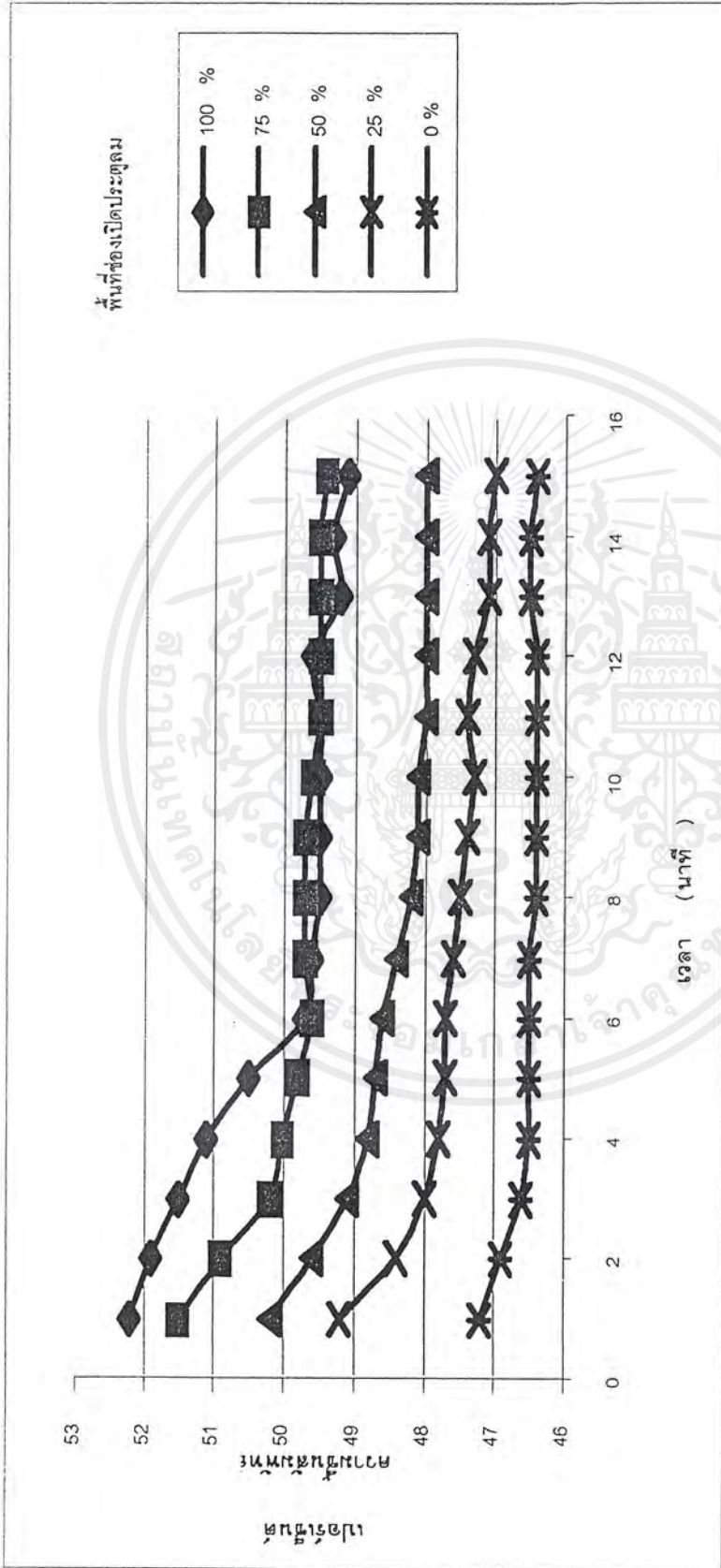


รูปที่ 7.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยกับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลมต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.15 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดของประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1

พื้นที่ช่องเปิด	เวลา (นาที)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ประตูลม																
100%	52.2	51.9	51.5	51.1	50.5	49.7	49.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.6	49.2	49.3	49.1	
75%	51.5	50.9	50.2	50	49.8	49.6	49.7	49.7	49.7	49.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.4	
50%	50.2	49.6	49.1	48.8	48.7	48.6	48.4	48.2	48.1	48.1	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	
25%	49.2	48.4	48.0	47.8	47.7	47.7	47.6	47.5	47.4	47.3	47.4	47.3	47.1	47.1	47.0	
0%	47.2	46.9	46.6	46.5	46.5	46.5	46.5	46.4	46.4	46.4	46.4	46.4	46.5	46.5	46.4	



รูปที่ 7.15 กราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ของสัญญาณกับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดของประตูลมต่างๆ กันของการทดลองที่ 1

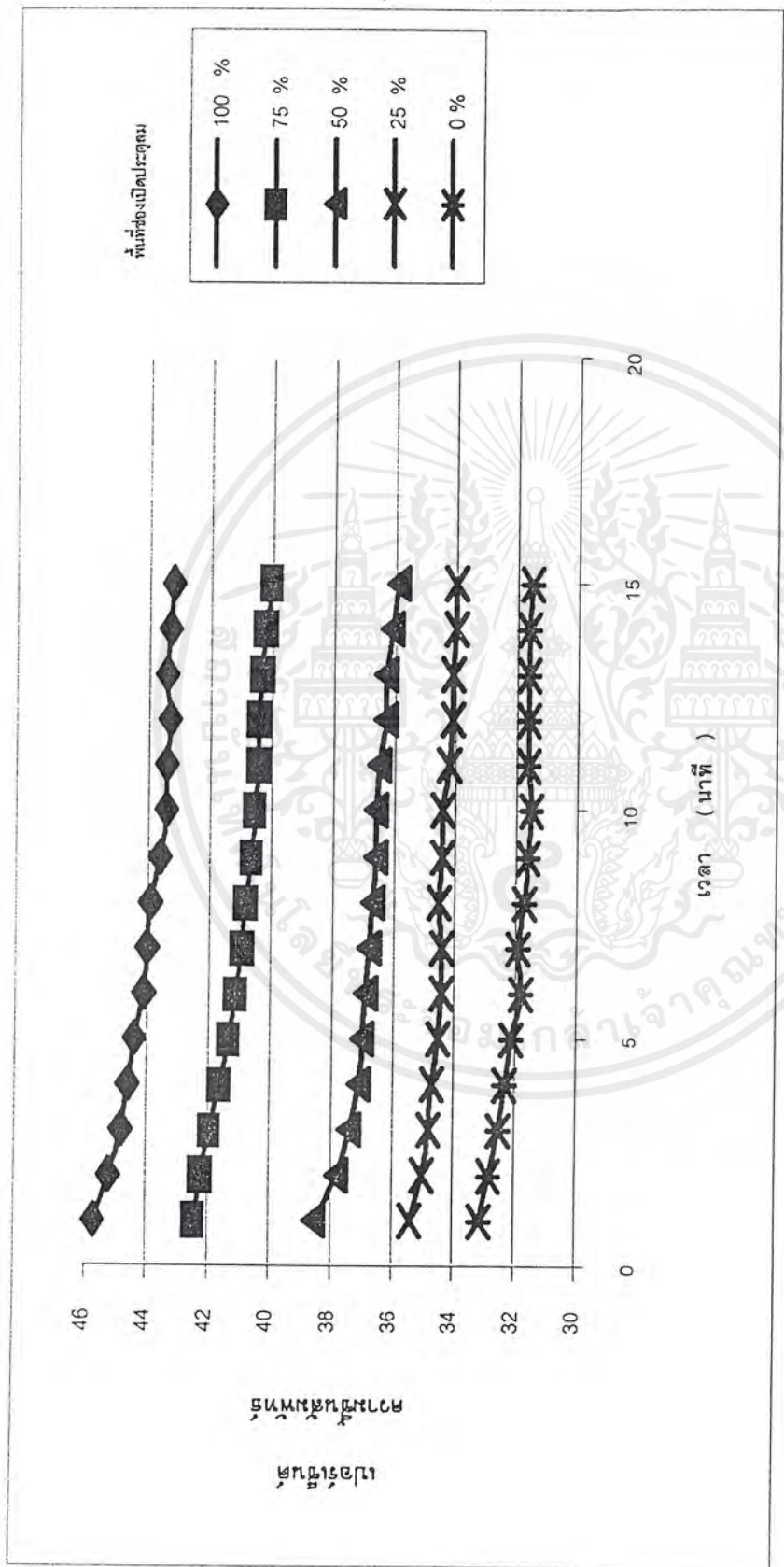
ทดลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.16 ผลการทดลองความเต็มพื้นที่ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับเวลาที่พื้นที่ของเปิดของประตูลมต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2

พื้นที่ของเปิด	เวลา (นาที)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ประตูลม																
เปอร์เซ็นต์	45.7	45.2	44.8	44.6	44.4	44.1	44	43.9	43.6	43.4	43.4	43.3	43.4	43.3	43.2	
ความชื้น	42.4	42.2	41.9	41.6	41.3	41.1	40.9	40.8	40.6	40.5	40.4	40.4	40.3	40.2	40.0	
สัมพัทธ์	38.5	37.8	37.4	37.1	37.0	36.9	36.8	36.7	36.6	36.6	36.5	36.3	36.3	36.1	35.9	
	35.4	35	34.8	34.7	34.5	34.4	34.4	34.5	34.4	34.4	34.2	34.1	34.1	34.0	34.0	
	33.1	32.8	32.5	32.3	32.1	31.8	31.9	31.7	31.6	31.5	31.6	31.6	31.6	31.6	31.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



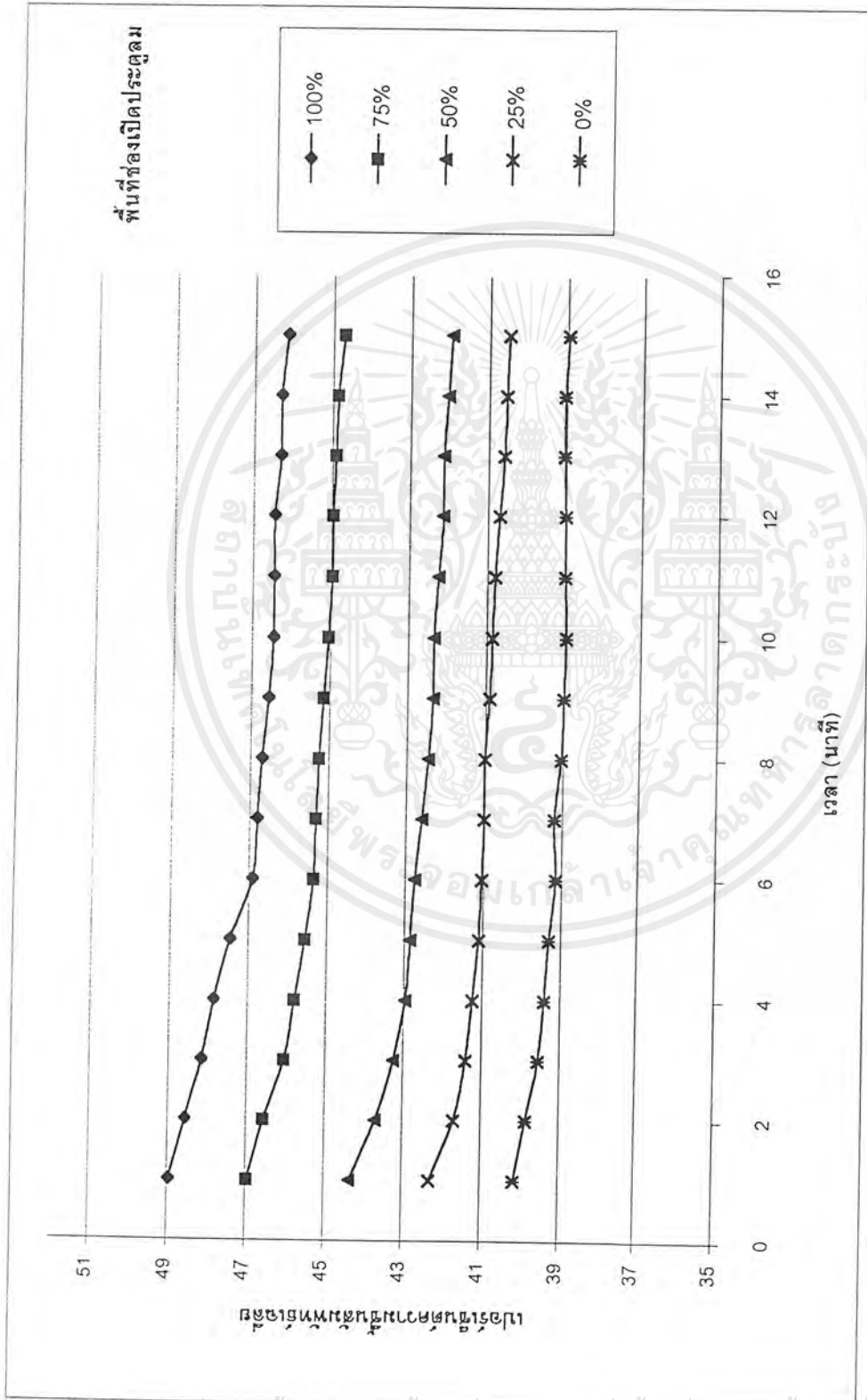
รูปที่ 7.16 กราฟความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ของเปอร์เซ็นต์ความถี่ที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับเวลาที่พื้นที่ของเปิดของประตูต่าง ๆ กันของเหตุการณ์
ทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.17 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของลมร้อนกับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตูลมต่าง ๆ กัน

		เวลา (นาที)															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	ประตูลมเปิด 100%	48.30	48.95	48.55	48.15	47.85	47.45	46.90	46.80	46.70	46.55	46.45	46.45	46.45	46.30	46.30	46.15
	75%	47.10	46.95	46.55	46.05	45.80	45.55	45.35	45.30	45.25	45.15	45.05	44.95	44.95	44.90	44.85	44.70
	50%	44.65	44.35	43.70	43.25	42.95	42.85	42.75	42.60	42.45	42.35	42.35	42.25	42.15	42.15	42.05	41.95
	25%	41.90	42.30	41.70	41.40	41.25	41.10	41.05	41.00	41.00	40.90	40.85	40.80	40.70	40.60	40.55	40.50
	0%	38.45	40.15	39.85	39.55	39.40	39.30	39.15	39.20	39.05	39.00	38.95	39.00	39.00	39.05	39.05	38.95



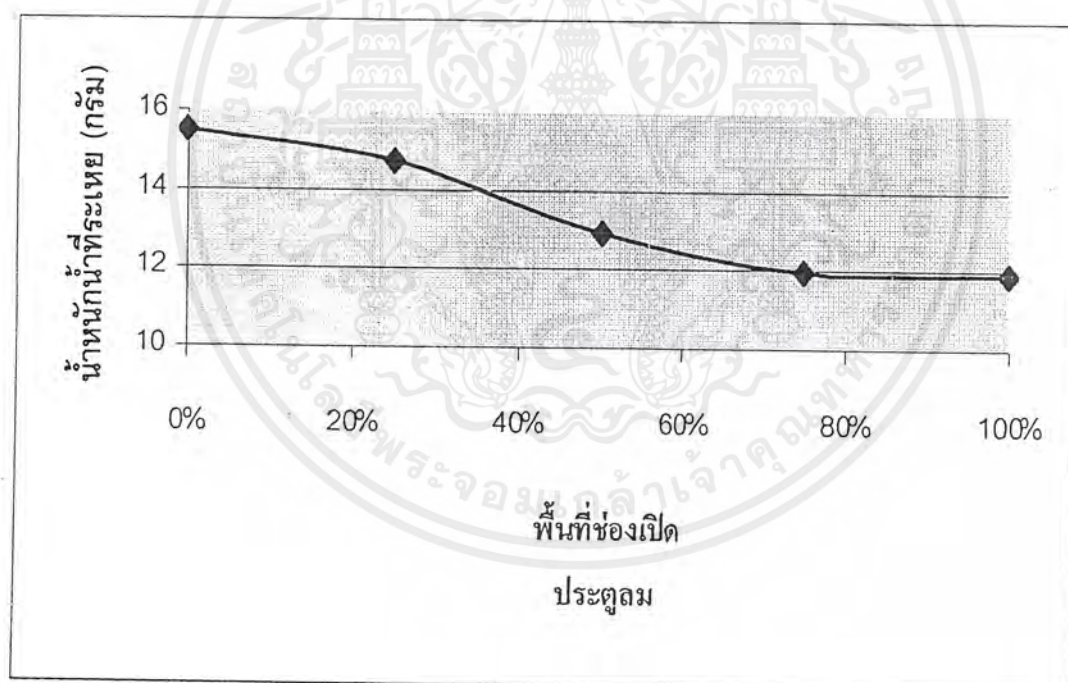


รูปที่ 7.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของลมร่อนกับเวลาที่พื้นที่ของเปิดของประตูลมต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.18 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้ง

พื้นที่ช่องเปิดประตูลม	น้ำหนักน้ำที่ระเหย (กรัม)		
	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ค่าเฉลี่ย
100%	12.8	11.04	11.92
75%	12.92	11.04	11.98
50%	13.63	12.28	12.955
25%	16.34	13.14	14.74
0%	16.57	14.47	15.52



รูปที่ 7.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลม กับปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้งเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการทดลอง

8.1.1) ความชื้นสัมพัทธ์ของลมในกระบวนการแปรผกผันกับอุณหภูมิเป็นหลัก และจะแปรผกผันกับความเร็วลมเล็กน้อย

8.1.2) เมื่อเปิดประตูลมมากขึ้น จะทำให้ปริมาณลมที่กลับสู่ระบบน้อยลง อุณหภูมิของลมก็จะลดลง ความชื้นสัมพัทธ์ก็จะมากขึ้น

8.1.3) อุณหภูมิและความชื้นในขณะอบ จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกของการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด หลังจากนั้น ค่าของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงจนเกือบคงที่ในช่วงท้ายของการอบแห้ง ค่าของอุณหภูมิและความชื้นสุดท้ายจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ช่องเปิดของประตูลม หรือปริมาณลมที่ย้อนกลับสู่แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยถ้าพื้นที่ช่องเปิดมาก ปริมาณลมย้อนกลับน้อย จะทำให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง ซึ่งจะทำให้อัตราการอบแห้งน้อยตามไปด้วย

8.2 ข้อเสนอแนะ

8.2.1) ควรเลือกใช้เครื่องเป่าลมที่มีกำลังมากขึ้น เนื่องจากการปรับระบบให้มีการหมุนเวียนลมกลับจะเกิดความดันลดในระบบสูงขึ้น

8.2.2) ในการทดลองสุดท้ายพบว่า เมื่อทำการปิดประตูลมจนสุด ความชื้นสัมพัทธ์จะถูกจำกัดที่ค่าที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น อาจเกิดจากมีการสูญเสียลมร้อนทางอื่นอีก จึงควรทำการตรวจสอบและแก้ไขต่อไป เพื่อให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, ฟลูอิดไดเซชัน, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2528.
2. สมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์, การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, พิมพ์ครั้งที่ 7. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2540.
3. ดำรง ชุมมงคล, การควบคุมกระบวนการ, พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2542.
4. สมบูรณ์ จงชัยกิจ, การควบคุมอัตโนมัติ และ ตัวควบคุมแบบ PID, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. กฤษรักษ์ กิ่งแสง ปิลันธน์ เจตน์เจริญรักษ์ และ ยุทธนา เขี่ยมสมบัติ, เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด, ปรินตยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
6. McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering, 5th ed. McGraw – Hill Book Company, 1993.
7. Mujumdar, A.S., Handbook of Industrial Drying, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของผลการทดลอง

ภาคผนวก ก.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์

ตาราง ก.1.1 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองชุดการทดลองที่ 1

Manual instrument	T(start, meas. by thermometer)			T (final)	
	%RH	wet bulb	dry bulb	wet bulb	dry bulb
31.2	71.2	26.5	31.0	27.5	32.5
					72.0

ตาราง ก.1.2 ตารางค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เปรียบเทียบกับของเซนเซอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 1

Temperature (°C)	Humidity (%RH) measured by manual instrument, by sensor at various frequency (Hz)											
	30.0		35.0		40.0		45.0		50.0		50.0	
33.3	61.8	59.5	61.5	59.8	59.3	58.1	56.0	54.5	53.9	53.9	52.9	52.9
38.0	49.5	50.5	49.4	50.9	47.1	48.6	45.0	46.1	43.3	43.3	44.8	44.8
42.0	39.4	42.0	38.9	41.1	38.3	40.1	37.5	39.2	36.3	36.3	37.7	37.7
46.0	32.4	32.5	32.6	34.4	32.5	34.2	31.4	33.1	30.4	30.4	32.0	32.0
50.0	28.6	31.6	28.3	31.4	27.7	27.2	27.2	29.7	26.8	26.8	28.8	28.8

ตาราง ก.1.3 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่าง ๆ ของชุดการทดลองที่ 1

Freq. (Hz)	Temperature (°C)				
	30.0	33.3	38.0	42.0	46.2
35.0	33.9	38.5	42.8	46.3	51.1
40.0	34.5	39.2	43.3	46.5	51.3
45.0	35.5	40.0	44.0	47.6	51.6
50.0	36.3	40.7	44.7	48.5	52.1

ตาราง ก.1.4 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชุดการทดลองที่ 1

Freq. (Hz)	V (m/s)				
	30.0	8.9	9.2	9.2	9.5
35.0	10.6	10.5	11.2	11.4	10.9
40.0	12.4	12.2	12.8	12.9	12.6
45.0	14.4	13.8	14.5	14.7	14.4
50.0	16.0	15.4	16.1	15.8	15.8

ตาราง ก.1.7 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2

Freq. (Hz)	Temperature (°C)				
	30.0	31.8	38.0	42.0	46.6
35.0	32.4	38.6	42.5	46.8	50.6
40.0	33.0	39.1	43.2	47.7	50.2
45.0	33.7	39.9	43.8	48.8	52.0
50.0	34.4	40.6	44.4	49.6	52.7

ตาราง ก.1.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 2

Freq.(Hz)	V (m/s)				
	30.0	38.0	42.0	46.0	50.0
35.0	9.2	9.3	9.7	9.5	9.4
40.0	10.8	11.2	11.4	11.3	11.2
45.0	12.4	12.8	13.0	13.0	12.8
50.0	14.2	14.7	14.7	14.5	14.5
	15.7	16.4	16.5	16.7	16.3

ตาราง ก.1.9 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองชุดการทดลองที่ 3

Manual instrument	T _i (start, meas. by thermometer)			T (final)		
	%RH	wet bulb	dry bulb	%RH	wet bulb	dry bulb
33.0	62.0	28.0	32.0	85.0	28.0	30.0
						75.0

ตาราง ก.1.10 ตารางค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด เปรียบเทียบกับของเซนเซอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 3

Temperature (°C)	Humidity (%RH) measured by manual instrument, by sensor at various frequency (Hz)													
	30.0			35.0			40.0			45.0			50.0	
34.1	56.5	53.6	55.0	52.5	54.3	52.4	53.4	51.7	51.8	50.9	51.8	51.8	51.8	50.9
38.0	48.0	49.4	46.2	47.8	44.4	46.6	42.3	44.8	40.5	43.1	44.8	40.5	40.5	43.1
42.0	39.7	42.7	39.2	41.8	37.9	40.0	36.5	38.8	35.2	37.3	38.8	35.2	35.2	37.3
46.0	33.7	37.0	33.1	36.0	32.5	35.0	31.4	33.5	30.5	32.1	33.5	30.5	30.5	32.1
50.0	29.3	32.6	28.7	31.4	28.0	30.7	27.3	29.8	27.1	29.3	29.8	27.1	27.1	29.3

ตาราง ก.1.11 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมกับความถี่ต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 3

Freq. (Hz)	Temperature (°C)				
	30.0	34.1	38.0	42.4	46.2
35.0	34.6	38.9	42.7	46.6	50.2
40.0	34.9	31.7	43.5	47.0	50.7
45.0	35.3	41.0	44.2	48.1	51.1
50.0	35.9	42.1	45.0	48.8	51.8

ตาราง ก.1.12 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม (m/s) กับ ความถี่ (Hz) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันของชุดการทดลองที่ 3

Freq.(Hz)	V (m/s)				
		38.0	42.0	46.0	50.0
30.0	10.0	10.4	10.1	10.2	10.2
35.0	11.7	12.5	12.0	12.1	12.1
40.0	13.6	14.3	14.0	14.0	14.0
45.0	15.5	15.9	15.7	15.7	15.7
50.0	17.4	17.4	17.5	17.6	17.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.2 ข้อมูลผลการทดลองความสัมพันธะระหว่างพื้นที่ช่องเปิดประตูลมกับอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์

สภาวะเริ่มต้นพื้นที่ช่องเปิดประตูลม 100% ของชุดการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ = 38.2 (องศาเซลเซียส) ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม = 1.0 เมตรวินาที
 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ = 48.6 ความเร็วลมที่วางกลับมาใช้ในระบบ = 2.2 เมตรวินาที

ตาราง ก.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 100% ของชุดการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	39.4	40.4	40.8	40.9	41.0	41.0	41.0	40.9	41.0	41.1	41.2	41.2	41.2	41.3	41.4	41.5
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	50.0	52.2	51.9	51.5	51.1	50.5	49.7	49.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.6	49.2	49.3	49.1

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง = 202.31 กรัม อุณหภูมิกระเปาะเปียก 26 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักถุง = 2.20 กรัม อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 28 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักก่อนอบ = 200.11 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง = 191.27 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ = 189.07 กรัม
 น้ำหนักน้ำที่ระเหย = 11.04 กรัม
 น้ำหนักแห้ง = 54.34 กรัม

สภาวะเริ่มต้นพื้นที่ช่องเปิดประตู 75% ของชุดการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ = 39.3 (องศาเซลเซียส) ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม = 3.1 เมตร/วินาที
 เปอรืเริ่มต้นความชื้นสัมพัทธ์ = 46.9 ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ = 2.8 เมตร/วินาที

ตาราง ก.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอรืเริ่มต้นความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 75% ของชุดการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	38.1	39.5	39.7	39.9	40.0	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1	40.2	40.1	40.2	40.2	40.2
เปอรืเริ่มต้นความชื้นสัมพัทธ์	51.6	51.5	50.9	50.2	50.0	49.8	49.6	49.7	49.7	49.7	49.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.4

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง = 201.88 กรัม อุณหภูมิกระเปาะเปียก 26 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักถุง = 2.46 กรัม อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 28 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักก่อนอบ = 199.42 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง = 190.84 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ = 188.38 กรัม
 น้ำหนักน้ำที่ระเหย = 11.04 กรัม
 น้ำหนักแห้ง = 54.41 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเริ่มต้นพื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 1

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)} &= 41.2 \quad (\text{องศาเซลเซียส}) && \text{ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม} &= 5.8 \quad \text{เมตร/วินาที} \\ \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์} &= 43.6 && \text{ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ} &= 3.9 \quad \text{เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

ตาราง ก.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	40.0	41.0	41.1	41.1	41.1	41.2	41.2	41.3	41.4	41.5	41.5	41.6	41.7	41.7	41.7	41.7
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	48.0	49.2	48.4	48.0	47.8	47.7	47.7	47.6	47.5	47.4	47.3	47.4	47.3	47.1	47.1	47.0

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง	=	202.15	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	26	องศาเซลเซียส
น้ำหนักถุง	=	2.30	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	28	องศาเซลเซียส
น้ำหนักก่อนอบ	=	199.85	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง	=	189.01	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ	=	186.71	กรัม			
น้ำหนักน้ำที่ระเหย	=	13.14	กรัม			
น้ำหนักแห้ง	=	54.30	กรัม			

สภาพจะเริ่มต้นพื้นที่ของเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) = 42.0 (องศาเซลเซียส) ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม = 1.0 เมตร/วินาที
 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ = 41.8 ความเร็วลมที่วัดกลับมาใช้ในระบบ = 4.5 เมตร/วินาที

ตาราง ก.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	40.0	41.5	41.7	41.7	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.8	41.9	41.9
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	43.8	47.2	46.9	46.6	46.5	46.5	46.5	46.5	46.4	46.4	46.4	46.4	46.4	46.5	46.5	46.4

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง = 202.34 กรัม อุณหภูมิกระเปาะเปียก 26 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักถุง = 2.57 กรัม อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 28 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักก่อนอบ = 199.77 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง = 187.87 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ = 185.30 กรัม
 น้ำหนักน้ำที่ระเหย = 14.47 กรัม
 น้ำหนักแห้ง = 54.27 กรัม

สภาพเริ่มต้นพบที่ของเปิดประตุลม 75% ของชุดการทดลองที่ 2

อุณหภูมิ = 42.0 (องศาเซลเซียส) ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตุลม = 3.4 เมตรวินาที
 เปรอร์เริ่มต้นความชื้นสัมพัทธ์ = 38.1 ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ = 2.8 เมตรวินาที

ตาราง ก.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตุลม 75% ของชุดการทดลองที่ 2

เวลา (นาท)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	41.4	42.1	42.1	42.2	42.3	42.3	42.4	42.5	42.6	42.6	42.7	42.7	42.7	42.8	42.9	42.6
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	42.6	42.4	42.2	41.9	41.6	41.3	41.1	40.9	40.8	40.6	40.5	40.4	40.4	40.3	40.2	40.0

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง = 202.72 กรัม
 น้ำหนักถุง = 2.23 กรัม
 น้ำหนักก่อนอบ = 200.49 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง = 189.80 กรัม
 น้ำหนักหลังอบ = 187.57 กรัม
 น้ำหนักน้ำที่ระเหย = 12.92 กรัม
 น้ำหนักแห้ง = 49.93 กรัม

อุณหภูมิกระเปาะเปียก 26 องศาเซลเซียส
 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 30 องศาเซลเซียส

สภาวะเริ่มต้นพื้นที่ของเปิดประตูลม 50% ของชุดการทดลองที่ 2

อุณหภูมิ = 43.6 (องศาเซลเซียส) ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม = 5.2 เมตร/วินาที
 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ = 34.6 ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ = 4.2 เมตร/วินาที

ตาราง ก.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ของเปิดประตูลม 50% ของชุดการทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	43.0	43.6	43.9	44	44.2	44.3	44.3	44.4	44.4	44.5	44.6	44.6	44.7	44.7	44.7	44.8
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	39.0	38.5	37.8	37.4	37.1	37.0	36.9	36.8	36.7	36.6	36.6	36.5	36.3	36.3	36.1	35.9

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง	=	200.77	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	26	องศาเซลเซียส
น้ำหนักถุง	=	2.06	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	31	องศาเซลเซียส
น้ำหนักก่อนอบ	=	198.71	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง	=	187.14	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ	=	185.08	กรัม			
น้ำหนักน้ำที่ระเหย	=	13.63	กรัม			
น้ำหนักแห้ง	=	49.61	กรัม			

สภาวะเริ่มต้นพื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 2

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิ} &= 46.4 \quad (\text{องศาเซลเซียส}) && \text{ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม} = 5.4 \quad \text{เมตรวินาที} \\ \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์} &= 30.1 && \text{ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ} = 4.8 \quad \text{เมตรวินาที} \end{aligned}$$

ตาราง ก.2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลาที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 25% ของชุดการทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	44.6	45.2	45.3	45.4	45.5	45.6	45.6	45.6	45.7	45.6	45.7	45.8	45.9	45.9	45.9	46.0
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	35.8	35.4	35.0	34.8	34.7	34.5	34.4	34.4	34.5	34.4	34.4	34.2	34.1	34.1	34	34

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง	=	201.80	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	26	องศาเซลเซียส
น้ำหนักถุง	=	2.20	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	31.5	องศาเซลเซียส
น้ำหนักก่อนอบ	=	199.60	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง	=	185.46	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ	=	183.26	กรัม			
น้ำหนักน้ำที่ระเหย	=	16.34	กรัม			
น้ำหนักแห้ง	=	49.42	กรัม			

สภาวะเริ่มพื้นที่ช่องเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 2

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิ} &= 47.1 \text{ (องศาเซลเซียส)} && \text{ความเร็วลมออกทางช่องเปิดประตูลม} &= 0.7 \text{ เมตร/วินาที} \\ \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์} &= 29.2 && \text{ความเร็วลมที่วนกลับมาใช้ในระบบ} &= 5.8 \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

ตาราง ก.2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา ที่พื้นที่ช่องเปิดประตูลม 0% ของชุดการทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	46.3	46.9	47.1	47.3	47.4	47.5	47.5	47.6	47.6	47.7	47.8	47.7	47.7	47.8	47.8	47.7
เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์	33.1	33.1	32.8	32.5	32.3	32.1	31.8	31.9	31.7	31.6	31.5	31.6	31.6	31.6	31.6	31.5

น้ำหนักก่อนอบ+น้ำหนักถุง	=	202.38	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	27	องศาเซลเซียส
น้ำหนักถุง	=	2.14	กรัม	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	32	องศาเซลเซียส
น้ำหนักก่อนอบ	=	200.24	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ+น้ำหนักถุง	=	185.81	กรัม			
น้ำหนักหลังอบ	=	183.67	กรัม			
น้ำหนักน้ำที่ระเหย	=	16.57	กรัม			
น้ำหนักแห้ง	=	49.61	กรัม			

ตารางความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพืช

ตาราง ข.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพืชต่างๆ, เปรียบเทียบมาตรฐานเปียก [2]

Material	Temp °F	Relative Humidity (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Barley	77	4.4	7.0	8.5	9.7	10.8	12.1	13.5	15.8	19.5	26.8
Buckwheat	77	5.0	7.6	9.1	10.2	11.4	12.7	14.2	16.1	19.1	24.5
Cottonseed	77				6.9	7.8	9.1	10.1	12.9	19.6	
Dry beans , Michelite	40						12.8	14.4	17.0		
	50						13.8	15.3	18.0		
	77	5.6	7.4	8.6	9.8	11.2	12.9	14.9	17.5		
	100						12	14.2	17.1		
	130						12.4	14.3	18.5		
Dry beans , red Mexican	77	6	7.5	8.6	9.8	11	12.8	15.2	18.6		
Dry beans , light red kidney	77	5.9	7.4	8.5	9.6	10.9	12.6	15	18		

ตาราง ข.1 ความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชต่างๆ , เปอร์เซ็นตามมาตรฐานเปียก (ตล)

Material	Temp °F	Relative Humidity (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Dry beans , light red kidney	77	6.1	7.5	8.7	9.9	11.1	12.9	15.1	18.5		
Dry beans , dark red kidney	77	5.4	7.2	8.4	9.9	10.7	12.5	15	18.6		
Dry beans , flat, small white	77	6	7.1	8.3	9.6	11	12.6	15	18.1		
Dry beans , pinto	77	6.1	7.4	8.5	9.8	11	12.6	15.2	18.2		
Flaxseed	77	3.3	4.9	5.6	6.1	6.8	7.9	9.3	11.4	15.2	21.4
Oats	77	4.1	6.6	8.1	9.1	10.3	11.8	13	14.9	18.5	24.1
Peanuts , Pod	50			5.5	6.1	7.1	8.6	9.8	11.9		
Peanuts , kernels	50			4.8	5.5	6	6.6	7.3	9		
Rice , whole grain	77	5.9	8	9.5	10.9	12.2	13.3	14.1	15.2	19.1	
Rice , whole grain	100	4.9	7	8.4	9.8	11.1	12.3	13.3	14.8	19.1	
Rice , milled	77	5.1	7.6	9	10.3	11.5	12.6	12.8	15.4	18.1	23.6
Rice , rough	80				9.2	10.4	11.7	13.2	15	17.1	
	111					10.3	10.3	12.3	14.3	16.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพืชต่างๆ .เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (ต่อ)

Material	Temp	Relative Humidity (%)									
	°F	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	32		8.2	9.9	11.1	12.3	13.3	14.5	16.6	19.2	
	68		7.5	9.1	10.4	11.1	12.5	13.7	15.2	17.6	
	86		7.1	8.5	10	10.9	11.9	13.1	14.7	17.1	
	77		4.6	7.9	9.4	10.8	12.2	13.4	14.8	16.7	
	73		4.9	8.7	9.8	10.9	12.4	13.5	15.9	19	
Rye	77		5.2	8.7	9.9	10.9	12.2	13.5	15.7	20.6	
Shell corn YD	20				10.4	11.8	13.3	15	16.6		
	32				11	12.5	14	15.8	18	21.8	
	50		6.6	8	10.8	12.2	13.8	15.2	17.5	21.8	
	70			9.3	8.3	9.8	11.4	13.2			
	77		5.1	8.3	9.8	11.2	12.9	14	15.6	19.6	23.8
	90		4.9	7.7	9.3	10.8	12.4	14	16.2	19.3	
	120				8.6	10	11.2	13.1	14.9		
	30		6.7	9.2	10.7	12.7	14.1	17.7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพืชต่างๆ , เปอร์เซ็นตามมาตรฐานเปียก (ต่อ)

Material	Temp	Relative Humidity (%)									
	°F	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	86	4.4	7.4	8.2	9	10.2	11.4	12.9	14.8	17.4	
	60	7.5	7.8	9	10.3	11.3	12.4	13.9	16.3	19.8	
	50				9.2	10.7	12.1	13.6	15.5		
	32				10.1	11.8	13.3	15	16.6		
	155				7.4	8.4	10	11.5	12.2		
	160		3.9	6.2	9.1	10.4	11.9	13.9	15.2	17.9	
	40	6.3	8.6	9.8	11	12.4	13.8	15.7	17.6	21.5	
	60		4.8	6.8	8.6	10.7	12.1	13.9			
	86				11	12.5	14	15.8	18	21.8	
	100	4	6	7.3	8.7	9	11	12.5	14.2	16.7	
	122	3.6	5.5	6.7	8	9.2	10.4	12	13.6	16.1	
	140	3	5	6	7	7.9	8.8	10.3	12.1	14.6	
	120				5.3	6.5	7.8	9.3	10.7		
	90			5.3	6.6	8.3	10.2	12.1	13.9		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชต่างๆ , เปรียบเทียบตามมาตรฐานเปียก (ตอ)

Material	Temp	Relative Humidity (%)									
	°F	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Shell corn WD	77	5.1	7.2	8.5	9.8	11.2	12.9	13.9	15.5	18.9	24.6
Shell popcorn	77	5.6	7.4	8.5	9.8	11	12.2	13.1	14.2	18.4	23
Sorghum	30		8.2	10.1	11.2	12.3	13.5	14.5	15.8		
	60		7.5	9.5	10.7	11.8	12.9	14	15.5		
	77	4.4	7.3	8.6	9.8	11	12	13.8	15.8	18.8	21.9
Sorghum , kafir	90		7	8.7	10.2	11.8	12.2	13.1	14.8		
	120		6.6	8	9.4	10.7	11.6	12.7	14.3		
	40	6.8	8.5	9.7	11	12.3	13.7	15.3	17.3		
Soybeans	70	6	7.7	9.1	11.3	11.5	12.8	14.2	16	19	
	90	5	7	8.4	9.6	10.8	12	13.2	14.7	17	
	77		5.5	6.5	7.1	8	9.3	11.5	14.8	18.8	
Sugar beet seeds	77				7	8	10.1	12.2	16	20.7	
	40			10	11.5	12.7	13.9	15.3	17.6	22.6	
	60			9	10	11.5	12.5	14.1	16.2	19.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชต่างๆ , เปอร์เซ็นตามมาตรฐานเปียก (ต่อ)

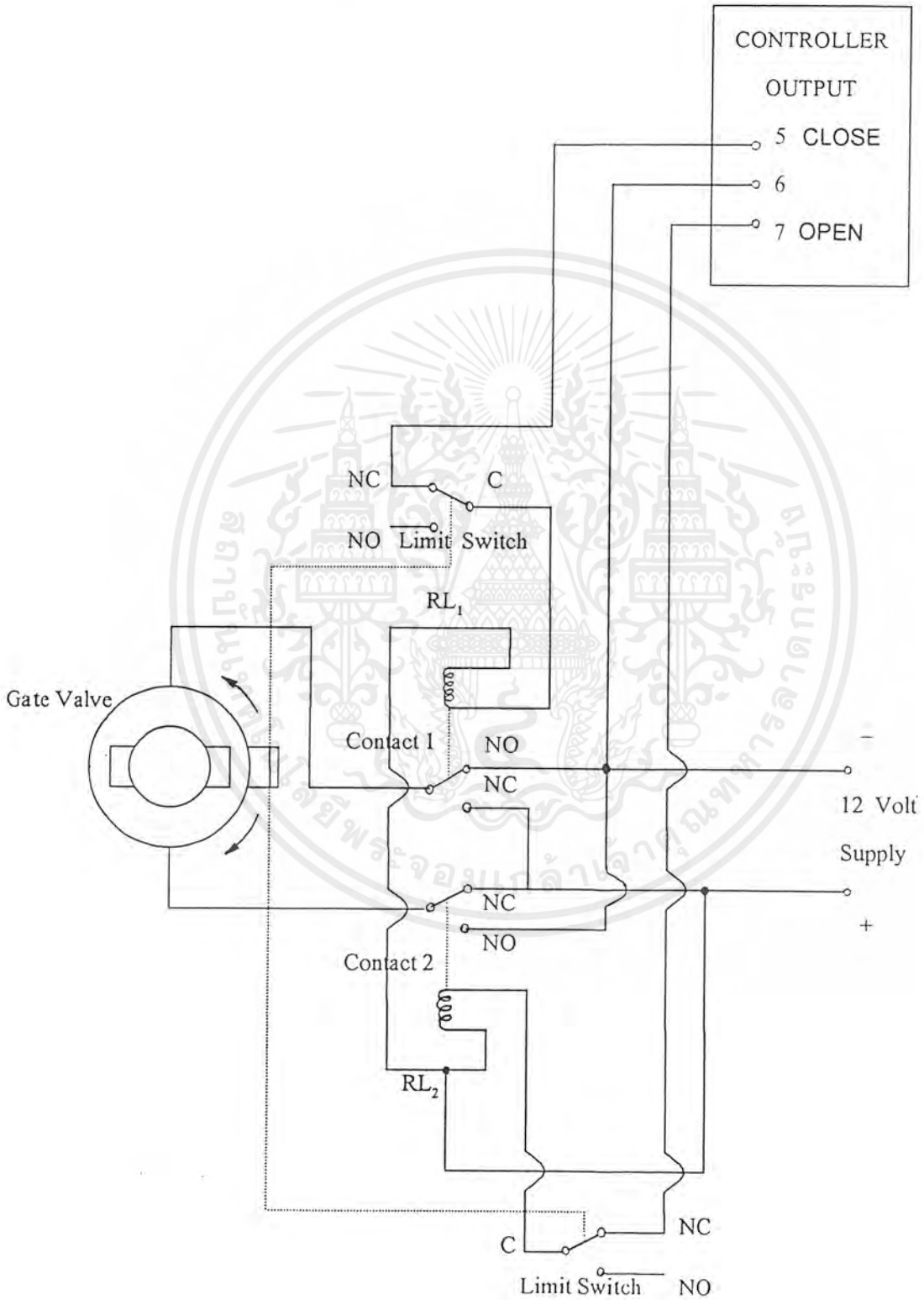
Material	Temp	Relative Humidity (%)									
	°F	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Wheat, soft red winter	80			8	9.1	10.4	11.6	12.9	14.7	18	
	100			7	8.3	9.2	10.4	11.5	13.2	15.8	
	20				11.3	12.8	14.1	15.3	17		
	32				11	12.2	13.5	14.7	16.2		
	50				10.2	11.7	13.1	14.4	16		
	70				9.7	11	12.4	14			
Wheat, hard red winter	77		7.2	8.6	9.7	10.9	11.9	13.6	15.7	19.7	25.6
	77		7.2	8.5	9.7	10.9	12.5	13.9	15.8	19.7	25
Wheat, hard red spring	77		7.2	8.5	9.8	11.1	12.5	13.9	15.9	19.7	25
	77		7.5	8.6	9.4	10.5	11.8	13.7	16	19.7	26.3
Wheat, durum	77		7.4	8.5	9.4	10.5	11.5	13.1	15.4	19.3	26.7
	30		6.9	9.2	10.4	11.8	13.2	14.5	16.3		
Wheat	60		6.1	7.8	9.6	10.7	12.7	13.8	15.3		
	77	5.8	7.6	9.1	10.7	11.6	13	14.5	16.8	20.6	

ตาราง ข.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดพืชต่างๆ , เปรียบเทียบตามมาตรฐานเปียก (ต่อ)

Material	Temp	Relative Humidity (%)									
	°F	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	90		5.3	7	8.6	10.3	11.5	12.9	14.3		
	120			6.2	7.4	9.6	10.4	11.9	13.6		
	122	4	5.8	6.7	8.1	10	10.8	12.6	15.1	19.4	
	32					13	14.2	16	18	21.1	
	68					12.2	13.2	15.1	17.1	20.3	
	104						12.6	14.1	16.3	19.8	
	50		7.9	9.2	10.6	12.7	14.2	15	17.3		
	68		7.1	8.3	9.6	10.9	12.2	13.5	15		
	104		7.1	7.4	8.5	10	11.3	12.3	14.2		
	176		2.5	4.8	5.7	6.7	8	9.8	11.5		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป control circuit diagram



รูปที่ ค.1 control circuit diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้