



เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์เบดหลายชั้นในระบบสั่นสะเทือน

(Corn Drying in Multistage Vibrated Fluid - Bed Fluidization)



โดย

นางสาว ทวีจันทร์ สุนทรจารักษ์

นาย ศิริชัย ชุ่มใจรักษ์

นาย สุภชัย นิสวอนบุตรพันธ์

นาย สงวน มาลาโกน

วัน เดือน ปี.....	๑1 ก.ค. ๒5๕๐
เลขทะเบียน.....	037007
เลขเรียกหนังสือ.....	T ๐๕๑๐๐ กวษร ค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดเป็การศึกษา 2538 อังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

037007

ปริญญาโทปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบคหลายชั้นในระบบการสั่นสะเทือน

ผู้จัดทำ

1. นางสาว ทวีจันทร์ สุนทรจารย์
2. นาย ศิริชัย ชุ่มใจรัมย์
3. นาย ศุภชัย นิสวอนุตรพันธ์
4. นาย สวงน มาดำโกน



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ มณฑล ใจกุล)

.....*สมชาย วัฒนาศิริ*.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ วรรณชัย กัลยาศิริ)

กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆ ท่าน ช่วยกันคือ อ. มณฑล ใจกุล และ อ. กรรณชัย กัลยาศิริ ที่กรุณาให้ความรู้ทางด้านเทคนิคและวิธีการแก้ปัญหา รวมถึงได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือวัดจากภาควิชาเกษตรกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และได้รับความอนุเคราะห์ทางการประกอบระบบของเครื่องอบแห้ง คือ พี่โอภาส เจ้าหน้าที่ Workshop ภาควิศวกรรมกล และที่จะขาดเสียมิได้คือ การได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์ประกอบระบบจาก บริษัท เทอร์มาเฟลค จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ฉนวนกันความร้อนเพื่อประโยชน์ในการนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบคหลายชั้นในระบบสันสะท้อน

โดย	นางสาว ทวีจันทร์	สุนทรจารณ์	35104157
	นาย สิริชัย	ชุ่มใจรักษ์	35104416
	นาย ศุภชัย	นิศวอนุตรพันธ์	35104423
	นาย สงวน	มาลีโกน	35104430
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. มณฑล	ใจฤศล	
	อ. กรรณชัย	กัลยาศิริ	

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ จะนำเสนอเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์แบบสันแบบหลายชั้น เพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในเม็ดวัสดุ (เมล็ดข้าวโพด) ทดลอง เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบคแบบสันหลายชั้น ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองเช่น ความเร็วของลม, อุณหภูมิของลม, แอมพลิจูดของการสัน, ความสูงของเบค, ความถี่ของการสัน, ขนาดของวัสดุ และรูปร่างของวัสดุ ทำการศึกษาผลของการสัน ว่ามีผลกระทบอย่างไรต่ออัตราการอบแห้งที่คงที่ เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์แบบสัน เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องอบแห้งด้วยวิธีการฟลูอิดไคซ์เบค แต่วัสดุนั้นมีการกระจายขนาดแตกต่างกันมาก ๆ หรือวัสดุที่มีความเหนียวซึ่งวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์แบบธรรมดา ไม่สามารถใช้ได้ จึงได้ใช้แบบสันเข้ามาช่วยในการฟลูอิดไคซ์ด้วย เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์แบบสันโดยใช้มอเตอร์สัน เพื่อให้วัสดุเกิดการฟลูอิดไคซ์ และมีลมร้อนขึ้นมาสัมผัสกับวัสดุ เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสาร นั่นคือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ จะเกิดผลทำให้ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนตัวแปร ได้แก่ ค่าความเร็วของอากาศ (U_g), ค่ามุมโยน (α), ค่ามุมของตะแกรงที่ทำกับแนวระนาบ (β) เมื่อค่าเหล่านี้มีค่ามาก จะทำให้ค่าเอนทาลปีของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งหมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการถ่ายเทจะมีค่ามากตามไปด้วย

Corn Drying in Multistage Vibrated Fluid - bed Fluidization Dryer

By	Mss. Thawichan Sunthachan	35104157
	Mr. Sirichai Chumjairuk	35104416
	Mr. Supachai Nisava - anutarapan	35104423
	Mr. Sanguan Malamkon	35104430
Supervisor:	Mr. Monthon	Jaikusol
	Mr. Kannachai	Kanlayasiri

ABSTRACT

This paper presents the brief review of literature on heat transfer and drying characteristics of vertically and multi state fluidized bed to study and experiment to know about their flow and heat transfer properties in a solid particle. This experiment for study the drying characteristics of a vertically and multi state vibrated fluidized bed is presented and discussed variables studied included : air velocity, air temperatures, amplitude of vibration, bed height, frequency of vibration, particle size and particle shape. A study of vibration parameters on constant rate drying.

The drying of vertically and multi state fluidized bed is the dryer used for the particular that require to drying with the processing technique of fluidized bed drying. But the distributed of small solid particle have some different size or gel particle can not be dried on the fluidized bed without vibration. So we will use the vibration motor to vibrate the particular to be fluidized and use the vertically rising steam from fluid-usually gas so that the fluid of gas and solid come to intimate contact for exchanging the heat transfer and mass transfer.

In this experiment, we conclude that there are three main variables cause the changes in the coefficient of heat transfer, h_c . These three main variables comprise of air velocity, inclined angle, When one variable has changed, the coefficient of heat transfer also changes in the same manner, That is when the variable increases, the coefficient of

heat transfer also increases . In the other hand, when the variable decreases , the coefficient of heat transfer also decreases.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญกราฟ	ญ
สารบัญสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของการดำเนินงาน	1
บทที่ 2	
การอบแห้งและทฤษฎีฟลูอิดไดเรชัน	3
2.1 ความชื้นในวัสดุ	3
2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนของการอบแห้ง	4
2.3 อัตราการอบแห้ง	4
2.4 การแบ่งประเภทเครื่องมือการอบแห้งชนิดต่างๆ	8
2.5 ชนิดของเครื่องอบแห้งที่สำคัญ	8
บทที่ 3	
การขนถ่ายวัสดุโดยใช้รางเขย่าแบบไวเบอร์เตอร์	10
3.1 ระบบเขย่าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า	10
3.2 การคำนวณระบบรางเขย่า	11
บทที่ 4	
เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไครซ์เบดแบบสั่น	18
4.1 ข้อดีของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไครซ์เบดแบบสั่น	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	หน้า
4.2 ข้อจำกัดในการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	18
4.3 ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	19
4.4 Aerodynamics	19
4.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	21
บทที่ 5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	24
บทที่ 6 วิธีการทดลองเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	31
6.1 วิธีการใช้เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	31
6.2 การทดสอบสมรรถนะ	31
บทที่ 7 การกำหนดขนาด และ รายละเอียดการออกแบบเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น	33
บทที่ 8 ผลการทดลอง	35
บทที่ 9 วิเคราะห์ผลการทดลอง	56
บทที่ 10 สรุปผลการทดลอง และข้อชี้แนะ	58
หนังสืออ้างอิง	59
ภาคผนวก ก. การใช้ Finite Element ในการคำนวณหาความร้อนในตู้อบ	60
ภาคผนวก ข. โปรแกรมคำนวณค่าเอนทาลปีของวัสดุตามทฤษฎี	75
ภาคผนวก ค. โปรแกรมคำนวณค่าเอนทาลปีของวัสดุจากการทดลอง	76

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า	
รูปที่ 2.1	กราฟแสดงการอบแห้งกับเวลา	5
รูปที่ 2.2	เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	7
รูปที่ 3.1	ลักษณะโครงสร้างของไอบเรเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า	10
รูปที่ 3.2	มอเตอร์เขย่า	11
รูปที่ 3.3	แสดงลักษณะการเขย่าของราง	12
รูปที่ 3.4	มุมต่าง ๆ และค่าอัตราเร่งต่าง ๆ ณ ชี้นมวลขนถ่าย ขณะขนถ่ายเขย่า ในแนวลาดเอียง	14
รูปที่ 3.5	ทิศทางเคลื่อนเขย่าในแนวยืนของรางเขย่า และของชิ้นวัสดุขนถ่าย ด้วยค่ากำหนดแพคเตอร์ต่างๆ	15
รูปที่ 3.6	ไดอะแกรมการขยับโยนตัวของชิ้นมวลวัสดุขนถ่ายที่ละน้อย ๆ ขณะ รางแล่นเขย่า	15
รูปที่ 3.7	ระยะช่วงโยนตัวของชิ้นมวลวัสดุขนถ่ายบนรางเขย่าไอบเรเตอร์	16
	ภาพแสดง เครื่องชั่งน้ำหนัก	25
	ภาพแสดง เครื่องวัดปริมาณความชื้น	26
	ภาพแสดง เครื่องวัดความเร็วลม	26
	ภาพแสดง HEATER (ใช้แบบขดลวดความร้อน ขนาด 5000 W) และชุดควบคุมอุณหภูมิ	27
	ภาพแสดง BLOWER ขนาด 1600 cfm	27
	ภาพแสดง มอเตอร์สั่น	28
	ภาพแสดง ชุดเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบคแบบสั่นหลายชั้น โดยรวม	28

เรื่อง	หน้า
ภาพแสดง ตัวเครื่องอบแห้ง	29
ภาพแสดง แผ่นกระจายอากาศซึ่งวางลาดเอียงอยู่ในเครื่องอบแห้ง	30



สารบัญตาราง

	ตาราง	หน้า
1.	<p>ตารางแสดงผลการทดลองที่ค่ามุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ $(\beta) = 5$ องศา และค่ามุมโยนตัว $(\alpha) = 60,65,70,75,80$ องศา</p> <p>ตารางที่ 8.1.1 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.1.2 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.5 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.1.3 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.1.4 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.5 m/s</p>	<p></p> <p>35</p> <p>35</p> <p>36</p> <p>36</p>
2.	<p>ตารางแสดงผลการทดลองที่ค่ามุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ $(\beta) = 8$ องศา และค่ามุมโยนตัว $(\alpha) = 60,65,70,75,80$ องศา</p> <p>ตารางที่ 8.2.1 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.2.2 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.5 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.2.3 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.2.4 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.5 m/s</p>	<p></p> <p>37</p> <p>37</p> <p>38</p> <p>38</p>
3.	<p>ตารางแสดงผลการทดลองที่ค่ามุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ $(\beta) = 11$ องศา และค่ามุมโยนตัว $(\alpha) = 60,65,70,75,80$ องศา</p> <p>ตารางที่ 8.3.1 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.3.2 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 2.5 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.3.3 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.0 m/s</p> <p>ตารางที่ 8.3.4 ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร่อน 3.5 m/s</p>	<p></p> <p>39</p> <p>39</p> <p>40</p> <p>40</p>

สารบัญกราฟ

กราฟ	หน้า
1. กราฟแสดงผลการทดลองที่มุมแผ่กระจายอากาศ (β) = 5 องศา	
และมุมโยนตัว (α) = 60,65,70,75,80	
กราฟที่ 1 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.0 m/s	41
กราฟที่ 2 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s	42
กราฟที่ 3 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s	43
กราฟที่ 4 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s	44
2. กราฟแสดงผลการทดลองที่มุมแผ่กระจายอากาศ (β) = 8 องศา	
และมุมโยนตัว (α) = 60,65,70,75,80	
กราฟที่ 5 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.0 m/s	45
กราฟที่ 6 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s	46
กราฟที่ 7 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s	47
กราฟที่ 8 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s	48
3. กราฟแสดงผลการทดลองที่มุมแผ่กระจายอากาศ (β) = 11 องศา	
และมุมโยนตัว (α) = 60,65,70,75,80	
กราฟที่ 9 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.0 m/s	49
กราฟที่ 10 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s	50
กราฟที่ 11 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s	51
กราฟที่ 12 แสดงผลจากการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s	52

กราฟ		หน้า
กราฟที่ 13	แสดงผลการเปรียบเทียบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่มุม กระจายอากาศ 5 องศา	53
กราฟที่ 14	แสดงผลการเปรียบเทียบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่มุม กระจายอากาศ 8 องศา	54
กราฟที่ 15	แสดงผลการเปรียบเทียบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่มุม กระจายอากาศ 11 องศา	55



สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

a_b	พื้นที่ผิวต่อหน่วยมวลวัสดุ ; ตารางเมตร/กิโลกรัม
a_R	ค่าอัตราเร่ง ; เมตร/วินาที
a_{Rmax}	ค่าอัตราเร่งสูงสุด ; เมตร/วินาที
a_{Rymax}	ค่าอัตราเร่งสูงสุดในแนวตั้งฉากกับรางเขย่า ; เมตร/วินาที
A_c	พื้นที่หน้าตัดของเบคที่ตั้งฉากกับรางเขย่า ; ตารางเมตร
A_n	ค่าแอมพลิจูดของรางเขย่าในแนวตั้งฉากกับแนวแกนกับรางเขย่า ; เมตร
A_s	พื้นที่ผิวของวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง ; ตารางเมตร
A_R	ค่าแอมพลิจูดของรางเขย่า ; เมตร
CV_g	ค่าความจุความร้อนของอากาศ ; จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส
CV_s	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ; จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส
CV_w	ค่าความจุความร้อนของน้ำ ; จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส
d_s	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ ; เมตร
D_s	ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ; ตารางเมตร/วินาที
E_V	ค่าความพูนของเบคเริ่มต้น
f	ค่าความถี่เขย่า ; 1/วินาที
F	ค่าอัตราการป้อนวัสดุ ; กิโลกรัม/วินาที
F_h	ค่าสัมประสิทธิ์ของแฟกเตอร์ไอน้ำ อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 3.8
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ; เมตร/วินาที
g_n	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตั้งฉากกับแนวแกนเขย่า ; เมตร/วินาที
G	ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ; กิโลกรัม/ตารางเมตร - วินาที
h_b	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ; วัตต์/ตารางเมตร-เซลเซียส
H	ความสูงของเบคที่ไม่มีการสั่น ; เมตร
H_g	ค่าความชื้นของอากาศร้อน ; กิโลกรัม/กิโลกรัมอากาศแห้ง
H_{gi}	ค่าความชื้นของอากาศร้อนที่ทางเข้า ; กิโลกรัม/กิโลกรัมอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

H_{go}	ค่าความชื้นของอากาศร้อนที่ทางออก ; กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมอากาศแห้ง
H_w	ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก ; กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมอากาศแห้ง
L_v	ค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุ ; เมตร / วินาที
k	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสไปยังอากาศ ; กิโลกรัม/วินาที-ตารางเมตร
k_f	ค่าความนำความร้อน ; วัตต์/เมตร-เซลเซียส
K	ค่ากำหนดแฟคเตอร์เครื่องกล , ค่ากำหนดแฟคเตอร์ไฮดรอลิกหรือค่าความเร่งของการสั่น
L	ความกว้างของเบค ; เมตร
$(\Delta P_{mf})_s$	ค่าความดันตกของเบคที่ไม่มีการสั่น ; นิวตัน/ตารางเมตร
$(\Delta P_{mf})_v$	ค่าความดันตกของเบคที่มีการสั่น ; นิวตัน/ตารางเมตร
Q_t	ค่าความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ; จูล/วินาที
$Q_{s,s}$	ค่าความร้อนสัมผัสที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ ; จูล/วินาที
$Q_{s,w}$	ค่าความร้อนสัมผัสที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำในวัสดุ ; จูล/วินาที
Q_v	ค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ ; จูล/วินาที
R_c	ค่าอัตราการอบแห้งคงที่ ; กิโลกรัมน้ำ/วินาที-ตารางเมตร
R_f	ค่าอัตราการอบแห้งที่ช้าลง ; กิโลกรัมน้ำ/วินาที-ตารางเมตร
t_a	เวลาที่วัสดุเริ่มเคลื่อนออกจากรางเขย่า ; วินาที
t_s	เวลาที่วัสดุตกลงบนรางเขย่า ; วินาที
T	ช่วงระยะเวลาหนึ่งที่เรียก ; วินาที
T_{gi}	อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า ; เซลเซียส
T_{go}	อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก ; เซลเซียส
T_{pi}	อุณหภูมิของวัสดุที่ทางเข้า ; เซลเซียส
T_{po}	อุณหภูมิของวัสดุที่ทางออก ; เซลเซียส
$(\Delta T)_{av}$	ค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ ; เซลเซียส
ΔT_b	ค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าและทางออกของวัสดุ ; เซลเซียส
ΔT_w	ค่าผลต่างของน้ำในวัสดุที่ทางเข้าและทางออก ; เซลเซียส
U_g	ค่าความเร็วของอากาศ ; เมตร/วินาที
U_s	ค่าความเร็วขนถ่ายของวัสดุ ; เมตร/วินาที
$(U_{mf})_v$	ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์แบบทั่วไป ; เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

$(U_{mf})_s$	ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์ที่เกิดจากการสั่น ; เมตร/วินาที
V_R	ค่าความแล่นเฉ่า ; เมตร/วินาที
W	ค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ ; กิโลกรัม/กิโลกรัมวัสดุแห้ง
W_s	ค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุ ; กิโลกรัม/กิโลกรัมวัสดุแห้ง
W_1	ค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุเริ่มต้น ; กิโลกรัม/กิโลกรัมวัสดุ
W_2	ค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุสุดท้าย ; กิโลกรัม/กิโลกรัมวัสดุ
Δw	ค่าผลต่างความชื้นของวัสดุก่อนและหลังการอบแห้ง ; กิโลกรัม/กิโลกรัมวัสดุ
x	ความหนาของวัสดุ ; เมตร
X	ความยาวของห้องอบแห้งวัสดุ ; เมตร
α	ค่ามุมโยนที่เป็นมุมวัดได้ระหว่างแกนเฉ่ากับแนวระนาบ ; องศา
β	ค่ามุมลาดเอียง (ลาดลงเป็นบวก ลาดขึ้นเป็นลบ) ; องศา
t	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ; วินาที
λ_w	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ; จูล/กิโลกรัม
ϕ	ค่าแฟคเตอร์รูปทรง (shape factor)
ω	ค่าความถี่หมุนของการเฉ่า ; 1/วินาที
ρ_g	ค่าความหนาแน่นของอากาศ ; กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ρ_s	ค่าความหนาแน่นของวัสดุ ; กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ρ_b	ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุ ; กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
γ_g	ค่าความหนืดจลศาสตร์ของอากาศ ; ตารางเมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร และมักจะเป็นปฏิบัติการหน่วยสุดท้ายเสมอ เนื่องจากวัสดุอบแห้งมีประเภทรูปร่าง และสภาพมากมาย กรรมวิธีการอบแห้งมีมากมายหลายอย่าง การจะเลือกใช้วิธีที่ประหยัดที่สุดจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะพิเศษและโครงสร้างของเครื่องมืออบแห้ง รวมทั้งมีการเลือกใช้อุปกรณ์และสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมด้วย

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นนี้ออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ความร้อนดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายเทไปยังวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ในการศึกษาการอบแห้งมักจะมีการจำลองเครื่องมือการอบแห้ง ซึ่งขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง และกำหนดสภาวะการทำงานให้ได้สภาวะเดียวกับการทำงานจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการการอบแห้งด้วยวิธีการฟลูอิดไคซ์ แต่วัสดุนั้นมีการกระจายขนาดแตกต่างกันมาก ๆ หรือวัสดุที่มีความเหนียว ซึ่งวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบธรรมดาไม่สามารถใช้ได้ จึงได้อาศัยการสั่นเข้ามาช่วยในการฟลูอิดไคซ์ด้วย เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบสั่นโดยใช้ Vibration motor เพื่อให้วัสดุเกิดการฟลูอิดไคซ์ และมีลมร้อนผ่านขึ้นมาสัมผัสกับวัสดุเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสาร

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอุปกรณ์อบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น (Vibration fluidized bed dryer)
2. เพื่อสร้างอุปกรณ์อบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์แบบสั่น
3. เพื่อทดสอบอุปกรณ์และเก็บข้อมูล

1.2 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1. ศึกษาเลือกอุปกรณ์อบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดเชิงกล โดยเน้นเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น
2. ออกแบบอุปกรณ์อบแห้ง และอุปกรณ์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จัดหาเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ และจัดซื้อจัดจ้าง
4. ทำการติดตั้งระบบ
5. ทดสอบการทำงานเปรียบเทียบผลการออกแบบ
6. สรุปงานและเขียนรายงาน Project



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การอบแห้งและทฤษฎีฟลูอิดไอเซชัน

การอบแห้ง หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ถ่ายเทจะเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Heat of Vaporization) และความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ (Sensible Heat) ในกระบวนการอบแห้งจะเกิดการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อนในเวลาเดียวกันและมักจะเป็นกระบวนการสุดท้ายในกระบวนการผลิต

จุดประสงค์ของการอบแห้ง เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เก็บไว้ได้นานลดปริมาณและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในการเก็บและส่ง ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดจากความชื้นภายในผลิตภัณฑ์

2.1 ความชื้นในวัสดุ

2.1.1 ปริมาณความชื้น (คัดจากวัสดุเปียก) และอัตราส่วนความชื้น (คัดจากวัสดุแห้ง)

วิธีแสดงความชื้น (น้ำ) ที่มีอยู่ในวัสดุเปียกมี 2 แบบ คือ อัตราส่วนความชื้น ซึ่งคิดโดยเปรียบเทียบกับวัสดุที่แห้ง (ไร้ น้ำ) และปริมาณความชื้น ซึ่งคิดเปรียบเทียบกับวัสดุเปียก แบบแรก จะเรียกสั้น ๆ ว่า อัตราส่วนความชื้น ส่วนแบบหลังจะเรียกสั้น ๆ ว่า ปริมาณความชื้น ถ้าให้ W_d (kg/kg dry stock) เป็นอัตราส่วนความชื้นและ W_w (kg/kg wet stock) เป็นปริมาณความชื้น ความสัมพันธ์ระหว่างสองแบบนี้จะเป็นดังนี้

$$W_w = W_d / (1 - W_d) \quad (2.1)$$

$$W_d = W_w / (1 + W_w) \quad (2.2)$$

2.1.2 อัตราส่วนความชื้นสมดุล

เมื่อวางวัสดุเปียกไว้ในก๊าซ หรือ อากาศ ที่มีอุณหภูมิคงที่และความชื้นคงที่ วัสดุนั้นจะแห้งขึ้นหรือดูดความชื้นเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ภาวะสมดุล อัตราส่วนความชื้นในที่นี้เรียกว่า อัตราส่วนความชื้นสมดุล ค่าของอัตราส่วนความชื้นสมดุลจะขึ้นอยู่กับ ประเภทของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นของก๊าซ หรือ อากาศ

2.1.3 อัตราส่วนความชื้นอิสระ

อัตราส่วนความชื้นในวัสดุที่สามารถกำจัดได้โดยการอบแห้ง จะเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นแรกเริ่มของวัสดุ และอัตราส่วนความชื้นสมดุล ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น ๆ อัตราส่วนความชื้นที่กำจัดออกได้นี้เรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ

2.1.4 อัตราส่วนความชื้นวิกฤต

ในระหว่างการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนจากช่วงการอบแห้งที่เร็วคงที่เป็นช่วงความเร็วลดลง เรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต ค่าของอัตราส่วนความชื้นวิกฤตนี้จะเปลี่ยนตามประเภทของวัสดุ วิธีการอบแห้ง เงื่อนไขการอบแห้ง เป็นต้น

2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนของการอบแห้ง

เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อนมาเกี่ยวข้อง จึงอาจแบ่งลักษณะการอบแห้งตามกลไกการถ่ายเทความร้อน ได้เป็น

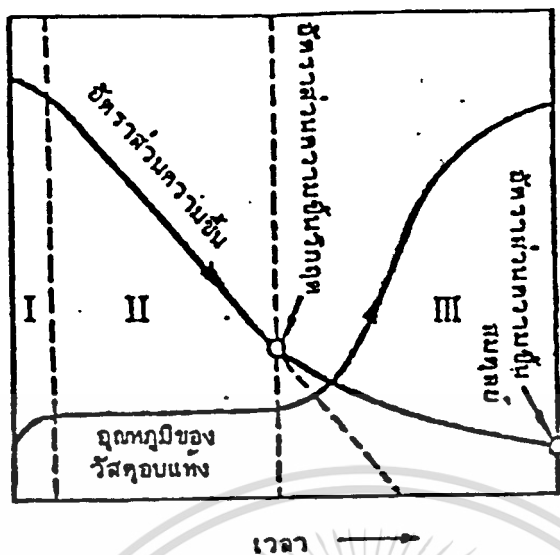
1. การอบแห้งโดยอาศัยกระบวนการพาความร้อน
2. การอบแห้งโดยอาศัยกระบวนการนำความร้อน
3. การอบแห้งโดยอาศัยกระบวนการแผ่รังสีความร้อน

โดยทั่วไปมักพบการอบแห้งโดยกระบวนการพาความร้อน และการนำความร้อนเป็นส่วนมาก การอบแห้งโดยกระบวนการแผ่รังสีจะถูกพบน้อยมาก แต่บางครั้งอาจเกิด 3 แบบ ร่วมกันการพิจารณาแยกกลไกการถ่ายเทความร้อนเป็นส่วน ๆ ได้ก็ต่อเมื่อการถ่ายเทความร้อนแบบนั้น ๆ มีผลมากที่สุด และสำคัญกว่าแบบอื่นมาก

2.3 อัตราการอบแห้ง

2.3.1 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)

เมื่อมีการอบแห้งวัสดุภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ ตัวอย่างเช่นในกรณีที่วัสดุเปียกชื้นภายในกระแสดลมปริมาณมาก ที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ ถ้าวัดการเปลี่ยนแปลงมวล และอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งนี้กับเวลาจะได้เส้นกราฟแสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการอบแห้งกับเวลา

ที่ผิววัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง 1 ในรูปที่ 2.1 ในช่วงเวลา 2 อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก วัสดุที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากรูป อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง 2 นี้ ดังนั้น ความเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant drying rate) ในช่วงที่ 3 ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุที่จะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุ ดังนั้น ผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับ นอกจากจะลดลงแล้วความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง 2 และ 3 คือ อัตราส่วนความชื้นวิกฤต ในกรณีของวัสดุที่ช่วง 2 และ 3 มีเวลานานมากจะไม่คำนึงถึง 1 ก็ได้ อนึ่งในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้น หรือในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิดอาจไม่มีช่วง 2 เลยก็ได้

เงื่อนไขของการอบแห้งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไขภายนอก วัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้ง และเงื่อนไขภายในวัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุ และวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายใน ได้แก่ องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปร่าง อัตราส่วนความชื้น อัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุที่อบแห้ง เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความเร็วของการอบแห้งมี เช่น R (kg water/hr.m² drying area), R_w (kg water/hr.kg dry solid) เป็นต้น ถ้าให้ W เป็นมวล (kg) ของวัสดุแห้ง และ A เป็นพื้นที่ (m²) ของการอบแห้งจะได้

$$R = R_w(W/A) \quad (2.3)$$

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง และอัตราส่วนความชื้น W เรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลาในรูป 2.1 คือ R_w นั่นเอง ถ้าเขียนกราฟของ R_w (หรือ R) กับ W จะได้รูป 2.2

2.3.2 ช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate of Drying)

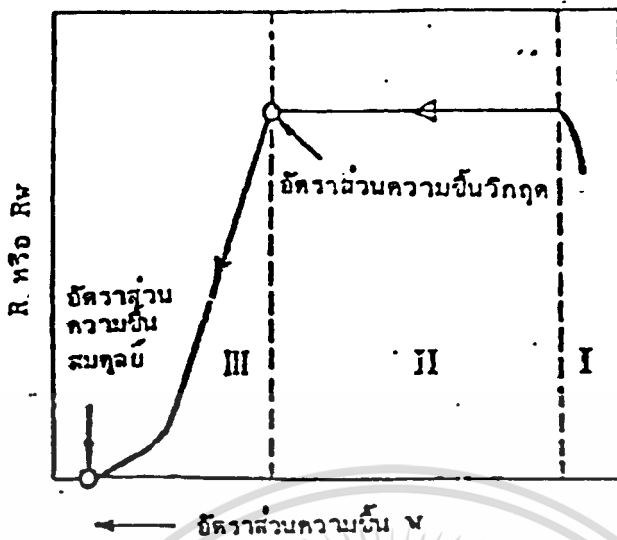
ส่วนใหญ่แล้วช่วงของอัตราการอบแห้งคงที่ จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการอบแห้งภายนอกวัสดุ ในกรณีที่วัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนเท่านั้น อุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะเปียก ดังนั้น อัตราการอบแห้งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_c = -dw/d\theta = h_s(T_g - T_s)/\lambda_w \quad (2.4)$$

ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลจะได้

$$R_c = k(H_w - H_g) \quad (2.5)$$

เมื่อ	R_c	ค่าอัตราการอบแห้งคงที่	, กิโลกรัมน้ำ/วินาที-เมตร ²
	W	ค่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุ	, กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมวัสดุแห้ง
	θ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	, วินาที
	T_g, T_s	อุณหภูมิของลมร้อนและวัสดุ	, เซลเซียส
	λ_w	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	, จูล/กิโลกรัม



รูปที่ 2.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

- h_s ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวสัมผัสไปยังอากาศ, วัตต์/เมตร² เซลเซียส
- k ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสไปยังอากาศ, กิโลกรัม/วินาที - เมตร²
- H_g ความชื้นของลมร้อน, กิโลกรัม น้ำ / กิโลกรัม อากาศแห้ง
- H_w ความชื้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, กิโลกรัม น้ำ / กิโลกรัม อากาศแห้ง

2.3.3 ช่วงของอัตราการอบแห้งที่ช้าลง (Falling Rate of Drying)

ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในวัสดุ วิธีการอบแห้ง เงื่อนไขการอบแห้ง เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สลับซับซ้อน ดังนั้น วิธีทั่วไปสำหรับหาอัตราการอบแห้งนี้จึงยังทำได้ลำบาก นอกจากนี้กลไกของการเคลื่อนที่ของน้ำภายในช่วงวัสดุในช่วงเวลานี้ก็สลับซับซ้อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) การแพร่ของน้ำเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้น
- 2) การเคลื่อนที่ของน้ำเนื่องจากแรงตอรูเอิม
- 3) การระเหยของน้ำเป็นไอแล้วจึงแพร่ออกจากวัสดุ
- 4) การเคลื่อนที่เนื่องจากเกรเดียนต์ของความดันที่เกิดจากการหดตัวของวัสดุ

ในกรณีที่วัสดุมีเนื้อแน่นและสม่ำเสมอ การระเหยเกิดจากผิวด้านเดียวของวัสดุ อัตราการอบแห้งที่ช้าลงจะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_f = -dw/d\theta = \pi^2 D_s (W - W_s) / (4X^2) \tag{2.6}$$

เมื่อ R_f คือค่าอัตราการอบแห้งที่ช้าลง, กิโลกรัม น้ำ / วินาที X ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_s ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ , เมตร²/วินาที

X ความหนาแน่นของวัสดุ , เมตร

W_s ค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุ , กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมวัสดุแห้ง

ในกรณีที่มีการระเหยเกิดขึ้นจากผิวทั้งสองด้านให้ใช้ $X/2$ แทนค่าในสมการ (2.6)

สมการดังกล่าวใช้ได้กับ ช่วงเวลาทั้งหมดของการอบแห้งวัสดุจำพวก ฝ้าย , เจลาติน , กาว และช่วงเวลาสุดท้ายของการอบแห้งไม้ , แป้ง , สิ่งทอ , กระดาษ , ดินเหนียว เป็นต้น

จากการอินทิเกรตสมการ 2.6 จะได้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งดังสมการต่อไปนี้

$$\theta = 4X^2 \ln[(W_1 - W_s)/(W_2 - W_s)] / (\pi^2 D_{s,av}) \quad (2.7)$$

เมื่อ W_1, W_2 เป็นอัตราส่วนความชื้นของวัสดุเริ่มต้นและสุดท้าย , กิโลกรัมน้ำ/กิโลกรัมวัสดุ

2.4 การแบ่งประเภทเครื่องมือการอบแห้งชนิดต่าง ๆ

ปัจจุบันมีเครื่องมืออบแห้งหลายชนิด จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุที่จะอบแห้ง วิธีการแบ่งเครื่องอบแห้งโดยวิธีการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งเป็น

1. เครื่องอบแห้งที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน เช่น เครื่องอบแห้งแบบถาด เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เป็นต้น
2. เครื่องอบแห้งที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน เช่น เตาอบ เครื่องอบแห้งแบบครัม เป็นต้น
3. เครื่องอบแห้งที่อาศัยการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน เช่น เครื่องอบแห้งโคไซน์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

การแบ่งเครื่องอบแห้งตามลักษณะทางกายภาพของวัสดุ จะทำได้โดยดูลักษณะที่เหมาะสม เช่น วัสดุที่มีลักษณะเป็นผงควรใช้เครื่องอบแห้งที่มีการกระจายวัสดุหรือวัสดุที่มีลักษณะเป็นชิ้นจะต้องใช้การวางวัสดุกับภาชนะแล้วใช้ความร้อนเป่าผ่าน เป็นต้น

2.5 ชนิดของเครื่องอบแห้งที่สำคัญ

2.5.1 เครื่องอบแห้งแบบถาด

เครื่องอบแห้งแบบนี้เป็นแบบที่ง่ายที่สุด วัสดุจะถูกวางบนถาดมีจำนวน 10 ถึงมากกว่า 20 ชั้น มักใช้ความร้อนไหลผ่านขนานกับถาด การทำงานมีลักษณะเป็นกะ และใช้อบแห้งวัสดุที่มีปริมาณไม่มากนัก ข้อเสียของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะพบว่าบริเวณใกล้ทางเข้าของอากาศร้อนการแห้งของวัสดุจะเร็วกว่าบริเวณทางออกของอากาศร้อน ดังนั้น จึงต้องมีการสลับถาดเสมอเครื่องอบแห้งวัสดุแบบถาดเหมาะสมจะใช้ออบวัสดุที่เป็นชิ้น เช่น ผลไม้ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์

ลักษณะของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะคล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบถาดที่ทำงานต่อเนื่องโดยใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุที่ถูกอบแห้งผ่านอุโมงค์ มักใช้รดเย็นเป็นตัวพาวัสดุเคลื่อนที่ อากาศร้อนไหลผ่านตั้งฉาก สวนทางหรือไหลตามวัสดุก็ได้ ปัญหาที่อาจเกิดกับเครื่องอบแห้งชนิดนี้ คือ การกระจายของอากาศร้อนไม่สม่ำเสมอ ทำให้วัสดุแห้งไม่เท่ากัน

2.5.3 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี

เป็นเครื่องอบแห้งที่อบแห้งวัสดุ โดยการหมุนอยู่ภายในทรงกระบอกที่มีลมร้อนไหลผ่าน อัตราการอบแห้งจะสูง และต้องใช้ปริมาณอากาศร้อนมาก ความเร็วรอบของอากาศจะต้องพอเหมาะเพื่อให้การตกของวัสดุดีที่สุด มักใช้อบแห้งวัสดุที่เป็นผลึก เช่น น้ำตาล

2.5.4 เครื่องอบแห้งแบบครีม

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกปิด ภายในทรงกระบอกมีการให้ความร้อน วัสดุที่ถูกอบแห้งมีลักษณะเป็น Slurry หรือ Paste วัสดุที่แห้งจะติดที่ผิวของทรงกระบอก ซึ่งจะต้องมีมีดขูดออก

2.5.5 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เป็นเครื่องอบแห้งที่เป็นผลิตภัณฑ์แบบของเหลว เมื่ออบแห้งแล้วจะได้วัสดุที่เป็นผงนำไปละลายได้ง่าย การอบแห้งจะใช้การพ่นสารละลายเป็นฝอย สวนทางหรือไหลตามกับอากาศมักใช้อบแห้งกับวัสดุที่ต้องการเป็นผงละเอียด เช่น กาแฟ นม เป็นต้น

2.5.6 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบค

เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็ก ลมร้อนจะเป็นตัวทำให้วัสดุลอยตัวและเคลื่อนไหวในอากาศได้ วัสดุที่อบแห้งจะมีน้ำหนักลดลงเรื่อย ๆ และจะถูกพาออกไปแยกจากอากาศร้อนที่ไซโคลน ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งแบบนี้ เช่น ผงชูรส เป็นต้น

2.5.7 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้กับวัสดุที่เป็นผงหรือฝุ่น สามารถถูกพาไปกับลมร้อนได้ง่าย การอบแห้งจะเกิดขณะที่วัสดุพาไปกับลมร้อน และออกจากลมร้อนที่ไซโคลน วัสดุที่ใช้ในการอบแห้งแบบนี้ เช่น แป้ง เม็ดพลาสติก เป็นต้น

2.5.8 เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั่น

เป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุที่มีการกระจายขนาดแตกต่างกันมาก ๆ หรือวัสดุที่มีความเหนียว ซึ่งวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบคแบบปกติไม่สามารถใช้ได้ เครื่องอบแห้งชนิดนี้อาศัยการสั่นโดยใช้ Vibration motor เพื่อให้วัสดุเกิดการฟลูอิดไคซ์ และมีลมร้อนผ่านขึ้นมาจากวัสดุ เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสาร

บทที่ 3

การชนด้วยวัสดุโดยใช้รางเขย่าแบบไวเบรเตอร์

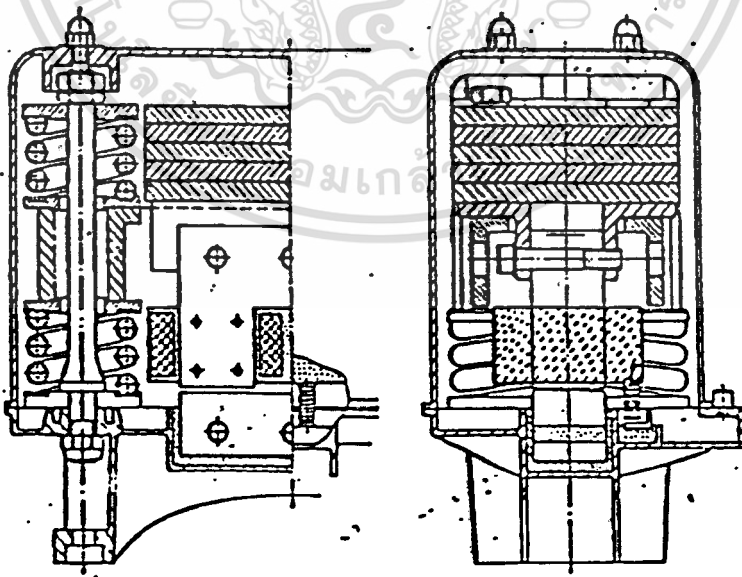
การชนด้วยวัสดุสามารถทำได้โดยใช้รางเขย่าแบบไวเบรเตอร์ซึ่งใช้หลักการเขย่าให้เกิดสาร์มอนิกทางเส้นตรงให้เกิดมีมุมโยนไปข้างหน้าในแนวระนาบ มวลวัสดุชนด้วยจะแล่นไปหน้าอย่างโยนๆ กล่าวคือ ในขณะที่รางเขย่ารีบแล่นดอยหลังจะเท่ากับผลักให้มวลวัสดุนั้นๆแล่นโยนตัวไปข้างหน้าได้

3.1 ประเภทของรางเขย่าแบบไวเบรเตอร์

รางเขย่าแบบไวเบรเตอร์สามารถแบ่งตามต้นกำลังขับเคลื่อนรางเขย่าไวเบรเตอร์ได้ 3 ประเภทคือ

1. ระบบเขย่าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

มีลักษณะสร้างที่ประกอบด้วยรางที่มีน้ำหนักพอสมควร คู่แม่ถ่วงน้ำหนักและฐานสปริงทั้งระบบขับเคลื่อนด้วยชุดไวเบรเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดมีกอนเขย่า 2 ก้อน ด้วยความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ ตัวฐานสปริงนั้นส่วนมากสร้างเป็นสปริงที่กดอัดไว้ด้วยแกนเกลียว หรือใช้สปริงแผ่นก็ได้ ระบบเขย่าด้วยแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไม่เหมาะสมกับอัตราการชนด้วยจำนวนมากๆ และไม่เหมาะใช้ชนด้วยวัสดุที่อาจจับตัวเป็นก้อนในรางที่ลาดเอียงได้ ไวเบรเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูป 3.1



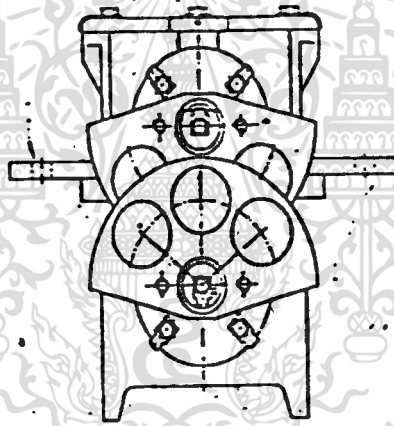
รูปที่ 3.1 ลักษณะสร้างของไวเบรเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระบบเขย่ำด้วยมอเตอร์เขย่ำ

มีลักษณะสร้างสี่ขั้ว นานๆครั้งอาจพบสองหรือหกขั้ว และเป็นมอเตอร์ที่ไม่ได้เป็นประเภทซินโครนัส มีแบริงแข็งแรง บนเพลลาหมุนมีก้อนแคมติดอยู่เพื่อใช้เป็นจานหมุนเขย่ำ จุดจานเขย่ำนี้มีส่วนประกอบหลายส่วน ส่วนมากจะพบจั่ววางไว้อย่างไม่เป็นขั้นตอน ให้บังเกิดแรงเหวี่ยงออก ณ บางตำแหน่งเป็นจุดๆ มอเตอร์เขย่ำชุดหนึ่งๆ จะมีจุดเหวี่ยงเขย่ำนั้นจะหมุนกระแทกที่จุดศูนย์กลางของรางเขย่ำนั้นๆ เป็นคลื่นเขย่ำแบบวงกลม ทำให้สามารถขนถ่ายลงไปตามลาดของรางได้

มอเตอร์เขย่ำนี้ทนทานต่อการโอเวอร์โหลดต่อการที่วัสดุเกาะติดเป็นก้อน และต่อการเปลี่ยนแปลงของศักย์ในสายไฟได้ดีมาก จึงเหมาะกับการใช้งานที่ห้องสามารถปรับช่วงเขย่ำได้กว้างในงานที่ต้องการความเร็วขนถ่ายคงที่ หากต้องการเปลี่ยนอัตราขนถ่ายส่วนมากจะกระทำได้โดยเปลี่ยนความสูงของแผ่นหมุนที่ใช้กระแทกเขย่ำนั่นเอง ลักษณะของมอเตอร์เขย่ำแสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 มอเตอร์เขย่ำ

3. ระบบเขย่ำด้วยเพลาลูกเบี้ยว

รางเขย่ำแบบนี้ มีความเร็วขนถ่ายในอัตราที่เปรียบเทียบกับสองแบบแรกแล้วสูงกว่า ดังนั้นด้วยอัตราขนถ่ายเท่าๆกัน รางเขย่ำแบบนี้อาจมีขนาดเล็กกว่าได้ จึงทำให้ประหยัดกว่า รางเขย่ำโดยทั่วไปจะติดตั้งอยู่บนชุดสปริงแหนบ หรือบนชุดลูกยางกันสะเทือนที่ใช้ประกอบกับกรอบโครงที่สามารถต้านทานแรงโหลดได้อย่างหนัก ตัวต้นกำลังจะต้องมีทอคสาคสูง ส่วนการใช้งานจะใช้เพียงกำลังที่สามรถเอาชนะความสูญเสียที่จุดกำลังต่างๆ ได้เท่านั้น

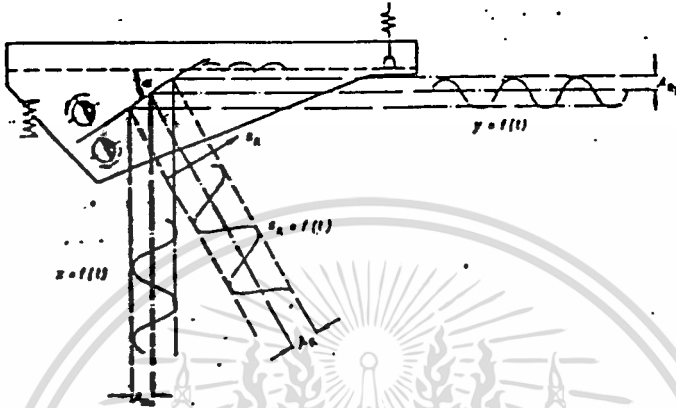
3.2 การคำนวณระบบรางเขย่ำ

3.2.1 อัตราการขนถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอน ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 อัตราการขนถ่ายนั้นคำนวณได้จากสูตรที่ใช้ค่าความเร็วขนถ่าย ดังสมการดังนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_v = 3600 A_c U_p \quad (3.1)$$

- เมื่อ L_v ค่าอัตราการชนด้วยวัสดุ ,เมตร³/วินาที
 A_c พื้นที่หน้าตัดของเบคที่ตั้งฉากกับรางเขย่า, เมตร²
 U_p ค่าความเร็วชนด้วย , เมตร/วินาที



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการเขย่าของราง

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าลักษณะการเขย่าของราง $S_R = f(t)$ ซึ่งสามารถแยกออกเป็นแรงย่อยในแกน x และ y รางเขย่าที่เล่นในทิศทาง S_R จะมีสารโมดิกของการเขย่าตามสมการดังนี้

$$S_R = A_R \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

ค่าแอมพลิจูด A_{Rx} และ A_{Ry} ของแรงเขย่าย่อยหาได้จาก

$$A_{Rx} = A_R \cos\alpha \quad (3.3)$$

$$A_{Ry} = A_R \sin\alpha \quad (3.4)$$

ดังนั้นจากฟังก์ชัน $x = f(t)$ และ $y = f(t)$

$$x = A_R \cos\alpha \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

$$y = A_R \sin\alpha \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

ค่าความถี่หมุนของการเขย่าหาได้จากสมการ

$$\omega = 2\pi f \quad (3.7)$$

เมื่อ A_R ค่าแอมพลิจูดของรางเขย่า (ค่าแอมพลิจูดงาน) ,เมตร

α ค่ามุมโยน คือเป็นมุมที่วัดได้ระหว่างแกนเขย่ากับแนวระนาบ ,องศา

ω ค่าความถี่หมุนของการเขย่า ,วินาที⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

f ค่าความถี่เขย่า , วินาที⁻¹
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระยะเด่นเขย่าของรางเขย่า จะสามารถกำหนดค่าความเร็วเด่นเขย่าและอัตรา
เร่งได้จากสมการต่อไปนี้

$$v_R = A_R \omega \cos(\omega t) \quad (3.8)$$

$$a_R = A_R \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.9)$$

เมื่อ v_R ค่าความเร็วเด่นเขย่า ,เมตร/วินาที

a_R ค่าอัตราเร่ง ,เมตร/วินาที²

ค่าอัตราเร่งสูงสุดนั้นจะปรากฏ ณ $\sin(\omega t) = 1$ ซึ่งเป็นจุดเด่นกลับของระยะเขย่า

พอดี

$$a_{Rmax} = A_R \omega^2 \quad (3.10)$$

$$a_{Rymax} = A_R \omega^2 \sin\alpha \quad (3.11)$$

เมื่อ a_{Rmax} ค่าอัตราเร่งสูงสุด ,เมตร/วินาที²

a_{Rymax} ค่าอัตราเร่งสูงสุดในแนวตั้งฉากกับรางเขย่า ,เมตร/วินาที²

ค่าอัตราเร่งต่างๆเหล่านี้ ให้เปรียบเทียบกับอัตราถ่วงของโลก g ทำให้เกิดค่า

กำหนดใหม่ที่สำคัญยิ่งขึ้นอีกสองค่า ได้แก่ กำหนดแพคเตอร์ไฮนตัว และกำหนดแพคเตอร์เครื่อง
กล

กำหนดแพคเตอร์ไฮนตัวหรือค่าความเร่งของการสั่น

$K = \text{อัตราเร่งสูงสุดของรางเขย่าวัดในแนวตั้งฉากกับระนาบขนด้าย}$

$\text{อัตราถ่วงของโลกวัดในแนวตั้งฉากกับระนาบขนด้าย}$

กรณีระนาบขนด้ายของรางเขย่าอยู่ในแนวระนาบขนานกับพื้นโลก

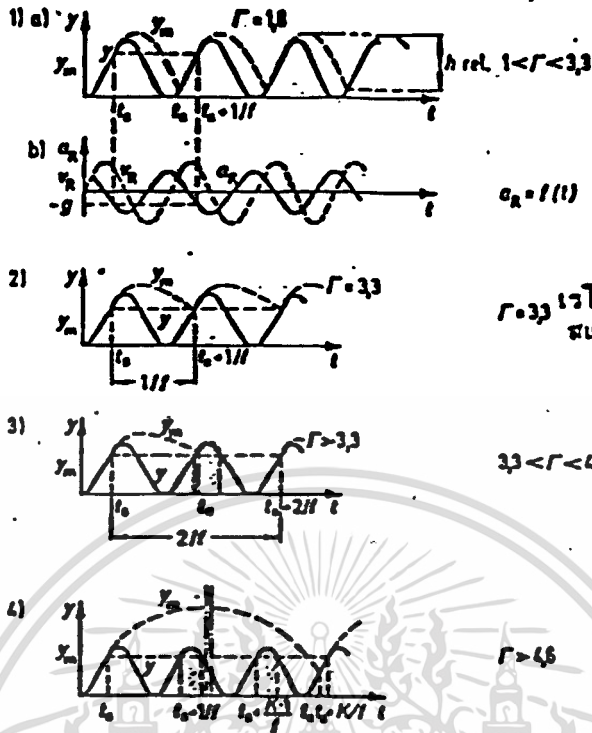
$$K = A_R \omega^2 \sin\alpha / g \quad (3.12)$$

เมื่อ K ค่ากำหนดแพคเตอร์ไฮนตัว

g ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ,เมตร / วินาที²

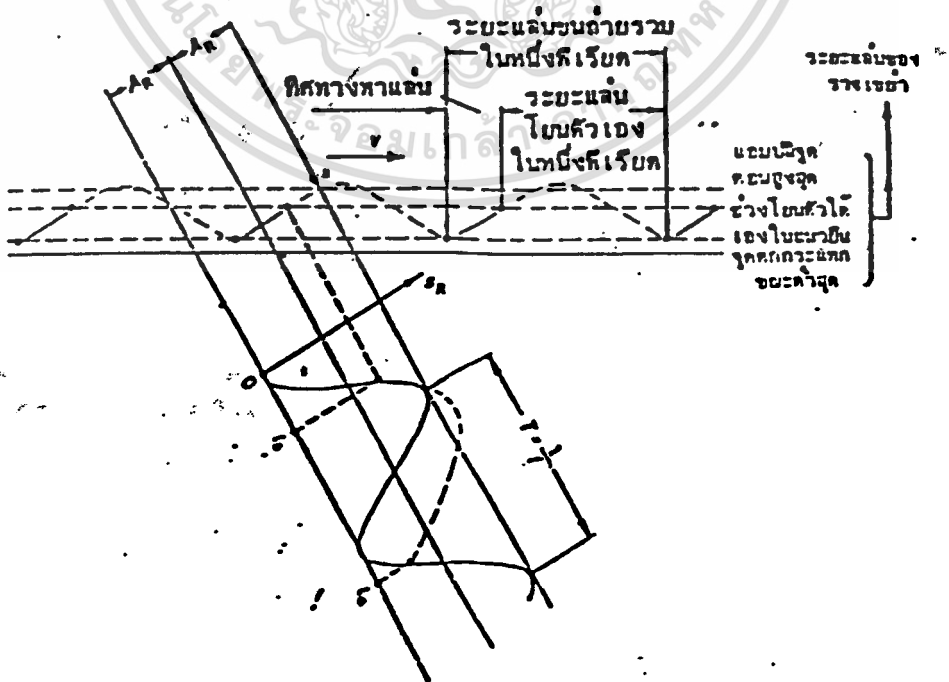
หากมุม β เป็นมุมลาดเอียงจริงๆ ของรางเขย่าที่ทำกับแนวระนาบ ขนานกับพื้น

โลกดังรูป 3.4



เขตคลื่นไม่เป็นระเบียบ (I) $\Gamma = 3.3 \dots 4.6$
 (II) $\Gamma = 6.36 \dots 7.79$
 ในกรณี (III) Γ ค่าอื่น ๆ ถัดไป

รูปที่ 3.5 ทิศทางเคลื่อนเข้าในแนวขั้วของรางเข้า และของชิ้นวัสดุขนถ่ายด้วยค่ากำหนด แพคเกจต่างๆ



เอกสารรูปที่ 3.6 โคออร์ดิเนตการขยับ โบนด์ของชิ้นมวลวัสดุขนถ่ายที่ละน้อยๆ ขณะวางแผ่นเข้า เน้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากำหนดแฟกเตอร์โซนตัวที่มากกว่า 1 เพียงเล็กน้อยนั้น อธิบายได้ว่ารางสึกหรอมาก หรือจะทำให้รางเข่าสึกหรอได้มากกว่าปกติ และค่าความเร็วขนถ่ายต่ำ ระยะทางช่วงจรขนถ่ายมิได้ใช้ประโยชน์เท่าที่ควร หรือไม่มีระยะโซนตัวได้เองได้มากจึงไม่เป็นประโยชน์ต่อเมื่อเพิ่มค่าขึ้น การสึกหรอของรางเข่าจึงจะลดลงได้

ในขณะที่ $K=3.3$ is จะเท่ากับ ia ขณะนั้นเรียกว่ามีสแตติครโซแนนซ์ ทั้งค่าความเร็วขนถ่ายของแอมพลิฟูดที่กำหนดให้ และค่ามุมโซนตัวจะมีค่ามากที่สุด หมายความว่าที่เรียกของไวเบรเตอร์ แต่ละค่าจะนำไปใช้งานขนถ่ายได้มากที่สุดนั่นเอง

ในช่วงพิสัย $3.3 < K < 4.6$ ขึ้นมวลวัสดุขนถ่ายจะโซนตัวได้สูงมาก กล่าวคือค่าอัตราเร่งที่วัดได้ในแนวแกน x จะมีค่าน้อยมาก จะมีมากก็แค่ค่าอัตราเร่งในแกน y ผลคือขึ้นวัสดุขนถ่ายนั้นๆ จะขึ้นอยู่กับที่บนรางเข่านั้นเอง



รูปที่ 3.7 ระยะช่วงโซนตัวของขึ้นมวลวัสดุขนถ่ายบนรางเข่าไวเบรเตอร์

จากรูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งเคลื่อนที่ของขึ้นมวลวัสดุขนถ่าย ขณะถูกขับเคลื่อนเปรียบเทียบกับตัวรางเข่า ตำแหน่งตัวรางเข่าเขียนด้วยเส้นค้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความเร็วชนด้าวัตคูในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดรซ์แบบตันทัน
การคำนวณจะคำนึงถึงความเร่งของการสั่นโดยหาได้จาก

$$U_g = (K_1 - K_2 \sin \beta) K \omega \cos(\alpha + \beta) [1 - (1/K^2)]^{0.5} \quad (3.14)$$

โดย $K = A_R \omega^2 / [\sin(\alpha + \beta) / g \cos \beta] \quad (3.15)$

- เมื่อ
- α ค่ามุมโยน คือเป็นมุมที่วัดได้ระหว่างแกนเข่ากับแนวระนาบ , องศา
 - ω ค่าความถี่หมุนของการเข่า , วินาที⁻¹
 - β มุมลาดเอียง (ลาดลงเป็นบวก ลาดขึ้นเป็นลบ) , องศา
 - K ความเร่งของการสั่น
 - K_1, K_2 ค่าคงที่โดยวัสดุที่เป็น fine power (K_1 : 0.2-0.5 , K_2 : 2-5)



บทที่ 4

เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น

เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่นเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับวัสดุที่มีการกระจายขนาดแตกต่างกันมาก ๆ หรือวัสดุที่มีความเหนียว โดยวัสดุที่จะอบแห้งนี้จะต้องใช้วิธีการอบแห้งด้วยวิธีการฟลูอิดไคซ์ แต่การฟลูอิดไคซ์แบบธรรมดาไม่สามารถทำได้ จึงต้องอาศัยการสั่นเข้ามาช่วยในการเกิดฟลูอิดไคซ์ โดยใช้ vibration motor และมีลมร้อนผ่านขึ้นมาสัมผัสกับวัสดุเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสาร

4.1 ข้อดีของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น

1. เนื่องจากการฟลูอิดไคซ์เกิดจากการสั่น จึงทำให้สามารถฟลูอิดไคซ์วัสดุที่เกาะกันหรือวัสดุที่มีความเหนียวได้ง่าย
2. เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในเครื่องอบแห้งชนิดนี้ มีค่าต่ำกว่าความเร็วสูงสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ จึงทำให้อัตรการไหลของอากาศให้น้อยลงได้ และลดปริมาณวัสดุที่หลุดลอยออกไปให้น้อยลงได้
3. การสั่นช่วยทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารได้ดีขึ้น
4. สามารถควบคุมเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ง่าย โดยการปรับความถี่หรือแอมพลิจูดของการสั่น
5. ความดันตกที่เกิดขึ้นระหว่างเบดมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบปรกติ
6. การเคลื่อนที่ของวัสดุภายในเครื่องอบแห้งเป็นแบบท่อไหล (plug flow)

4.2 ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น

เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบสั่น เกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซฟลูอิดไคซ์เบด (gas fluidized bed) และการขนถ่ายแบบสั่น (vibrated conveyer)

Gas - fluidized beds สามารถแสดงในรูปของ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์ (U_{mf}) และสำหรับความเร็วอากาศ (U_g) ที่เกินค่า U_{mf} ความดันตก (ΔP_{mf}) จะมีค่าคงที่ และสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของอากาศที่ผ่านตลอดทั่วทั้งเบดทำให้ฟองก๊าซเพิ่มมากขึ้น เรียกว่า aggregative fluidization (non homogeneous) โดยทั่วไปก๊าซฟลูอิดไคซ์เบดจะทำงานที่ความเร็ว 2 - 5 เท่าของ U_{mf}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การสั่นจะไปขัดขวางการเกิดฟองก๊าซทำให้เบดเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและใช้ความเร็วของอากาศในการเกิดฟลูอิดไคซ์ต่ำลงไปด้วย



การขนถ่ายแบบการสั่น (vibrated conveyer) สามารถอธิบายโดยใช้ตัวแปร คือ ความเร่งของการสั่น (vibrated acceleration) ซึ่งเป็นค่าความเร่งในแนวตั้งเทียบกับความเร่งในแนวโน้มถ่วงของโลก การเคลื่อนที่ของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเร่งของการสั่นมีค่ามากกว่า 1 และไม่เกิน 3.3

4.3 ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น

4.3.1 หลักการทำงาน (Operating Regimes)

ลักษณะของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยการสั่น แตกต่างจากการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบทั่วไป คือการเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยทั่วไป จะเกิดทางด้านบน แต่ในกรณีของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดโดยการสั่น การเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจะเกิดทางชั้นล่างของอนุภาคโดยการทำงานของระบบการสั่น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของความเร่งในการสั่น (vibrated acceleration) สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1.vibrated state เมื่อ $A_n \omega^2 / g_n < 1$ เบดประพฤติตัวแบบฟลูอิดไดซ์แบบปกติ การสั่นจะช่วยปรับปรุงความเสถียร (stability) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) ของชั้นฟลูอิดไดซ์เท่านั้น

2.Vibro fluidized layer เมื่อ $A_n \omega^2 / g_n \approx 1$ ทั้งการไหลของก๊าซและการสั่นทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยพบว่าไม่มีผลต่อพฤติกรรมของเบดพอกๆกัน

3.Vibrated fluidized layer เมื่อ $A_n \omega^2 / g_n > 1$ เบดจะถูกกระทำ ด้วยแรงจากการสั่นเท่านั้น ซึ่งเบดมีแนวโน้มที่จะไฮดรอลิเซชัน ลักษณะแบบนี้อาจถือได้ว่าเป็นแบบ piston - cylinder model ภายใต้อาการสั่นนี้ อากาศถูกใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเท่านั้น

4.3.2 ลักษณะของเบด (Bed Characteristics)

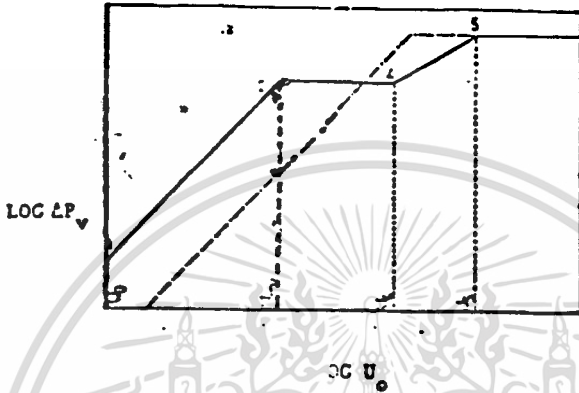
การสั่นจะช่วยให้การพรุนของเบด (bed porosity) สัมผัสหมดตลอดพื้นที่หน้าตัดของเบด และความพรุนของเบดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของของการสั่น กล่าวคือถ้าแอมพลิจูดของของการสั่น มีค่ามาก ความพรุนของเบดจะมาก และแอมพลิจูดของของการสั่นน้อย ความพรุนของเบดจะน้อย

4.4 Aerodynamics

การเกิดฟลูอิดไดซ์เกิดขึ้นเมื่อแรงโน้มถ่วงที่กระทำบนอนุภาค ที่มีค่าสมดุลกับผลรวมของ drag force และองค์ประกอบในแนวตั้งของแรงสั่น ผลของการสั่นจะมีผลน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์

การวิจัยเกี่ยวกับ Aerodynamics ของการเกิดฟลูอิดโคจซ์แบบสั้น สามารถแบ่งได้ เป็น 2 ประเภท

4.4.1 Time averaged pressure drop



รูปที่ 4.1 โคจรแกรมแสดงความดันตกและความเร็วของอากาศในการเกิดฟลูอิดโคจซ์

ลักษณะเด่นของกราฟรูปที่ 4.1 คือในกรณีที่เกิดฟลูอิดโคจซ์โดยการสั้น กราฟจะขนานกับแนวนอน 2 ช่วง ขณะที่การเกิดฟลูอิดโคจซ์ทั่วไป กราฟจะขนานแนวนอนเพียงช่วงเดียว สังเกตได้ว่า zone 4-5 ขยายเพิ่มขึ้นจาก zone 3 - 4 ตามความแรงของการสั้น และที่ค่าความแรงของการสั้นสูงพอ ($A_n \omega^2 / g_n$) zone 3 - 4 จะหายไป

ก่อนการเกิดฟลูอิดโคจซ์ ความดันตกของเบคที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ของการสั้นเมื่อเบคเริ่มเกิดการฟลูอิดโคจซ์ ความดันตกจะลดลงตามความถี่ของการสั้น และมีค่าเป็นลบสำหรับอนุภาคที่ละเอียด Reed and Fenske พบว่าอัตราการไหลของอากาศ มีผลต่อความดันตกของเบคสำหรับความถี่ของการสั้นและความเร็วของอากาศค่าเท่านั้น

Gupta and Majumda ได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับความดันตกของเบค ว่าเป็นฟังก์ชันกับพารามิเตอร์ของการสั้น ดังนี้

$$(\Delta P_{mf})_v / (\Delta P_{mf})_s = 1 - 0.935 (d_s / H)^{0.046} (A_n \omega^2 / g_n)^{0.606} \Phi^{1.637} \quad (4.1)$$

โดย $(\Delta P_{mf})_s = Hg (\rho_s - \rho_g)(1 - E_{mf})$

เมื่อ $(\Delta P_{mf})_v$ ค่าความดันตกของเบคที่มีการสั้น , นิวตัน/เมตร²

$(\Delta P_{mf})_s$ ค่าความดันตกของเบคที่ไม่มีการสั้น , นิวตัน/เมตร²

ρ_s ค่าความหนาแน่นของวัสดุ , Kg/m³

ρ_g ค่าความหนาแน่นของอากาศ , Kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ , m

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_n ค่าแอมพลิจูดของแรงเขย่าในแนวตั้งฉากกับแนวแกนเขย่า , m/sec²

- ω ค่าความถี่ของการหมุน , sec^{-1}
 g_n ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตั้งฉากกับแนวแกนเขย่า , m/sec^2
 H ความสูงของเบดที่ไม่มีการสั่น , m
 ϕ ค่าแฟคเตอร์รูปทรง (shape factor)
 E_{mf} ความพรุนของเบดเริ่มต้น

4.4.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์เบดที่เกิดจากการสั่น (U_{mf})_v

เนื่องจากเบดเกิดการฟลูอิดไลซ์เบดได้โดยอาศัยการสั่น ดังนั้นความเร็วของอากาศที่ใช้จึงต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์เบดแบบทั่วไป (U_{mf})_v และพบว่าความเร่งของการสั่นมีผลต่อ (U_{mf})_v ซึ่ง Mushtayev ได้เสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า (U_{mf})_v ดังนี้

$$\begin{aligned}
 (U_{mf})_v &= (U_{mf})_s (1 - 0.095 A_n \omega^2 / g_n) \\
 \text{หรือ} \quad (U_{mf})_v &= 0.12 (\rho_s / \rho_g)^{0.63} (1/V_g)^{0.33} d_s^{0.84} (1 - 0.095 A_n \omega^2 / g_n) \quad (4.2) \\
 \text{เมื่อ} \quad (U_{mf})_v &\text{ ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์ที่เกิดจากการสั่น , m/sec} \\
 (U_{mf})_s &\text{ ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์แบบทั่วไป , m/sec}
 \end{aligned}$$

4.5 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไลซ์เบดแบบสั่น เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการพา (Convection Heat Transfer) ซึ่งสมมูลย์ทางความร้อนในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไลซ์เบดแบบสั่น คือ

$$Q_t = Q_v + Q_{s,s} + Q_{s,w} \quad (4.3)$$

- เมื่อ Q_t ค่าความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง , จูล/วินาที
 Q_v ค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ , จูล/วินาที
 $Q_{s,s}$ ค่าความร้อนความร้อนสัมผัสที่ใช้เพื่ออุณหภูมิของวัสดุ , จูล/วินาที
 $Q_{s,w}$ ค่าความร้อนความร้อนสัมผัสที่ใช้เพื่ออุณหภูมิของน้ำในวัสดุ , จูล/วินาที
 ความร้อนแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ

ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุจะเท่ากับความร้อนแฝงของการเป็นไอ

ซึ่งถูกถ่ายเทมาจากอากาศ สมการที่ใช้คือ

$$Q_v = F \Delta w h_w \quad (4.4)$$

- เมื่อ F ค่าอัตราป้อนวัสดุ, Kg/sec

Δw ผลต่างความชื้นของวัสดุก่อนและหลังการอบแห้ง, กิโลกรัม/น้ำ/กิโลกรัมวัสดุ

h_w ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ , จูล/กิโลกรัม

2. ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

$$Q_{s,s} = F C_{ps} T_s \quad (4.5)$$

เมื่อ C_{ps} ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ , จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส

ΔT_s ผลต่างของอุณหภูมิในวัสดุที่ทางเข้าและทางออกของวัสดุ , เซลเซียส

3. ความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในวัสดุ

$$Q_{s,w} = F C_{pw} \Delta T_w \quad (4.6)$$

เมื่อ C_{pw} ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ , จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส

ΔT_w ผลต่างของอุณหภูมิในวัสดุที่ทางเข้าและทางออก , เซลเซียส

4. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อน (Heat Transfer Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อน จะเป็นค่าที่ใช้ในการประมาณการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์แบบสั่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อน ประมาณได้จาก สมการเอมไพริคอลล (Empirical Correlation)

$$h = 10.4 [u_g / (1-E)] [A_R \omega^2 \sin(\alpha + \beta) / (g \cos \beta)]^{0.1} \quad (4.7)$$

เมื่อ E ความพรุนของวัสดุ

h ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อน , วัตต์/เมตร²-เซลเซียส

u_g ค่าความเร็วของอากาศ , เมตร/วินาที

ω ค่าความถี่หมุนของการเขย่า , วินาที⁻¹

α ค่านุมโยนเป็นมุมที่วัดได้ระหว่างแกนเขย่ากับแนวระนาบ , องศา

β ค่านุมลาดเอียง (ลาดลงเป็นบวก ชันขึ้นเป็นลบ) , องศา

5. ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean Temperature Difference)

ค่า Mean Temperature Difference เป็นค่าเฉลี่ยของ Temperature Driving Force

หาได้จากสมการ

$$(\Delta T)_{av} = Q_t / (h A_s)$$

$$\text{หรือ } (\Delta T)_{av} = [(T_{gi} - T_{so}) - 1 / \ln (T_{gi} - T_{so}) / (T_{si} - T_{go})] \quad (4.8)$$

สำหรับในการออกแบบเราหาค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยดังนี้

$$(\Delta T)_{av} = [GC_{pg} U_s L / (h_s a_s F)] [1 - \exp(- h_s a_s F / (GC_{pg} U_s L))] (T_{gi} - T_{so}) \quad (4.9)$$

เมื่อ $(\Delta T)_{av}$ ค่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย , เซลเซียส

A_s พื้นที่ผิวของวัสดุทั้งหมดที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง , เมตร²

G ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ , กิโลกรัม/เมตร²-วินาที

C_{pg} ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ , จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- L ความกว้างของแผ่นกระดาษลม , เมตร
 T_{gi} อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า , เซลเซียส
 T_{go} อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก , เซลเซียส
 T_{si} อุณหภูมิของวัสดุที่ทางเข้า , เซลเซียส
 T_{so} อุณหภูมิของวัสดุที่ทางออก , เซลเซียส
 a พื้นที่ผิวต่อหน่วยมวลของวัสดุ , เมตร²/เซลเซียส

สมการเหล่านี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในการประมาณความสามารถในการอบแห้งวัสดุของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์แบบสั่น เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบเบื้องต้นได้



บทที่ 5

เครื่องมือ และ อุปกรณ์ ในเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์

ส่วนประกอบของเครื่องมือทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง มีดังนี้

1.1 เครื่องทำความร้อน (Heater) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนแก่ตัวกลาง(อากาศ) ที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้ขดลวดความร้อน โดยอุณหภูมิของอากาศถูกควบคุมโดยชุดควบคุมเครื่องทำความร้อน

1.2 ตัวป้อนวัสดุ (Feeder) เป็นตัวป้อนวัสดุแบบสั่น (shacking feeder) ซึ่งตัวป้อนวัสดุชนิดนี้จะติดกับตัวเครื่องอบแห้ง โดยทำงานเขย่าส่งวัสดุเข้าไปในตัวเครื่องอบแห้ง

1.3 ท่ออากาศ เป็นท่อที่อากาศร้อนไหลผ่าน ทำด้วยท่อเหล็ก แบ่งเป็นท่อหลักและท่อแยก

1.4 Blower เป็นอุปกรณ์ที่ดูดอากาศผ่านเข้าไปในท่อก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน โดยนำอากาศนี้ไปใช้ในการอบแห้งวัสดุ

1.5 แผ่นกระจายอากาศ (Distributor) ทำหน้าที่รองรับวัสดุที่นำมาทำการอบแห้ง และเป็นตัวช่วยในการกระจายอากาศร้อนที่ออกมาจากท่ออากาศ ทำให้อากาศเกิดการกระจายได้ดียิ่งขึ้น โดยแผ่นกระจายอากาศนี้จะทำด้วยสแตนเลส มีขนาด 4*4 mm. เพื่อให้เมล็ดข้าวโพดเคลื่อนที่ไปตามแผ่นกระจายอากาศจนถึงทางออก

1.6 มอเตอร์สั่น (Vibration motor) เป็นอุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งกับอุปกรณ์อบแห้ง ทำหน้าที่เพื่อให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบฟลูอิด ไคซ์ ขณะเดียวกันวัสดุถูกส่งเคลื่อนไปตามแผ่นกระจายอากาศเพื่อทำการอบแห้ง

1.7 ท่อยาง เป็นท่อที่ยืดหยุ่นได้และสามารถทนความร้อนที่ใช้ในการทดลองเพื่อรับแรงสั่นในขณะที่ทำการอบแห้ง

1.8 ภาชนะรองรับวัสดุที่ทำการอบแห้งแล้ว

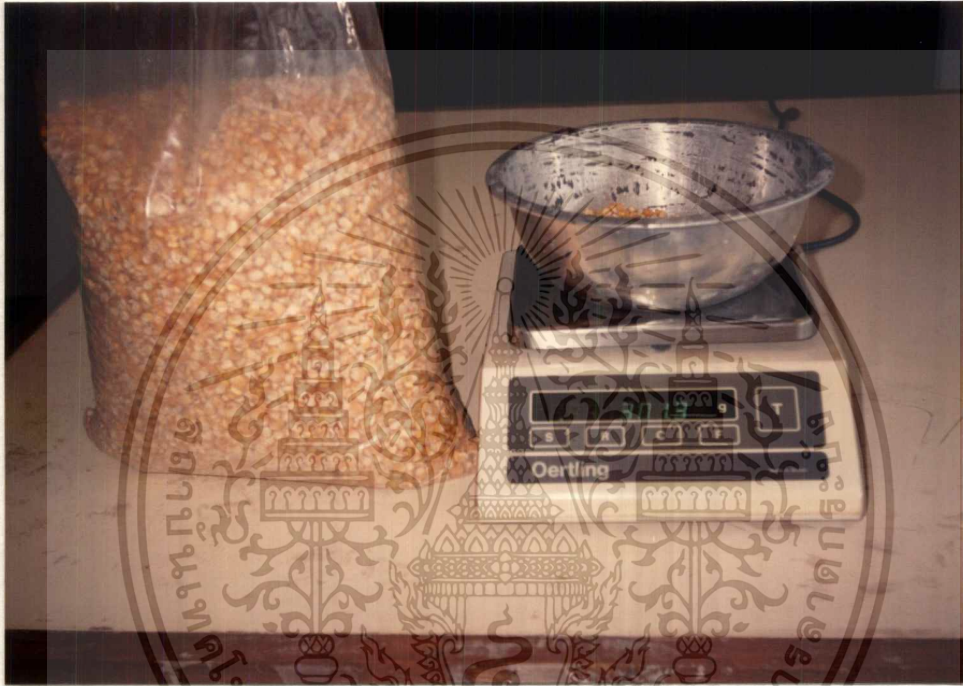
2. ส่วนประกอบของระบบเครื่องมือวัด ประกอบด้วย

2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก

2.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ จะใช้เทอร์โมมิเตอร์ การวัดอุณหภูมิของอากาศภายนอกก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง โดยวัดเป็นอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (ซึ่งไม่ได้ทำการวัดโดยการติดเทอร์โมมิเตอร์กับเครื่องอบแห้งที่เจาะรูติดเทอร์โมมิเตอร์) จากนั้นแล้ววัดอุณหภูมิของอากาศหลังเข้าเครื่องอบแห้งด้วยวิธีเดียวกัน และวัดอุณหภูมิวัสดุก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง, อุณหภูมิวัสดุภายหลังทำการอบแห้งแล้ว (สำหรับอุณหภูมิของอากาศขาออกวัดได้จากการนำเทอร์โมมิเตอร์วัดทางรูข้างบนของเครื่องอบแห้ง)

2.3 เครื่องวัดปริมาณความชื้น จะใช้เครื่องมือวัดความชื้น วัดปริมาณ ความชื้นของวัสดุ เบื้องก่อนทำการอบแห้งและความชื้นของวัสดุภายหลังทำการอบแห้ง

2.4 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ จะใช้วัดความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง โดยใช้ วัดบริเวณท่อทางเข้าอากาศ



ภาพแสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก

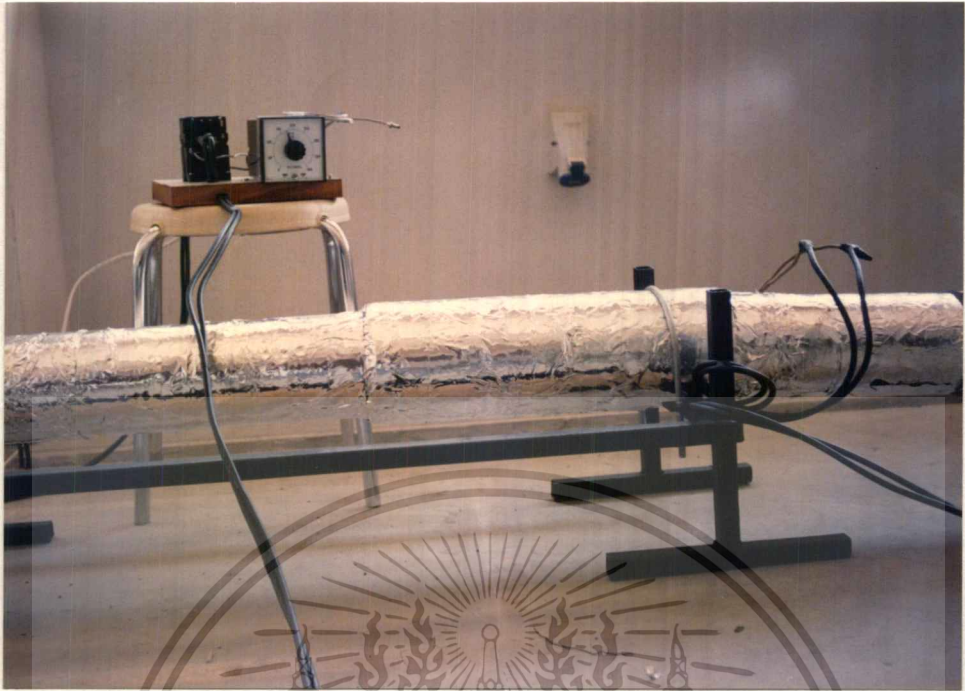


ภาพแสดงเครื่องวัดปริมาณความชื้น

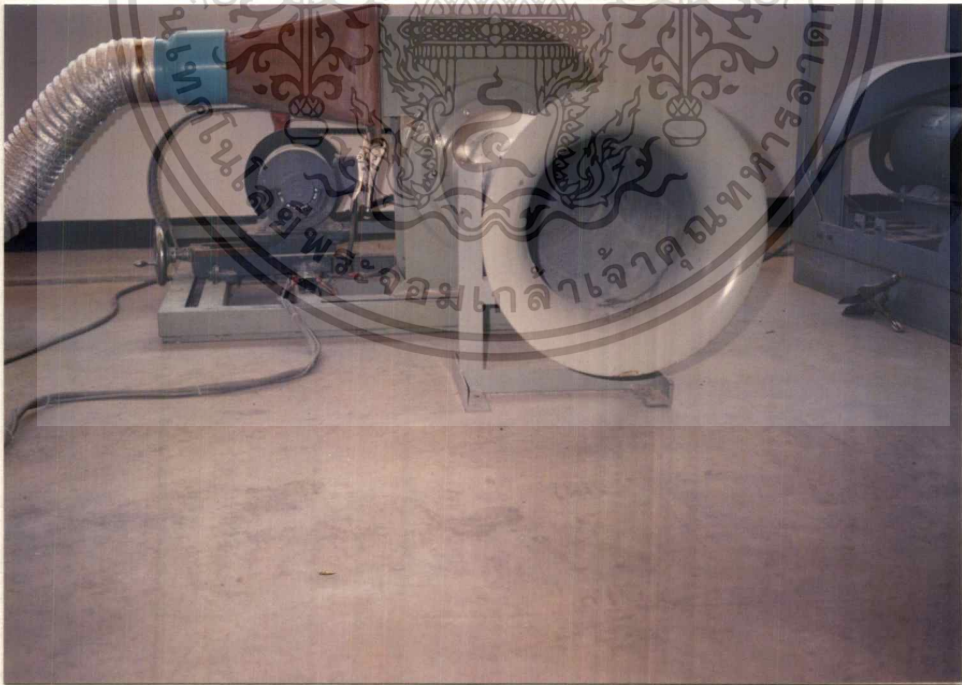


ภาพแสดงเครื่องวัดความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

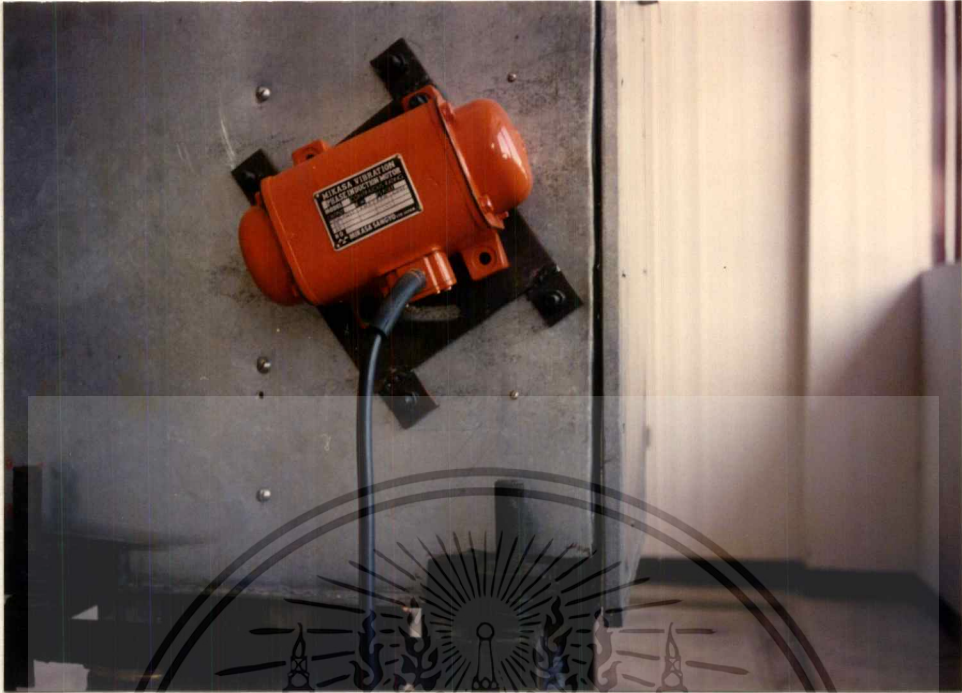


ภาพแสดง Heater (ใช้แบบขดลวดความร้อน ขนาด 5000 w) และชุดควบคุมอุณหภูมิ

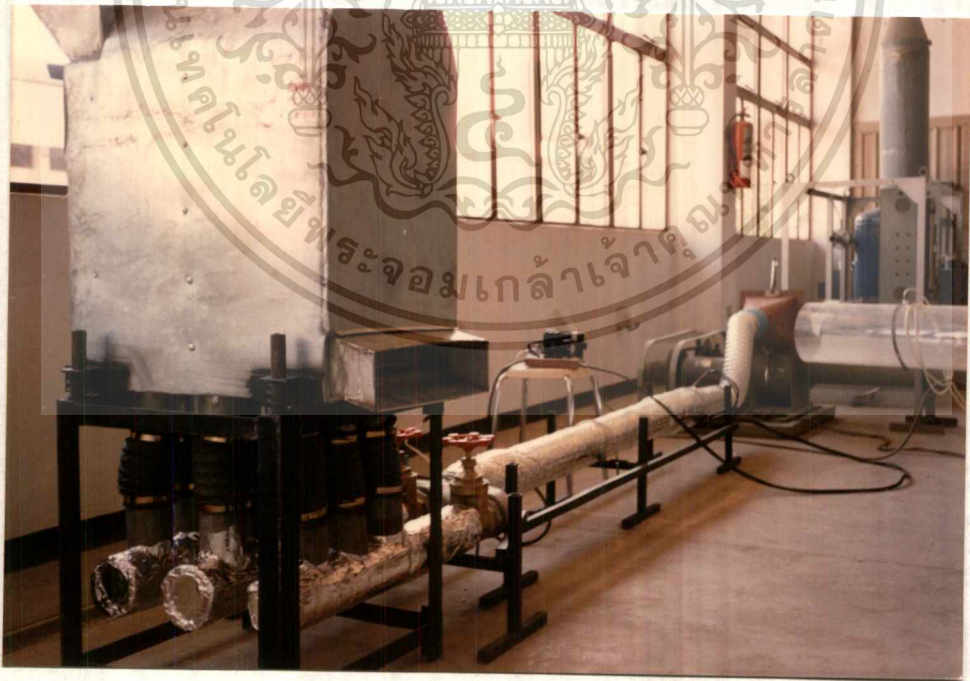


ภาพแสดง Blower ขนาด 1600 cfm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

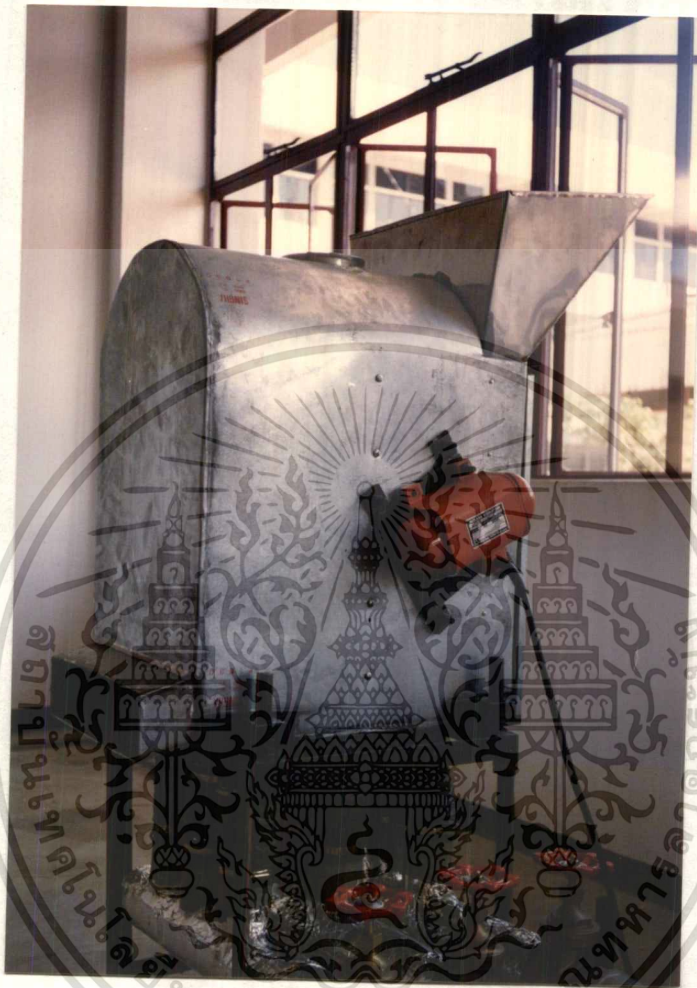


ภาพแสดงมอเตอร์สาม



ภาพชุดเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์แบบสั้นหลาย stage โดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงตัวเครื่องอบแห้ง (dryer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงแผ่นกระจายอากาศซึ่งวางลาดเอียงอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิธีการทดลองเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั้น

6.1 วิธีการใช้เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั้น มีดังนี้

1.1 เริ่มจากการเปิด Blower เพื่อดูดอากาศ และ ส่งลมร้อนเข้าเครื่องอบแห้งเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งวัสดุ ปริมาณอากาศเข้าเครื่องอบแห้ง (การทดลองต้องการค่าความเร็วที่ความเร็วหนึ่ง ๆ) จะปรับค่าได้ด้วย วาล์ว โดยค่าความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสามารถวัดค่าได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วอากาศ (Anemometer)

1.2 ทำการเปิดเครื่องทำความร้อน (Heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ การปรับค่าความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามต้องการจะใช้กล่องควบคุม ซึ่งจะมีเทอร์โมสแตทวัดอุณหภูมิที่ได้ แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ทำการปรับค่าไว้ เมื่อค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ เครื่องควบคุมจะทำการเปิดไฟฟ้าให้เข้าเครื่องทำความร้อนให้ทำงาน แต่ถ้าตรงข้าม คือ ค่าที่ได้สูงกว่าค่าที่ต้องการ กล่องควบคุมจะทำการตัดไฟฟ้าไม่ให้เครื่องทำความร้อนทำงาน

1.3 เมื่อจัดเตรียมระบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว (รวมถึงการเตรียมเมล็ดข้าวโพด) จะทำการสตาร์ทมอเตอร์รัน ซึ่งได้มีการปรับมุมโยนตัว (α) และมุมตะแกรง (β) ไว้ก่อนแล้ว

1.4 การเปิดเครื่องป้อนวัสดุ ทำได้โดยการเทวัสดุลงใน Hopper แล้วจึงดึงแผ่นกั้นที่ทางออกของ Hopper ออก จากนั้นทำการเปิดสวิตช์มอเตอร์รัน วัสดุใน Hopper จะถูกเขย่าให้ลงไปในตัวเครื่องแบบอบแห้ง ซึ่งอัตราการป้อนวัสดุสามารถปรับได้โดยการเลื่อนแผ่นกั้นวัสดุ

6.2 การทดสอบสมรรถนะ

อุปกรณ์และวัสดุในการทดสอบ

1. เครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั้น
2. เครื่องวัดความชื้น
3. เครื่องวัดความเร็วลม
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. เทอร์โมมิเตอร์
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ข้าวโพด
8. ภาชนะใส่ข้าวโพด

วิธีการเตรียมข้าวโพดสำหรับการอบแห้ง

1. เตรียมข้าวโพดที่ต้องการ 2 กิโลกรัม
2. วัดปริมาณความชื้นของข้าวโพด (โดยใช้ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้) และ วัดอุณหภูมิของเมล็ดข้าวโพด

วิธีการทดลอง

1. เปิดสวิทช์ Blower ทำการปรับความเร็วลมที่ต้องการ
2. เปิดสวิทช์ชุดควบคุม Heater เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ ร้อนได้อุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งชุดควบคุมสามารถตัดต่อวงจรตัวเอง
3. ทำการเปิดมอเตอร์สั่น
4. เทเมล็ดข้าวโพดลงในตัวป้อนวัสดุ แล้วทำการเปิดแผ่นกั้นเพื่อปล่อยเมล็ดข้าวโพดลงในเครื่องอบแห้ง
5. ทำการจับเวลา 2 ช่วง คือ
 - 5.1 จับเวลาเมื่อทำการปล่อยเมล็ดข้าวโพดจาก Hopper ลงในตัวเครื่อง
 - 5.2 จับเวลาที่เมล็ดข้าวโพดใช้เวลาอยู่ในตัวเครื่องอบแห้ง
6. รอจนเมล็ดข้าวโพดออกจากเครื่องอบแห้งหมดแล้ว
7. ปิดการทำงานของมอเตอร์สั่น / Heater และ Blower ตามลำดับ
8. นำข้าวโพดที่ได้ไปวัดความชื้น และ อุณหภูมิ แล้วบันทึกเวลา

บทที่ 7

การกำหนดขนาด และ รายละเอียดการออกแบบเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไคซ์เบด แบบต้น

ข้อมูลสำหรับการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ

อากาศ

อุณหภูมิอากาศปกติ (T_{amb})	32	เซลเซียส
อุณหภูมิอากาศเปียก (T_{owb})	28	เซลเซียส
อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่อง (T_2)	70	เซลเซียส
ความหนาแน่น (ที่ อุณหภูมิ T_2)	1.0183	กิโลกรัม/เมตร ³
ความจุความร้อนจำเพาะ (ที่ T_2)	1.0072	จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส
ความชื้นจำเพาะ	0.02225	กิโลกรัม/น้ำ/ กิโลกรัมอากาศ
ความหนืด (ที่ T_2)	$20.489 \cdot 10^{-6}$	นิวตัน/เมตร-วินาที
ความหนืดทางจลศาสตร์ (ที่ T_2)	$20.216 \cdot 10^{-6}$	เมตร ² /วินาที
ปริมาตรจำเพาะ	0.895	เมตร ³ /กิโลกรัม

ข้าวโพด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	6	มิลลิเมตร
ความหนาแน่นของวัสดุ	745	กิโลกรัม/เมตร ³
ค่าความร้อน	0.4	

เครื่องเขย่า

มุมโหนดัว	60 - 80	องศา
มุมลาดเอียง	5	องศา
ความถี่ของการสั่น	50	เฮิรตซ์
ความถี่หมุนของการเขย่า	314.6	เฮิรตซ์

หาค่า (Umf)_v จาก

$$\begin{aligned}
 (Umf)_v &= 0.12(\rho_s/\rho_g)^{0.53} (1/V_g)^{0.33} d_s^{0.33} (1-0.095An\omega^2/g_n) \\
 &= 0.12(745/1.0183)^{0.53} (1/20.2158 \cdot 10^{-6})^{0.33} (0.006)^{0.33} \\
 &\quad * [1 - (0.095 \cdot 2.91)] \\
 &= 2.173 \text{ เมตร/วินาที}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณขนาดของ Blower

$$= (U_{mf})_v * (W * L)$$

$$= 2.173 * 0.4 * 0.6$$

$$= 0.52152 \quad \text{เมตร}^3/\text{วินาที}$$

$$\text{อัตราการไหล} = 1887.472 \quad \text{เมตร}^3/\text{ชั่วโมง}$$

$$= 1104.89 \quad \text{cfm}$$

ทำการเผื่อไว้อีก 50 % ค้างนั้น

$$\text{ขนาดของ Blower ที่ต้องการ คือ} = 1.5 * 1104.89$$

$$= 1657.335 \quad \text{cfm.}$$

ทำการคำนวณขนาดของ Heater

$$Q_{\text{heater}} = [(U_{mf})_v * (n \text{ of tubes}) * \pi r^2 * C_{p,\text{air}} * (T_2 - T_1)] / v_1$$

$$= [2.173 * 9 * \pi * (3.75/100)^2 * 1007.2 * (73 - 30)] / 0.895$$

$$= 4180.958 \quad \text{W}$$

$$= 4.180958 \quad \text{KW}$$

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้ Heater ขนาด 5 KW

บทที่ 8

ผลการทดลองแสดงด้วยกราฟและตาราง

ผลการทดลองที่แสดงดังต่อไปนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่าง ๆ คือ มุมของรางเข่า, มุมของมอเตอร์เข่าสัมพันธ์กับค่าที่ต้องการ คือ ความชื้นที่ลดลงดังต่อไปนี้

1. ผลการทดลองที่มุม β (มุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ) = 5 องศา

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	24.4	24.0	0.4	1.639
65	21.2	20.542	0.658	3.105
70	20.7	19.1	1.6	7.729
75	23.1	21.25	1.95	8.472
80	26.6	23.6	3.0	11.278

ตารางที่ 8.1.1 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2 m/s

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	25.4	24.2	1.2	4.785
65	24.0	22.71	1.289	5.371
70	20.4	18.5	1.9	9.256
75	21.8	19.407	2.395	10.975
80	22.86	19.7	3.16	13.787

ตารางที่ 8.1.2 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	26.4	24.300	2.100	7.848
65	23.2	21.186	2.014	8.713
70	22.7	20.300	2.400	10.789
75	23.7	20.800	2.866	12.095
80	20.4	17.400	3.000	14.537

ตารางที่ 8.1.3 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	24.5	21.300	3.20	13.224
65	23.5	20.146	3.35	14.271
70	25.4	22.200	3.20	12.537
75	22.9	19.127	3.68	16.079
80	24.8	20.500	4.30	17.258

ตารางที่ 8.1.4 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการทดลองที่มุม β (มุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ) = 8 องศา

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้น ของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความ ชื้นที่ลดลง
60	24.5	24.054	0.44	1.817
65	25.2	24.189	1.01	4.012
70	20.7	19.020	1.68	8.130
75	23.4	21.219	2.18	9.317
80	24.8	21.895	2.91	11.715

ตารางที่ 8.2.1 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2 m/s

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้น ของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความ ชื้นที่ลดลง
60	23.1	21.930	1.174	5.084
65	20.6	19.306	1.293	6.279
70	22.8	20.617	2.183	9.573
75	25.1	22.210	2.888	11.509
80	23.8	20.328	3.471	14.587

ตารางที่ 8.2.2 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมโยนตัว	ความชันของวัช คู่ออนอบแห้ง , %	ความชันของวัช คูหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชัน ของวัชคู	เปอร์เซ็นต์ความ ชันที่ลดลง
60	24.50	22.48	2.010	8.240
65	25.00	22.58	2.410	9.670
70	22.80	20.27	2.520	11.080
75	24.00	20.87	3.120	13.000
80	21.80	18.56	3.230	14.840

ตารางที่ 8.2.3 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s

มุมโยนตัว	ความชันของวัช คู่ออนอบแห้ง , %	ความชันของวัช คูหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชัน ของวัชคู	เปอร์เซ็นต์ความ ชันที่ลดลง
60	23.70	20.45	3.200	13.519
65	21.90	18.66	3.240	14.805
70	24.00	20.27	3.720	15.521
75	25.10	21.01	4.080	16.269
80	23.80	19.65	4.140	17.428

ตารางที่ 8.2.4 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ผลการทดลองที่มุม β (มุมของแผ่นกระจายอากาศทำกับมุมในแนวระดับ) = 11 องศา

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้น ของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความ ชื้นที่ลดลง
60	23.40	22.95	0.440	1.905
65	24.10	23.13	0.970	4.015
70	23.00	21.18	1.810	7.871
75	25.20	22.90	2.290	9.120
80	24.80	21.94	2.850	11.500

ตารางที่ 8.8.1 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2 m/s

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุ ก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุ หลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้น ของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความ ชื้นที่ลดลง
60	25.10	23.87	1.223	4.874
65	23.90	22.44	1.457	6.098
70	24.20	22.01	2.181	9.015
75	24.80	22.10	2.700	10.876
80	22.00	18.99	3.000	13.647

ตารางที่ 8.8.2 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 2.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	22.80	21.00	1.799	7.891
65	23.10	21.00	2.091	9.054
70	21.70	19.41	2.292	10.560
75	22.90	20.05	2.848	12.437
80	24.40	21.08	3.315	13.586

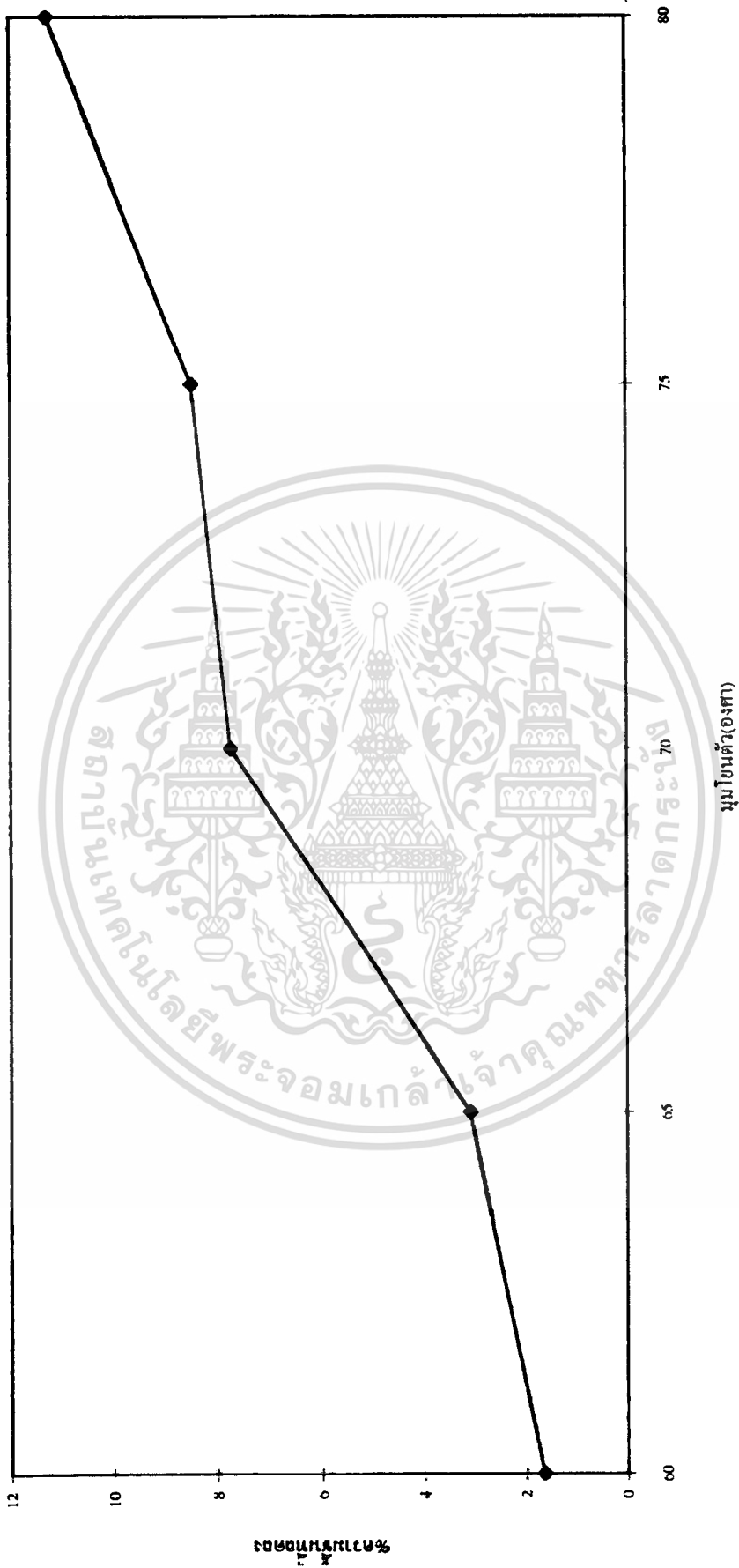
ตารางที่ 8.3.3 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.0 m/s

มุมโยนตัว	ความชื้นของวัสดุก่อนอบแห้ง , %	ความชื้นของวัสดุหลังอบแห้ง , %	ผลต่างความชื้นของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง
60	24.60	21.10	3.497	14.215
65	23.80	20.23	3.575	15.019
70	24.50	20.64	3.861	15.761
75	22.70	18.96	3.741	16.478
80	22.90	18.82	4.079	17.812

ตารางที่ 8.3.4 ผลการทดลองที่ความเร็วลม 3.5 m/s

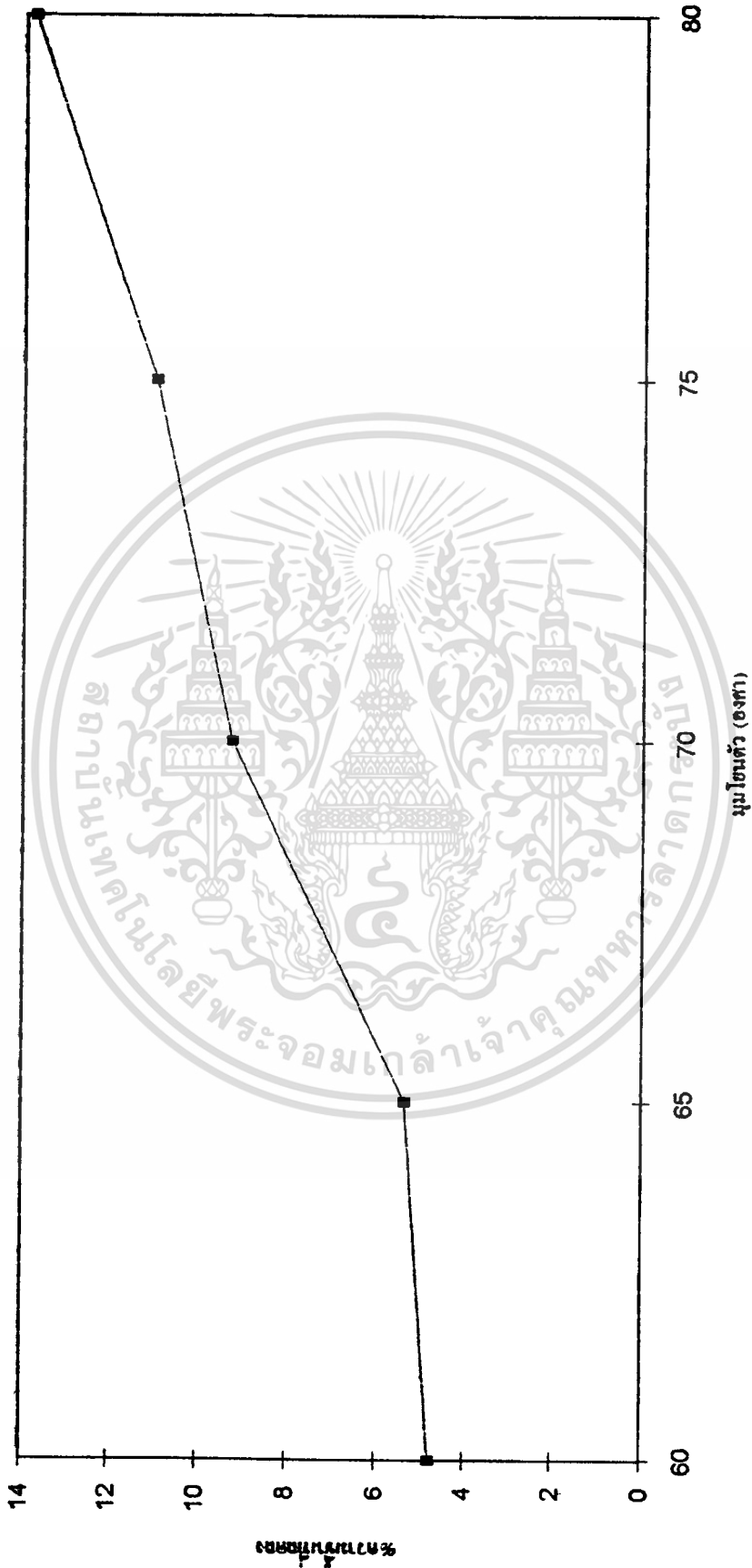
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 1. แสดงผลการทดลองที่ค่าความเร็วลม 2 m/s และมุมของแผ่นกระจายอากาศ 5 องศา



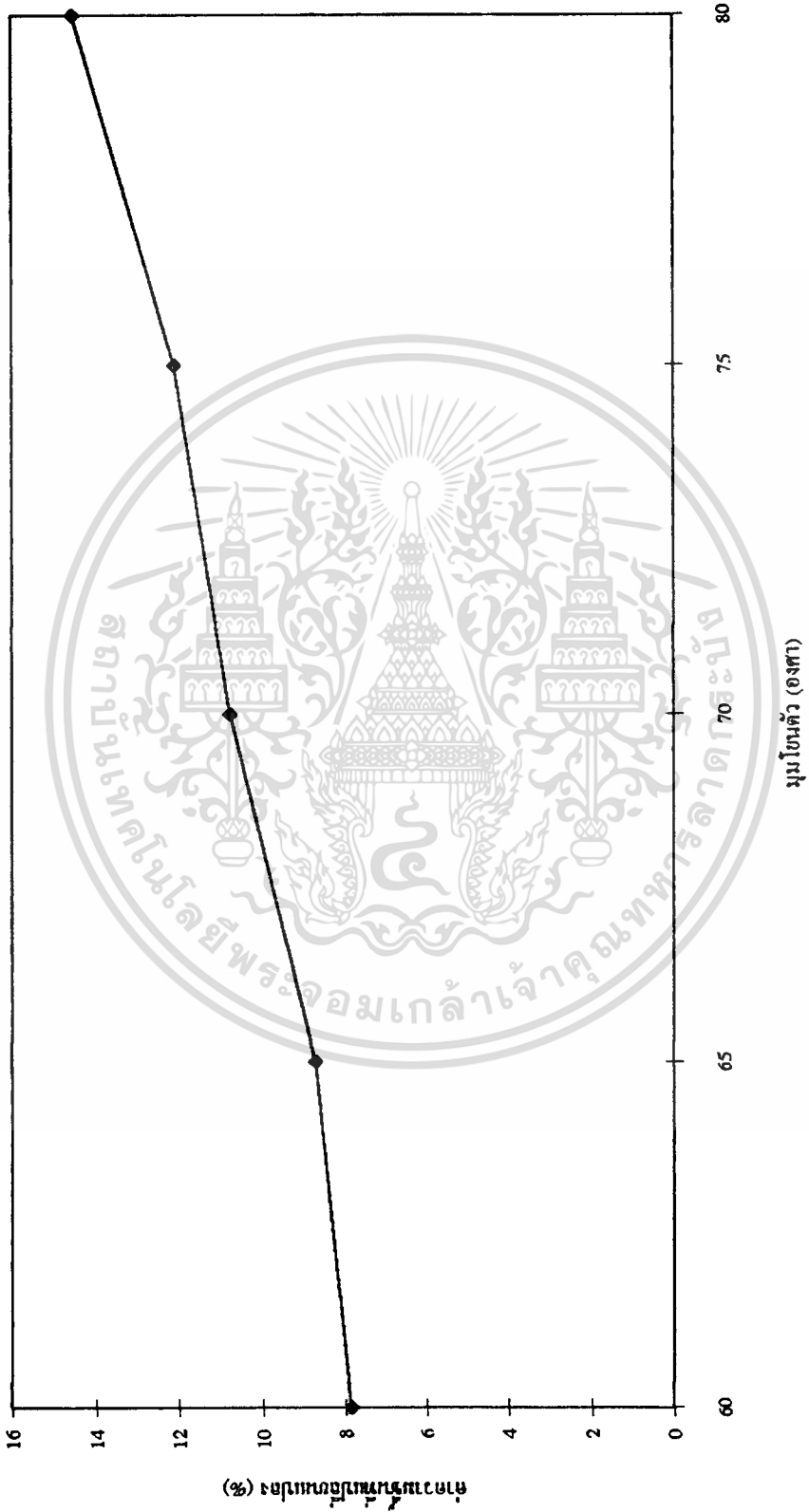
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 2.ผลการทดลองที่ความเร็วอากาศหรือชน 2.5 m/s และมุมเด่นกระดานอากาศ 5 องศา



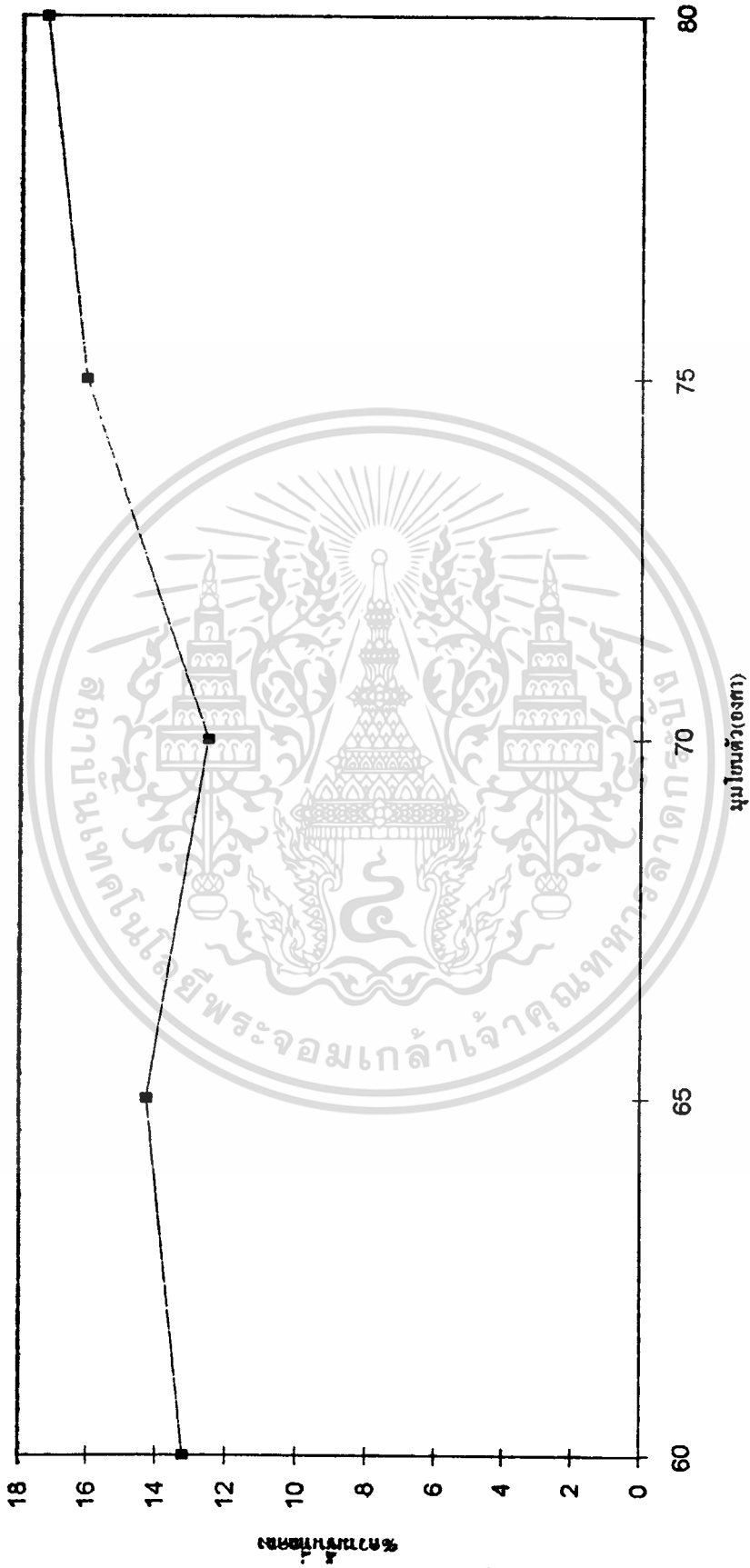
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 3 แสดงผลการทดลองที่ค่าความเร็วอากาศร้อน 3.0 m/s และที่มุมเบต้า 5 องศา



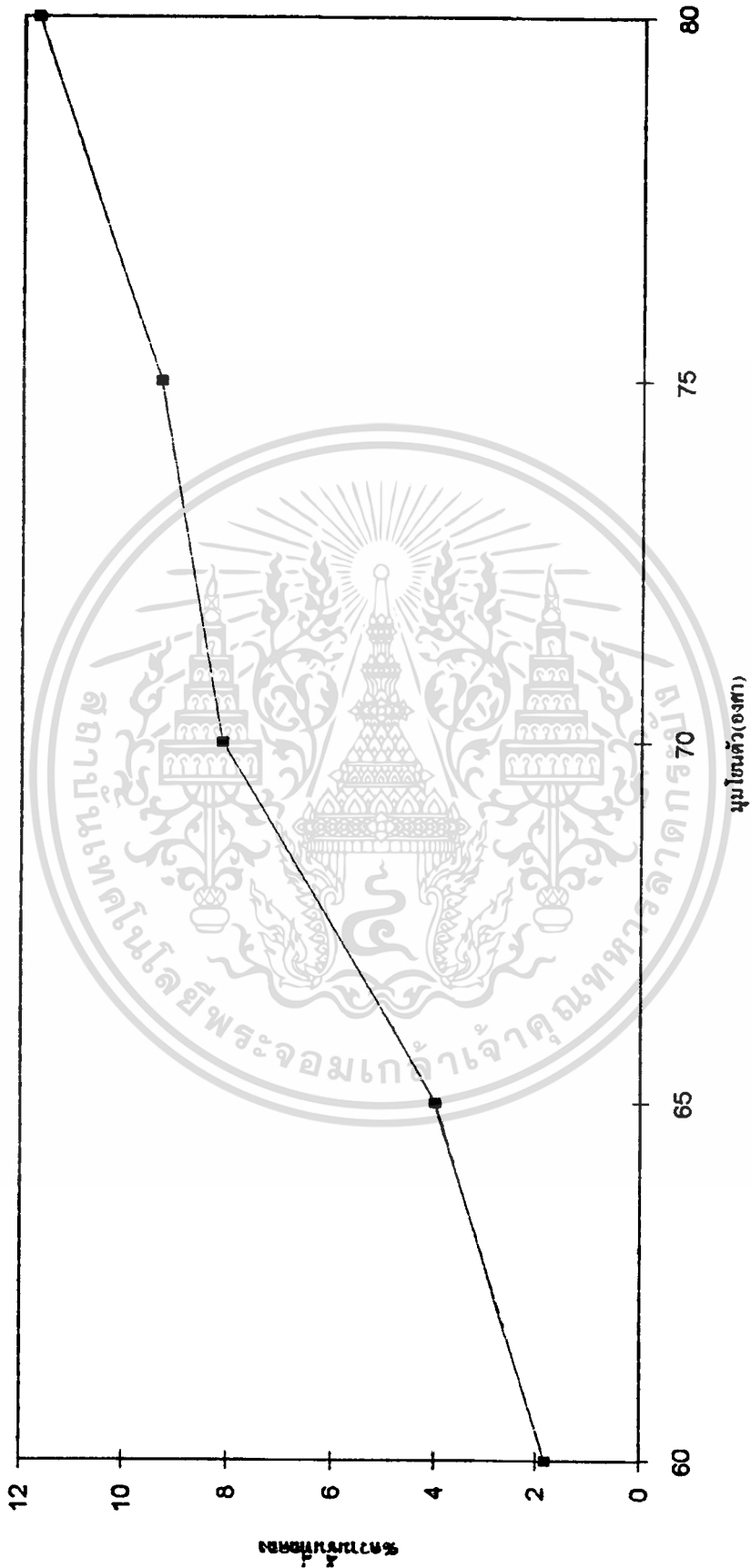
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4. แสดงผลการทดลองที่ค่าความเร็วอากาศร้อน 3.5 m/s มุมแผ่นกระจายอากาศ 5 องศา



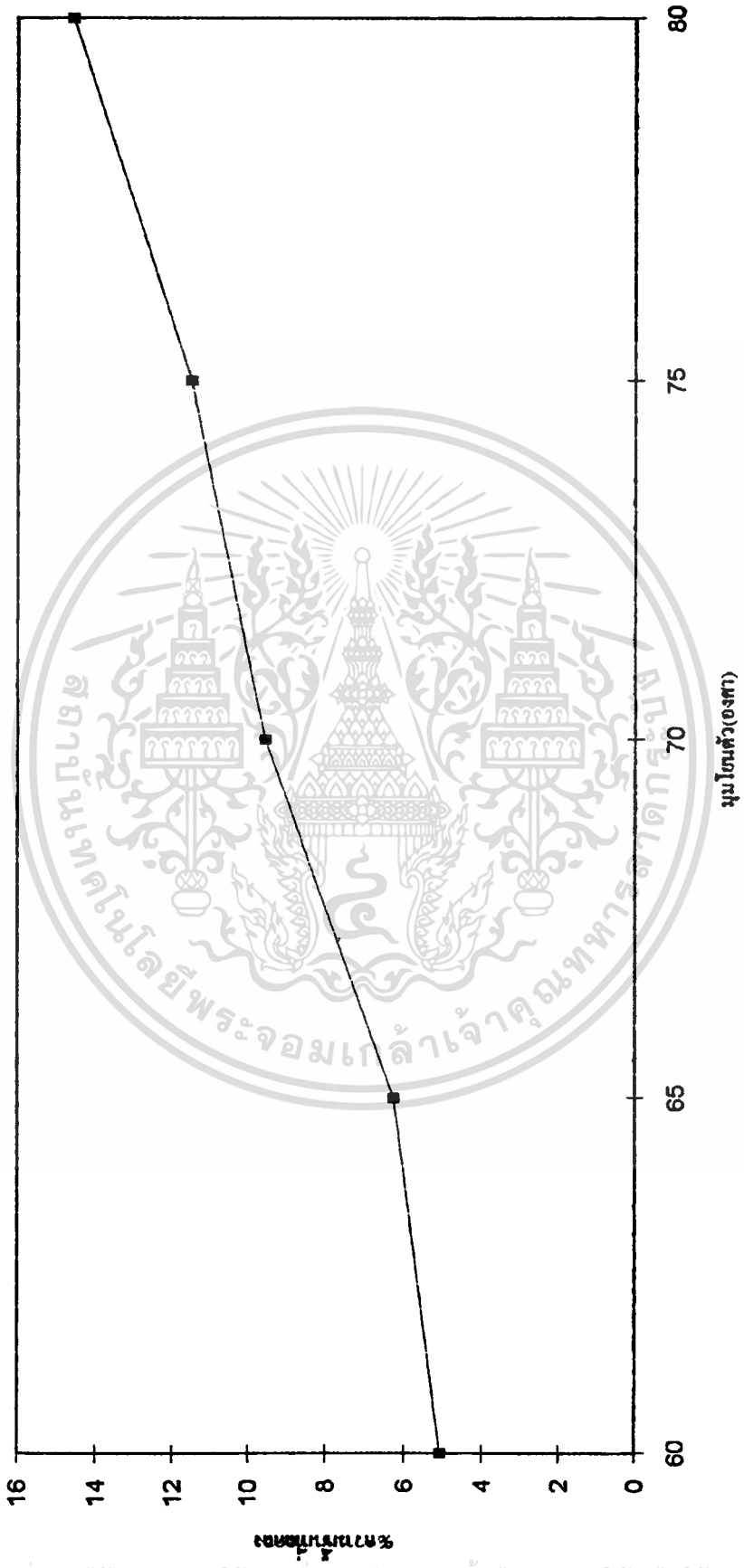
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 5. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร้อน 2 m/s มุมของแผ่นกระดาษอากาศ 8 องศา



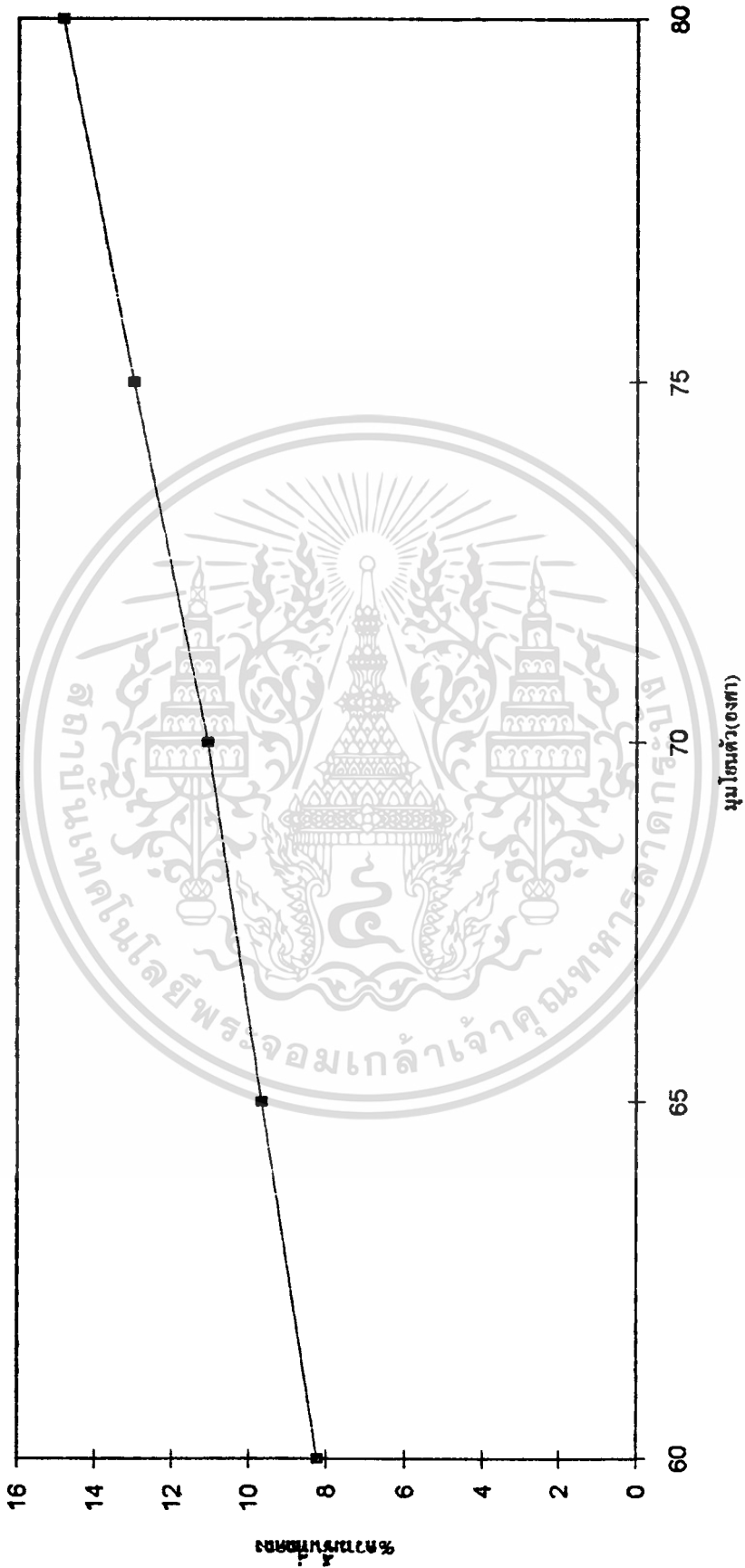
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 6. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศหรือ 2.5 m/s มุมของแผ่นกระดาษอากาศ 8 องศา



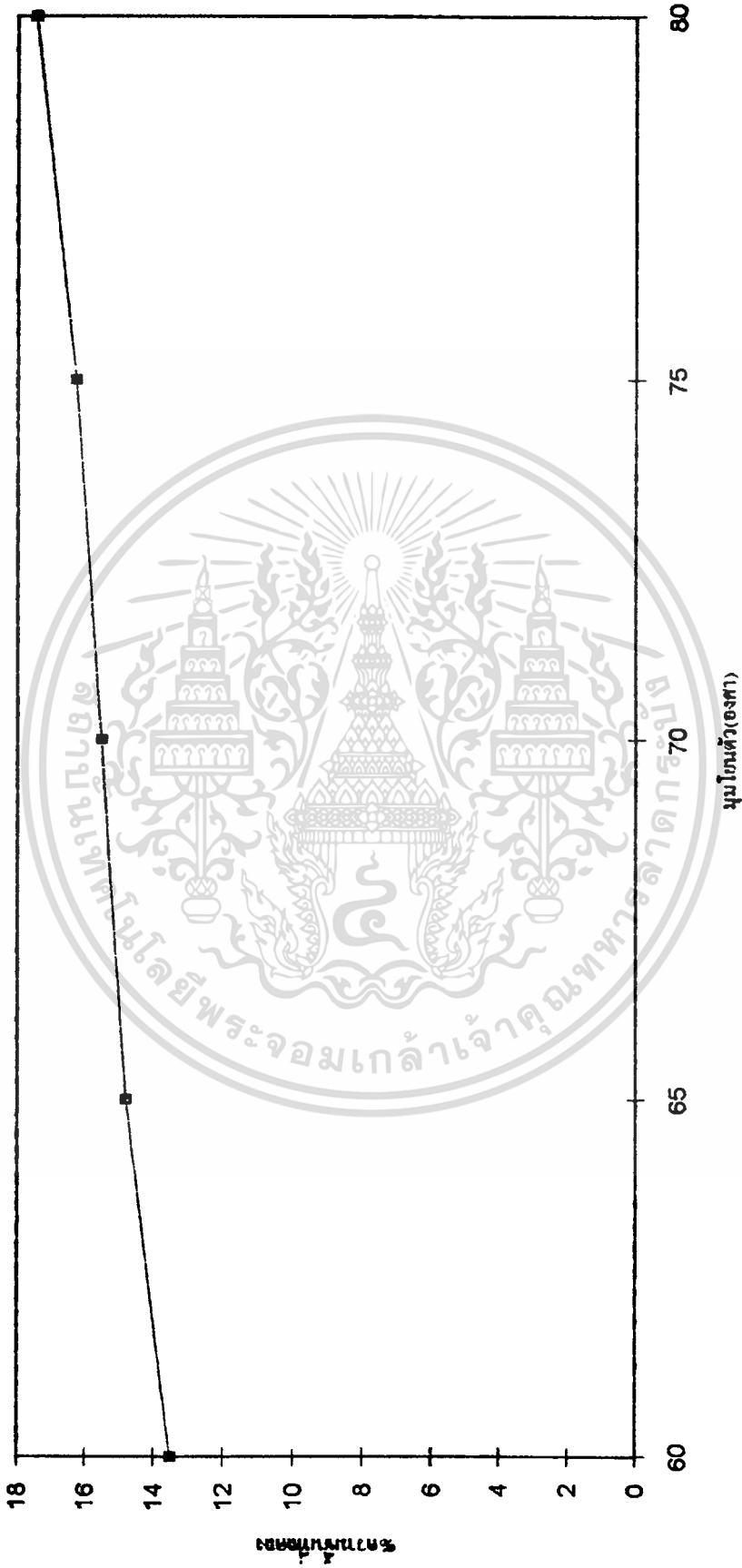
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 7. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศอื่น 3m/s มุมเด่นกระจัดอากาศ 8 องศา



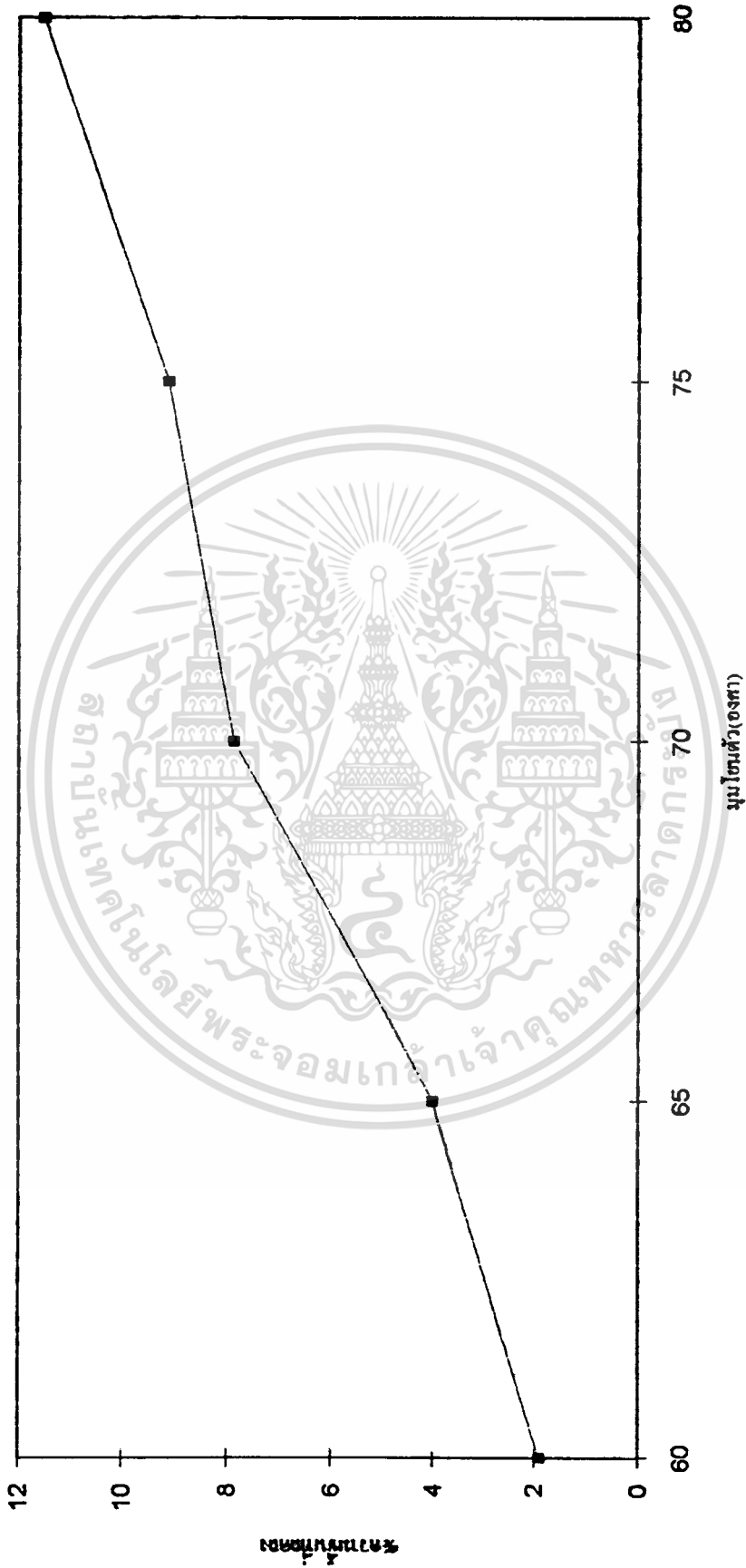
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 8. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร้อน 3.5 m/s มุมแผ่นกระจายอากาศ 8 องศา



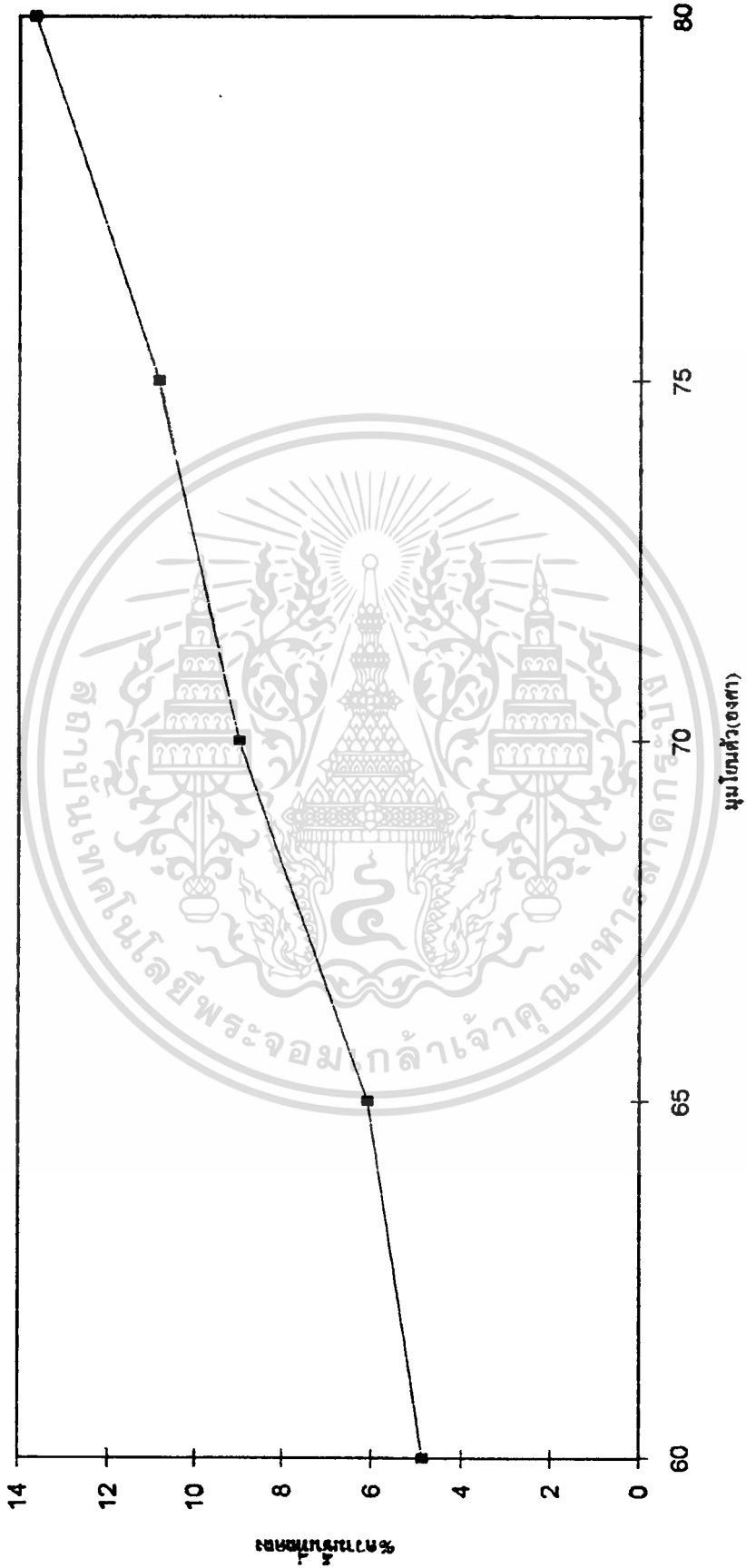
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 9. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศหรือ 2 m/s มุมแผ่นกระดาษอากาศ 11° องศา



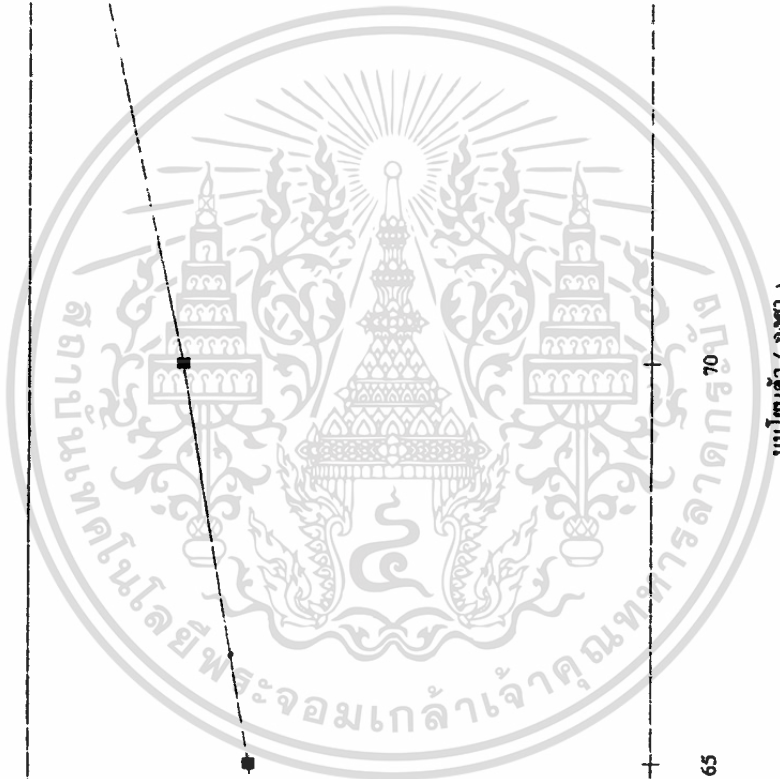
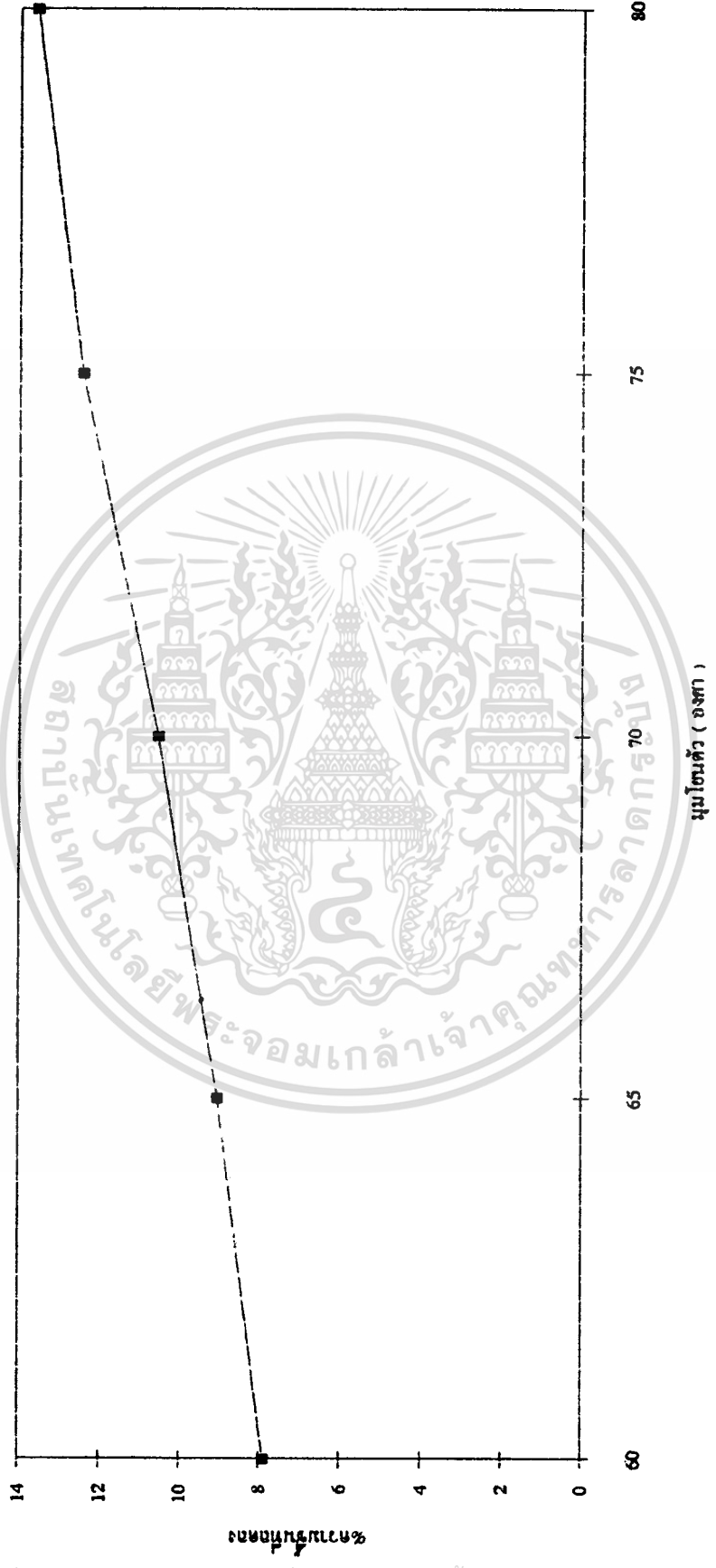
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 10 แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร้อน 2.5 m/s มุมแผ่นกระจายอากาศ 11 องศา



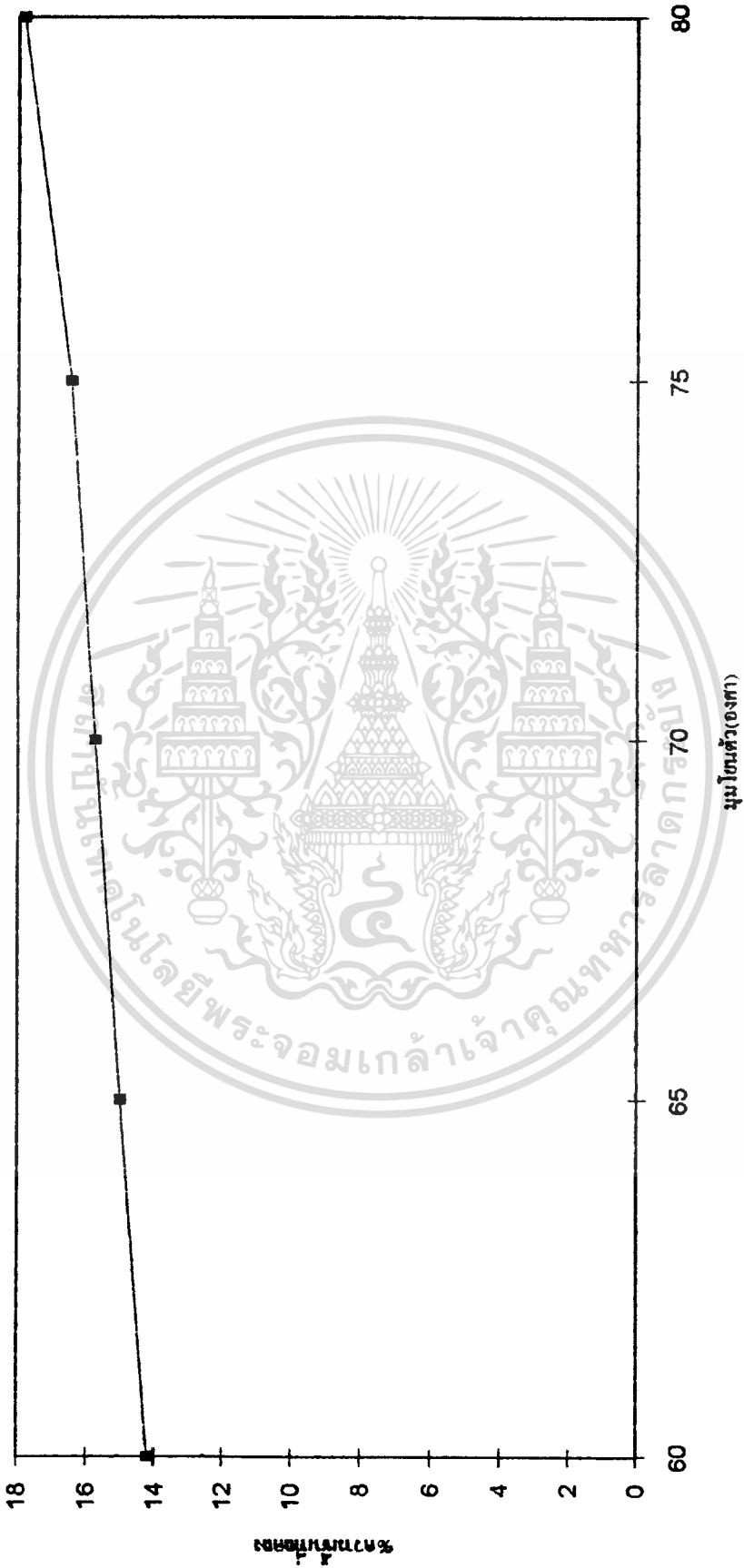
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 1.1 แสดงผลการทดลองที่ค่าความเร็วลม 3.0 m/s เครื่องบ่มแผ่นกระดาษอากาศ 11 องศา



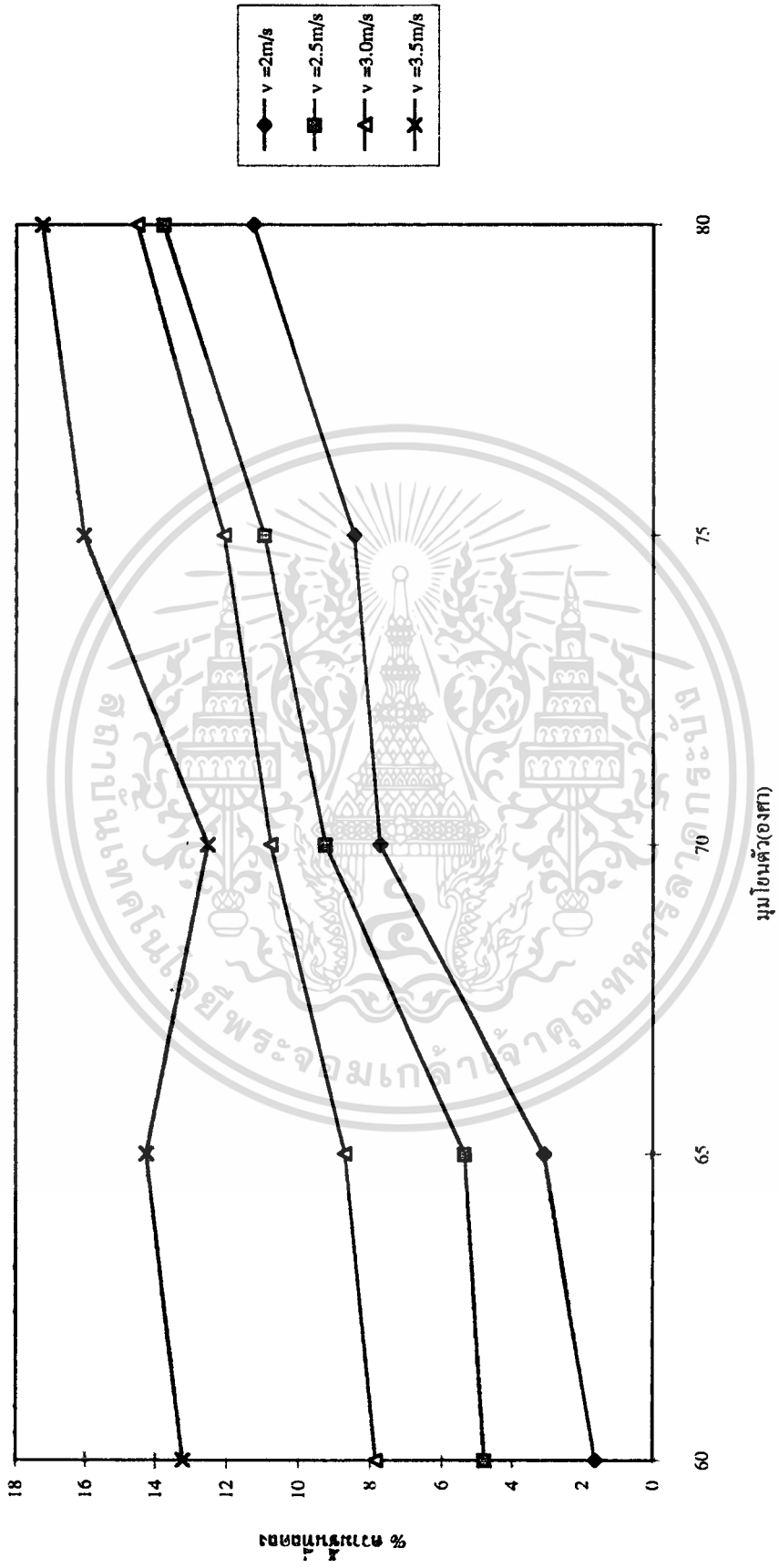
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 12. แสดงผลการทดลองที่ความเร็วอากาศร้อน 3.5 m/s มุมแผ่นกระจายอากาศ 11 องศา



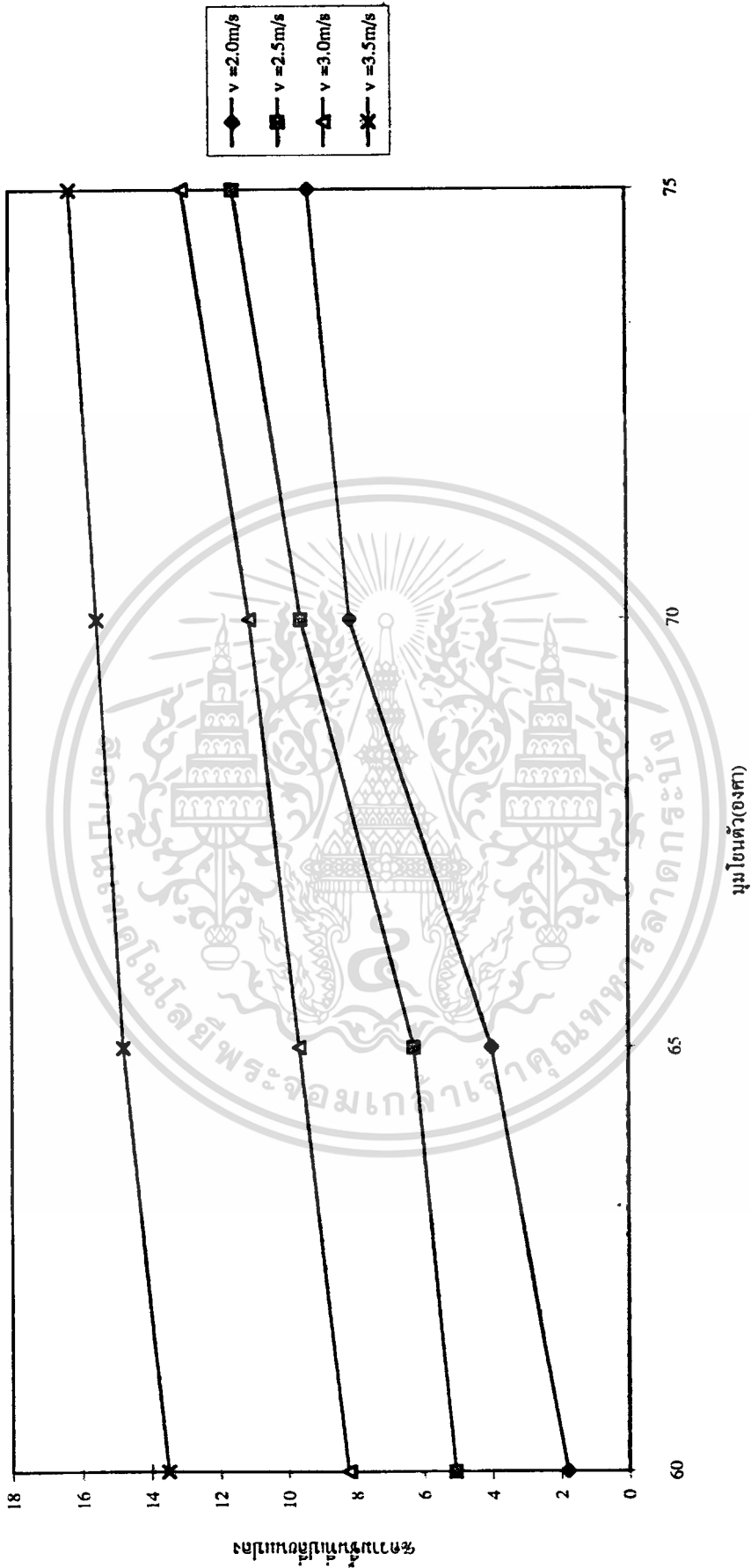
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 1.3. แสดงผลการเปรียบเทียบ%ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่มุมแผ่นกระดานอากาศ ร. องศา



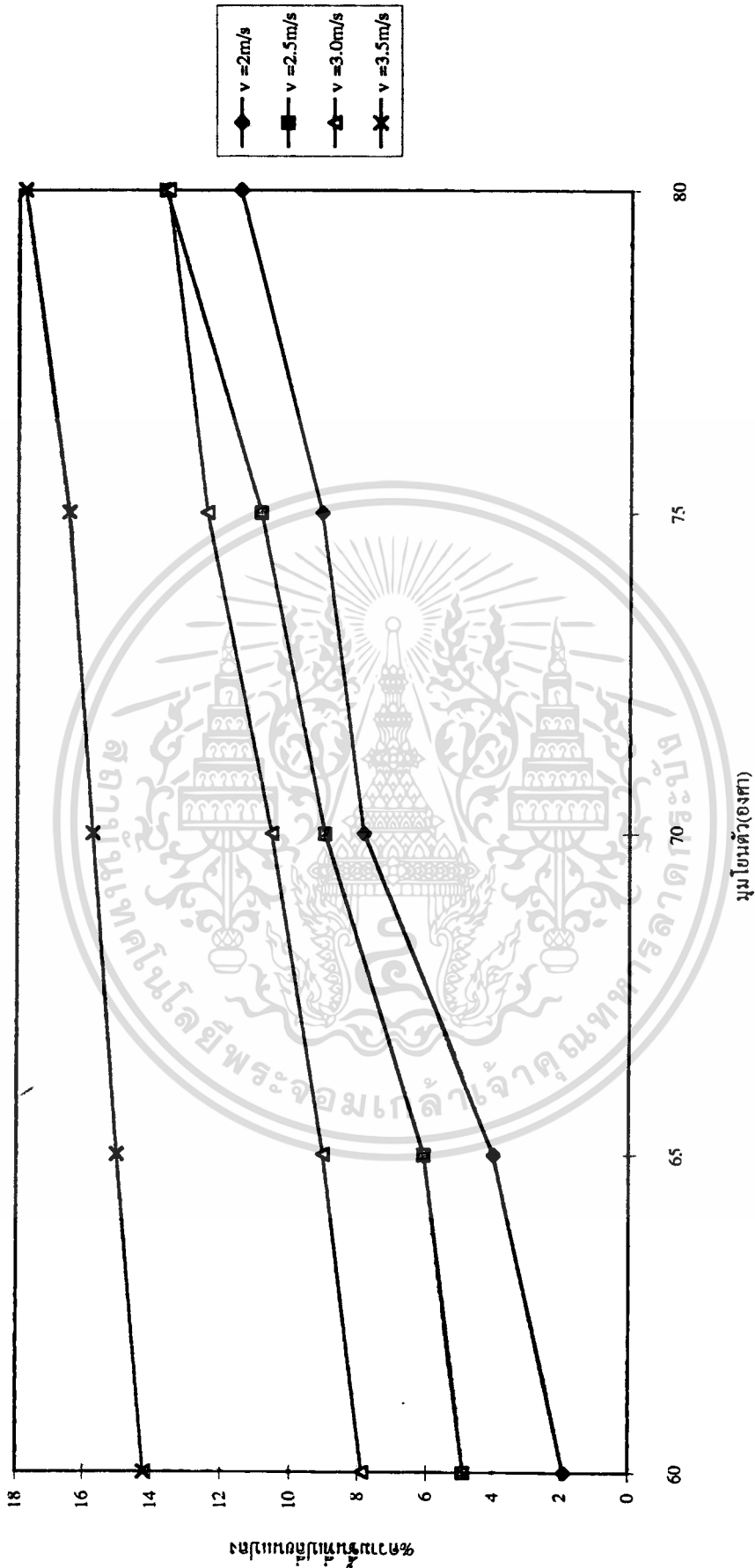
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 14. แสดงการเปรียบเทียบความชื้นที่เปลี่ยนแปลงที่มุมแผ่นกระดานอากาศ 8 องศา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 15.เปรียบเทียบผลของความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ที่มุมแผ่นกระจายอากาศร้อน 11 องศา



มุมโยนตัว(องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากสมการของการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งหาได้จาก

$$h = 10.4 [U_g / (1-E)] [A_R \omega^2 \sin(\alpha + \beta) / g \cos \beta]^{0.1}$$

โดยที่ความแรงของการสั่นคือ

$$K = A_R \omega^2 \sin(\alpha + \beta) / g \cos \beta \quad (1)$$

$$\text{จะได้ } h = 10.4 [/ (1-E)] [K]^{0.1} \quad (2)$$

ตามทฤษฎีแล้วจะเห็นว่าเมื่อ

1. ทำการกำหนดค่าตัวแปร α (ค่ามุมโชน) และค่าตัวแปร β (มุมลาดเอียง) ให้มีค่าคงที่ แล้วทำการเปลี่ยนค่า U_g (ค่าความเร็วของอากาศร้อน)

จากสมการ (1) เมื่อกำหนดค่าของ α และ β คงที่แล้วจะได้ความแรงของการสั่น K มีค่าคงที่ (เนื่องจาก A_R และ ω มีค่าคงที่ด้วย)

พิจารณาสมการ (2) (โดยที่ค่า K และ E คงที่) เมื่อทำการเพิ่มค่า U_g เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

2. ทำการกำหนดค่า U_g (ค่าความเร็วของอากาศ) และค่า α (ค่ามุมโชนตัว) ให้มีค่าคงที่ แล้วทำการเปลี่ยนค่า β (มุมลาดเอียง)

จากสมการ (1) เมื่อกำหนดค่าของ α ให้มีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มค่า β จะพบว่าค่าความแรงของการสั่น K มีค่าเพิ่มขึ้น (โดยที่ค่า A_R และ ω คงที่)

พิจารณาสมการ (2) เมื่อค่า U_g มีค่าคงที่ ทำการเพิ่มค่าความแรงของการสั่น K (โดยการเพิ่มค่า β) จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย (โดยที่ค่า E มีค่าคงที่)

3. ทำการกำหนดค่า U_g (ค่าความเร็วของอากาศ) และค่า β (ค่ามุมลาดเอียง) ให้มีค่าคงที่ แล้วทำเปลี่ยนค่าของ α (มุมโชนตัว)

จากสมการ (1) เมื่อค่าของ β มีค่าคงที่ แล้วทำการเพิ่มค่า α จะพบว่าค่าความแรงของการสั่น K มีค่าเพิ่มขึ้น (โดยที่ค่า A_R และ ω คงที่)

พิจารณาสมการ (2) เมื่อค่า U_g มีค่าคงที่ ทำการเพิ่มค่าความแรงของการสั่น K (โดยการเพิ่มค่า α) จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย (โดยที่ค่า E มีค่าคงที่)

จากผลการทดลองคังตารางและกราฟที่ได้แสดงไว้ข้างต้น จะเห็นได้ว่า

1. เมื่อทำการกำหนดค่ามุมโชนตัว และมุมลาดเอียงให้คงที่ แล้วทำการเพิ่มความเร็วของอากาศ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากความเร็ว 2 , 2.5 , 3 , 3.5 m/s ตามลำดับ จะพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์

ของความชื้นที่ลดลงของเมฆคิวต่ำโพคนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ แสดงว่าเมื่อความเร็วของอากาศ U_g มีค่าสูงขึ้นจะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างเมฆคิวต่ำโพคกับอากาศได้ดียิ่งขึ้นซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น

2. เมื่อทำการกำหนดค่าความเร็วของอากาศ U_g และค่ามุมโยนตัว α ให้มีค่าคงที่แล้วจึงทำการเพิ่มค่ามุมลาดเอียง β ให้มีค่าเพิ่มขึ้น 5,8,11 องศาตามลำดับ จะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นที่ลดลงของเมฆคิวต่ำโพคจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อค่ามุมลาดเอียง β มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแรงของการสั่น K ตามสมการ(1) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความแรงของการสั่นมีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้แอมพลิจูดในแนวตั้งมีค่าสูงขึ้นหรือเกิดการฟลูอิดไดซ์ขึ้น และเกิดช่องว่างระหว่างเมฆคิวต่ำโพคได้ดียิ่งขึ้น ทำให้อากาศร้อนและเมฆคิวต่ำโพคมีการสัมผัสกันมากขึ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น

3. เมื่อทำการกำหนดค่าความเร็วของอากาศ U_g และค่ามุมลาดเอียง β ให้มีค่าคงที่แล้วจึงทำการเพิ่มค่ามุมโยนตัว α ให้มีค่าเพิ่มขึ้น 60,65,70,75,80 องศาตามลำดับ จะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นที่ลดลงของเมฆคิวต่ำโพคจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อค่ามุมโยนตัว α มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแรงของการสั่น K ตามสมการ(1) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความแรงของการสั่นมีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้แอมพลิจูดในแนวตั้งมีค่าสูงขึ้นหรือเกิดการฟลูอิดไดซ์ขึ้น และเกิดช่องว่างระหว่างเมฆคิวต่ำโพคได้ดียิ่งขึ้น ทำให้อากาศร้อนและเมฆคิวต่ำโพคมีการสัมผัสกันมากขึ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น

บทที่ 10

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_s มี 3 ตัวแปร คือ

1. ค่าความเร็วของอากาศ U_g
2. ค่ามุมโหนดตัว α
3. ค่ามุมลาดเอียง β

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_s กับค่าต่างๆทั้ง 3 นี้เป็นไปในลักษณะแปรผันโดยตรง นั่นคือ ถ้าค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งใน 3 ตัวแปรนี้มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว (ในขณะที่ค่าตัวแปรอื่นๆคงที่) จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_s เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งใน 3 ตัวแปรนี้มีค่าลดลงแล้ว (ในขณะที่ค่าตัวแปรอื่นๆคงที่) จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_s ลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการออกแบบระบบท่อส่งลมให้มี loss น้อยที่สุด และออกแบบให้ลมในท่อทั้งสามมีปริมาณเท่าๆกัน
2. ควรหุ้มฉนวนให้มากที่สุด ในทุกบริเวณที่ความร้อนจะออกมาได้
3. มุมโหนดตัวของวัสดุที่ได้จากการปรับมอเตอร์อาจจะไม่ใช่มุมที่ต้องการจริง ควรหาวิธีวัดมุมโหนดตัวของวัสดุที่แท้จริง
4. ควรระวังป้องกันไม่ให้มีวัสดุไหลลงไปในท่อส่งลม เพื่อว่าจะได้ไม่ขวางทางเดินของลม

หนังสืออ้างอิง

1. **ดร. วิวัฒน์ ตัญจะพานิชกุล** , "คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย ญี่ปุ่น) , 2533.
2. **บุญญศักดิ์ โจจงกิจ** , "เครื่องกลขนถ่ายระบบขนถ่ายต่อเนื่อง" , กรุงเทพฯ , สจน. , 2524
3. **M. Hasatani , Y.Itaya and K.Miura** , Dring of Granular Materials in an Inclined Vibrated Fluidized Bed by Combined - Radiative and Converte Heating , "Drying Technology " , 1993
4. **R.Gupta and A.S. Mujumdar** , "Advances in Drying " , vol 2 , Hemisphere Publishing Corp.,
5. **David M.Himmelblau** , " Basic Principle and Calculations in Chemical Engineering " , 5th edition Prentice - Hall International Editions
6. **C.Strumillo. Z.Pakowski** , " Drying ' 80 " , vol 1 , Ed,A.S. Mujumdar , Hemisphere Publishing Corp., Newyork .

ภาคผนวก ก.

การใช้ Finite Element ในการคำนวณหาความร้อนในคูล

จากการวิเคราะห์ผลของความร้อนต่าง ๆ ที่มีต่อการอบแห้งข้าวโพด เราสามารถวิเคราะห์การกระจายความร้อน และหาอุณหภูมิต่าง ๆ ได้จากใช้วิธี Finite Element ดังนี้

การพิจารณาการกระจายความร้อน จะพิจารณาดังนี้

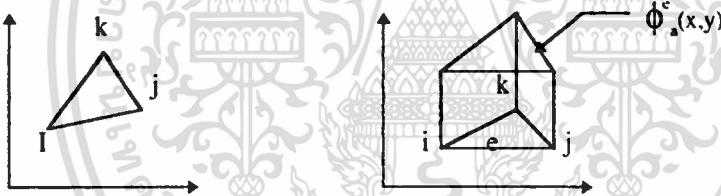
1. ต้องการหาอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ โดยการเฉลี่ยและใช้จุดกึ่งกลางของความสูงของคูลเป็นจุดที่จะพิจารณา
2. สมมติให้การกระจายความร้อนเป็นแบบ 2 มิติ
3. ให้ขอบของระนาบที่พิจารณามี ปริมาณความร้อน 0 w/cm^3

ขั้นตอนและการคำนวณ

จะใช้สมการควบคุมดังต่อไปนี้ในการพิจารณา

$$Dx \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + Dy \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - G\phi + Q = 0$$

พิจารณา B.C.'s $\phi(x,y)$



$$\phi_a(x,y) = N_i \phi_i + N_j \phi_j + N_k \phi_k = [N_i \ N_j \ N_k] \begin{Bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_k \end{Bmatrix} = [N] \{a\}$$

โดยที่

$$N_i = 1/2A[a_i + b_i x + c_i y]$$

$$N_j = 1/2A[a_j + b_j x + c_j y]$$

$$N_k = 1/2A[a_k + b_k x + c_k y]$$

จากรูปสามารถพิจารณา Element e โดยใช้วิธี Galerkin ดังนี้

โดยที่ Weighting function คือ $N_i(x,y)$, $N_j(x,y)$, $N_k(x,y)$

$$\int_e N_i \{ Dx \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + Dy \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - G\phi + Q \} dA = 0$$

$$\int_{\Omega} [N]^T Dx \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} dA + \int [N]^T Dy \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} dA - \int [N]^T G \phi dA + \int [N]^T Q dA$$

จาก calculus
$$\frac{\partial}{\partial x} \left([N]^T \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = [N]^T \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

และจาก วิธี Green's theorem สามารถแยกสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma} [N]^T \left(Dx \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + Dy \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right) d\Gamma + \\ & \left[\int_{\Omega} \left(Dx \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + Dy \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dA + \int_{\Omega} G [N]^T [N] dA \right] \{ \phi^e \} \\ & - \int_{\Omega} G [N]^T dA = 0 \end{aligned}$$

หรือ $\{ \Gamma^e \} + [k^{(e)}] \{ \phi^e \} - \{ f^e \} = 0$

พิจารณา Element $\mu 0$ ใน domain $\{ \Gamma^e \} = \{ 0 \}$ เป็น error term

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า $[k^{(e)}] \{ \phi^e \} = \{ f^e \}$

พิจารณา $[k^{(e)}] = \int_{\Omega} \left(Dx \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + Dy \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dA + \int_{\Omega} G [N]^T [N] dA$

พิจารณา $[k^e] = [k_D] + [k_G]$

พิจารณา $[k_D]$ ให้ $[D] = \begin{bmatrix} Dx & 0 \\ 0 & Dy \end{bmatrix}$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} \\ \frac{\partial [N]}{\partial y} \end{bmatrix}$$

จาก $\phi_a^e = N_i \phi_i + N_j \phi_j + N_k \phi_k$

โดยที่ $[N] = [N_i \ N_j \ N_k]$ โดยที่

$$N_i = 1/2A[a_i + b_i x + c_i y]$$

$$N_j = 1/2A[a_j + b_j x + c_j y]$$

$$N_k = 1/2A[a_k + b_k x + c_k y]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix}$$

$$[B]^T = \left\{ \frac{\partial [N]}{\partial x} \quad \frac{\partial [N]}{\partial y} \right\}$$

จาก $[k_D] = \int_A \left(Dx \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + Dy \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dA$
 $= \int_A [B]^T [D] [B] dA$

$$[B]^T [D] [B] = \left\{ \frac{\partial [N]}{\partial x} \quad \frac{\partial [N]}{\partial y} \right\} \begin{bmatrix} Dx & 0 \\ 0 & Dy \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} \\ \frac{\partial [N]}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

$$[k_D] = [B]^T [D] [B] \int_A dA = [B]^T [D] [B] A$$

$$= \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & c_i \\ b_j & c_j \\ b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dx & 0 \\ 0 & Dy \end{bmatrix} \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} A$$

$$[k_D] = \frac{Dx}{4A} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ \text{sym} & b_j^2 & b_j b_k \\ & & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{Dy}{4A} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ \text{sym} & c_j^2 & c_j c_k \\ & & c_k^2 \end{bmatrix}$$

พิจารณา $[k_G]$ ซึ่ง $[k_G] = \int_A G [N]^T [N] dA$

{ ค่า G อาจจะเป็น function ของ x และ y ได้ เพื่อให้ง่ายเราจะใช้ค่าเฉลี่ยตลอด element (e) } ดังนั้น $= G \int_A [N]^T [N] dA$

$$[k_G] = G \int_A \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{Bmatrix} \{ N_i \quad N_j \quad N_k \} dA$$

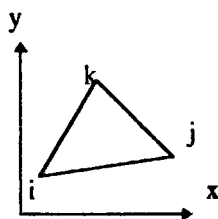
$$= G \int_A \begin{Bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & N_i N_k \\ N_i N_j & N_j^2 & N_j N_k \\ N_i N_k & N_j N_k & N_k^2 \end{Bmatrix} dA$$

จาก Area coordinates

$$N_i = L_i$$

$$N_j = L_j$$

$$N_k = L_k$$



เอกสารนี้เป็น $\int_A L_i^2 L_j^2 L_k^2 dA = \frac{a!b!c!2A}{(a+b+c+2)!}$ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้ว่า $[k_G^e] = \frac{GA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$; ค่า G ใช้ค่า average Over element.

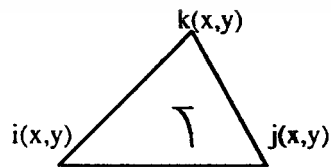
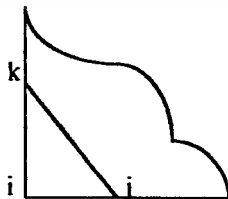
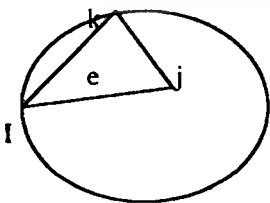
เพราะฉะนั้น

$$[k^e] = \frac{Dx}{4A} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ \text{sym} & b_j^2 & b_j b_k \\ & & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{Dy}{4A} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ \text{sym} & c_j^2 & c_j c_k \\ & & c_k^2 \end{bmatrix} + \frac{GA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

พิจารณา $\{f_Q^e\} = \int_A Q [N]^T dA$; Q อาจจะเป็น function ของ x และ y ได้ ในที่นี้จะใช้ average value over element (e).

$$\begin{aligned} &= Q \int_A [N]^T dA = Q \int_A \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{Bmatrix} dA \\ &= Q \int_A \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{Bmatrix} dA \\ \{f_Q^e\} &= \frac{QA}{12} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

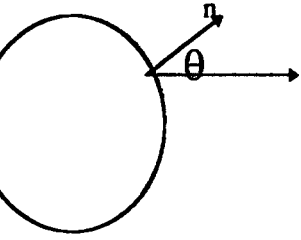
พิจารณา element ที่มีด้านติดกับ Boundary ของ Domain (การเรียกชื่อ element เรียกตามทิศทวนเข็มนาฬิกา)



พิจารณา inter element term $\{f^e\} = -\int_{\Gamma} [N]^T \left(Dx \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + Dy \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right) d\Gamma$

$\int_{\Gamma} = \int_j + \int_{jk} + \int_k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กำหนด B.C. ; $Dx \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + Dy \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta = -M\theta_b + S$

Assume $Dx = Dy$ เรียก Dx

$$Dx \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right\} = -M\theta_b + S$$

พิจารณา 1 ด้านที่อยู่ติดขอบ Boundary เรียกด้าน bc

$$\begin{aligned} &= - \int_{\Gamma_{bc}} [N]^T \left(Dx \frac{\partial \phi}{\partial x} \cos \theta + Dy \frac{\partial \phi}{\partial y} \sin \theta \right) d\Gamma \\ [I_{bc}^e] &= - \int_{\Gamma_{bc}} [N]^T \{ -M\phi_{bc} + S \} dA \\ &= \int_{\Gamma_{bc}} [N]^T M\phi_{bc} dA - \int_{\Gamma_{bc}} S[N]^T dA \end{aligned}$$

$$[I_{bc}^e] = \left\{ \int_{\Gamma_{bc}} M[N]^T [N] dA \right\} \{ \phi^e \} - \int_{\Gamma_{bc}} S[N]^T dA$$

ดังนั้น

$$[k^e] = [k_D^e] + [k_G^e] + [k_M^e]$$

โดยที่ $[k_M^e] = \int_{\Gamma_{bc}} M[N]^T [N] dA$

$$\{ f^e \} = \{ f_Q^e \} + \{ f_S^e \}$$

โดยที่ $\{ f_S^e \} = \int_{\Gamma_{bc}} S[N]^T dA$

$$[I^e] + [k^e] \{ \phi \} = \{ f^e \}$$

ด้าน ij

$$\int_{ij} S[N]^T d\Gamma = \int_{ij} S \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k = 0 \end{Bmatrix} d\Gamma = \int_{ij} S \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{Bmatrix} d\Gamma = \frac{SL_{ij}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\{ f_S^e \} = \frac{SL_{ij}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \frac{SL_{jk}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{SL_{ki}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$[k_M^e] = \int_{\Gamma_{bc}} M[N]^T [N] d\Gamma = \int M \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{Bmatrix} \{ N_i, N_j, N_k \} d\Gamma$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรรมการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \int_{\Gamma_{bc}} M \begin{bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & N_i N_k \\ & N_j^2 & N_j N_k \\ \text{sym} & & N_k^2 \end{bmatrix}$$

บนด้าน ij ($L_3 = 0$)

$$\int_{ij} M[\dots] d\Gamma = \int_{ij} M \begin{bmatrix} N_i^2 & N_i N_j & 0 \\ N_i N_j & N_j^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(จากสูตรอินทิเกรตไปทางด้านใดด้านหนึ่ง คือ $\int_0^L L_1^a L_2^b L_3^c dL = \frac{a!b!L}{(a+b+1)!}$)

จะได้ว่า

$$= \int_{ij} M \begin{bmatrix} L_1^2 & L_1 L_2 & 0 \\ L_1 L_2 & L_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{ML_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เพราะฉะนั้น

$$[k^c] = \frac{Dx}{4A} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ & b_j^2 & b_j b_k \\ \text{sym} & & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{Dy}{4A} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ & c_j^2 & c_j c_k \\ \text{sym} & & c_k^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{GA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{ML_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{ML_{jk}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{ML_{kl}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

จากสมการควบคุม

$$Dx \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + Dy \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - G(x, y)\phi + \phi(x, y) = 0$$

ที่จุด (x_0, y_0) ใน élément $(e) = Q(x, y) = Q \cdot [(x - x_0)] \cdot [(y - y_0)]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \int Q [N]^T dA \\
 \{f_Q\} &= \int_A Q \int (x-x_0) \int (y-y_0) [N]^T dA \\
 &= Q \int_A \int (x-x_0) \int (y-y_0) \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{Bmatrix} \\
 \{f_Q\} &= Q \begin{Bmatrix} N_i(x_0, y_0) \\ N_j(x_0, y_0) \\ N_k(x_0, y_0) \end{Bmatrix} dA
 \end{aligned}$$

โดยการพิจารณาเทอมต่าง ๆ จนได้เป็น เมทริกซ์ ตามวิธีทาง Finite element ตามรูป
หน้าถัดไป ตามสมการ $\{k\} \{\phi\} = \{f\}$



T_1
 T_2
 T_3
 T_4
 T_5
 T_6
 T_7
 T_8
 T_9
 T_{10}
 T_{11}
 T_{12}
 T_{13}
 T_{14}
 T_{15}
 T_{16}
 T_{17}
 T_{18}
 T_{19}
 T_{20}
 T_{21}
 T_{22}
 T_{23}
 T_{24}
 T_{25}

เมตริกซ์ [T]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix}
 Q_2/9 \\
 Q_2/15 \\
 2Q_3/15 \\
 0 \\
 2Q_3/15 \\
 23Q_3/165 \\
 (Q_5/10 + 8Q_5/11 + Q_{10}/16 + Q_{11}/16) \\
 23Q_5/30 \\
 (13Q_2/15 + Q_{15}/16) \\
 0 \\
 Q_{15}/9 \\
 119Q_{15}/144 \\
 9Q_{11}/10 \\
 (117Q_{10}/176 + 3Q_{11}/80) \\
 3Q_{10}/11 \\
 23Q_{25}/165 \\
 (8Q_{25}/11 + Q_{28}/10) \\
 23Q_{28}/30 \\
 13Q_{31}/15 \\
 0 \\
 Q_{31}/9 \\
 Q_{31}/45 \\
 2Q_{28}/15 \\
 0 \\
 2Q_{25}/15
 \end{pmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัด **เมตริกซ์ [Γ]** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณเราจะใช้ การแปรค่า Q (ค่าปริมาณความร้อนที่ให้) ลงในรายการคำนวณเพื่อหาค่า อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ให้ได้ 70° เซลเซียส ซึ่งจะได้อุณหภูมิที่แท้จริงออกมา (เพราะว่า Heater ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นั้นเราไม่รู้ค่า Q ที่แน่นอน) และเราสามารถหาค่า อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ได้ตามต้องการ



โปรแกรม Finite Element ที่ใช้คำนวณหาความร้อนที่จุดต่าง ๆ

```

program test;
uses crt,printer;
var a,c:array [1..51,1..51] of real;
    x:array [1..50] of real;
    Q,i,j,k,n,T:integer;
    m,sum,max,Sk:real;

begin

clrscr;
writeln(1st,'THE PROBLEM.....');
writeln(1st);
writeln( ' HOW MANY THE UNKNOWN FOR YOUR PROBLEM ?');
write ('THE UNKNOWN HAVE ');READLN(n);
writeln('PUT THE VALUE. ');
for i:=1 to n do
begin
for j:=1 to n do
begin
*****
*****
*****
*****
*****
*****0004
2509;

a[13,26]:= Q*000041667;
a[14,26]:= Q*0000297141;
a[15,26]:= Q*0000114784;
a[16,26]:= Q*00000625786;
a[17,26]:= Q*0000375879;
a[18,26]:= Q*00003786;
a[19,26]:= Q*000047553;

a[20,26]:= 0;

a[21,26]:= Q*00000609663;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a[22,26]:= Q*0000012193;
a[23,26]:= Q*0000065843;
a[24,26]:= 0;
a[25,26]:= Q*0000059873;
for i:=1 to n do
begin
  Sk:=abs(a[i,1]);
  for j:=2 to n do
  begin
    if abs(a[i,j]) > Sk then Sk:=abs(a[i,j]);
  end;
  for j:=1 to n+1 do
  begin
    a[i,j]:=a[i,j]/Sk;
  end;
end;
for k:=1 to n-1 do
begin
  for j:=k to n do
  begin
    max:=abs(a[k,k]);T:=k;
    for i:=k+1 to n do
    begin
      if abs(a[i,j]) > max then
      begin
        max:=abs(a[i,j]);T:=i;
      end;
    end;
    if (T<>k) and (max<>0) then
    begin
      c[k]:=a[k];
      a[k]:=a[T];
      a[T]:=c[k];
    end;
  end;
end;
end;
if max <> 0 then
begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i:= k+1 to n do
begin
  m:=a[i,j]/a[k,k];
  for j:=k to n+1 do
  begin
    a[i,j]:=a[i,j]-m*a[k,j];
  end;
end;
end;
if max=0 then
begin
  k:=n-1;
  writeln( 'MATRIX IS SINGULAR MATRIX.' );
  writeln('CANNOT FIND THE ANSWER FOR THIS PROBLEM. ');
end;
end;
if max <>0 then
begin
  for i:=n downto 1 do
  begin
    sum:=0;
    for j:=i+1 to n do
    begin
      sum:=sum+a[i,j]*x[j];
    end;
    x[i]:=a[i,n+1]-sum/a[i,i];
  end;
end;
until x[i] > 70;
writeln(lst);
for i:=1 to n do
begin
  for j:=1 to n+1 do
  begin
    writeln(lst,'a[',i,',',j,']=',a[i,j]:3:3);
  end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไร้อื่น; รมติใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
writeIn(lst);  
writeIn(lst,'WHEN Q = ',Q,'Watt/cm*cm'.Q:3);  
writeIn(lst,'ANSWER .....');  
for i=1 to n do  
begin  
    writeIn(lst,'T['.i.']='.x(i):3:4);  
end;  
end.
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมคำนวณค่าอนทาลปีของวัสดุตามทฤษฎี

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
int n,i;
float h,Ug,alp,bet,k,E,w,Ar,g=9.81,ke;
char ans;
main()
{
  clrscr();
  printf("\n");
  printf(" input E= ");
  scanf("%f",&E);
  printf("\n input w= ");
  scanf("%f",&w);
  printf("\n input Ar= ");
  scanf("%f",&Ar);
  do
  {
    printf("\n\n");
    printf("input Ug= ");
    scanf("%f",&Ug);
    printf("input alp= ");
    scanf("%f",&alp);
    printf("input bet= ");
    scanf("%f",&bet);
    k=Ar*(w*w)*sin((alp+bet)*3.1416/180)/(g*cos(bet*3.1416/180));
    ke=pow(k,0.1);
    h=10.4*Ug/(1-E)*ke;
    printf("h= %6.4f\n",h);
    printf("do you want to cal again?:");
    ans=getche();
    getch();
  }
  while(ans=='y');
}

```

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมคำนวณค่าเอนทาลปีของวัสดุจากการทดลอง

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
int n,i;
float h,Qt,Qv,Qs,Qw,F,dw,hw,cps,dts,cpw,dtw,dtav,As
,Tgi,Tgo,Tsi,Tso;
char ans;
main()
{
clrscr();
printf("\n");
printf("input hw= ");
scanf("%f",&hw);
printf("input cps= ");
scanf("%f",&cps);
printf("input cpw= ");
scanf("%f",&cpw);
printf("input As= ");
scanf("%f",&As);
do
{
printf("\n\n");
printf("input F= ");
scanf("%f",&F);
printf("input delta w= ");
scanf("%f",&dw);
printf("input cps= ");
scanf("%f",&cps);
printf("input delta ts= ");
scanf("%f",&dts);
printf("input cpw= ");
scanf("%f",&cpw);
printf("input delta tw= ");
scanf("%f",&dtw);
printf("input Tgi,Tgo,Tsi,Tso= ");
scanf("%f,%f,%f,%f",&Tgi,&Tgo,&Tsi,&Tso);
Qv=F*dw*hw;
Qs=F*cps*dts;
Qw=F*cpw*dtw;
Qt=Qv+Qs+Qw;
dtav=((Tgi-Tso)-(Tgo-Tsi))/(log((Tgi-Tso)/(Tgo-Tsi)));
h=Qt/(dtav*As);
printf("h= %6.4f\n",h);
printf("do you want to cal again?:");
ans=getche();
getch();
}
while(ans=='y');
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้