

การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น
EXPERIMENTAL STUDY OF WAVY SURFACE FLUIDIZED BED
DRYING OF PEPPERCORN



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62087**
วัน,เดือน,ปี 31 ก.ค. 2549

b.....
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น

EXPERIMENTAL STUDY OF WAVY SURFACE FLUIDIZED BED DRYING
OF PEPPERCORN

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติชัย พาวขุนทด รหัสประจำตัว 45015404
2. นายสุวิทย์ สุวรรณรุ่งโรจน์ รหัสประจำตัว 45015447
3. นายเอกรินทร์ จินดาพี รหัสประจำตัว 45015487



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะการอบแห้งเม็ดพริกไทยในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น

นายกิตติชัย พาวขุนทด 45015404

นายสุวิทย์ สุวรรณรุ่งโรจน์ 45015487

นายเอกรินทร์ จินดาพี 45015447

รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรอกแบบอุปกรณ์สำหรับศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยวิธีการฟลูอิดไดเซชันแบบธรรมดา อุปกรณ์นี้สามารถศึกษาถึงปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ซึ่งวัสดุที่ใช้คือเม็ดพริกไทย และยังได้ทดลองเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแบบฟลูอิดไดเซชัน โดยการติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไป เพื่อเป็นการลดสัดส่วนช่องว่างภายในเบดลง และยังเป็นกรทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในคอลัมน์มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งดีขึ้น โดยใช้คอลัมน์ที่มีทิวสูง 1 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 17 เซนติเมตร และมีกรวยที่มีรูขนาด $1/3$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางคอลัมน์ สูง 8.5 เซนติเมตรมาวางสลับกันภายในคอลัมน์เป็นลูกคลื่นหลาย ๆ คลื่นต่อกัน จะได้คลื่นขนาดลูกละ 17 เซนติเมตร

ทั้งนี้ยังเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพการอบแห้งโดยวิธีฟลูอิดไดเซชันในการลดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น(เทียบน้ำหนักแห้ง)ของเม็ดพริกไทย ในการทดลองใช้ฮีทเตอร์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 70 , 85 และ 100 องศา และอัตราการไหลของอากาศร้อนภายในหอบมีค่า $1.0 U_{mf}$, $1.2 U_{mf}$ และ $1.4 U_{mf}$ โดยใช้เวลา 100 นาที เก็บถ่วงน้ำหนักของพริกไทยทุก ๆ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL STUDY OF WAVY SURFACE FLUIDIZED BED DRYING OF PEPPERCORN

Kittichai Powkhuntod 45015404

Suwit Suwanrungronj 45015487

Aggarin Jindapee 45015447

Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

This project was to design and construct a fluidized bed dryer with wavy surface. This aim is to study the fluidization phenomenon occurring in the bed with wavy surface. The materials tested were pepper corns by using the principle of air fluidization. The wavy surface fitted in the bed is to improve drying efficiency because this surface help to increase turbulence and good mixing between hot air and solid particals. In the experiment the bed is 1 m high and 0.17 m inner diameter .The wave surface was made in a conical section which its diameter is 1/3 of inner bed and 0.085 m long for each section.

The fluidized bed dryer help to decrease the moisture percentages (dry basis) of the pepper corn. The inlet temperature of 70°C, 85°C, and 100°C with the velocities of 1.0 U_{mf} , 1.2 U_{mf} and 1.4 U_{mf} were employed for the drying time of 100 minutes for each test, and the results of drying were recorded for every 10 minutes.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้เสร็จลงได้ ก็คือ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่การุณ และมาน รุ่นที่ปริญญาโทที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอ กราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	4
บทที่ 3 ทฤษฎี	11
3.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง	11
3.2 กระบวนการอบแห้ง	11
3.2.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่	12
3.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	12
3.3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	13
3.4 หลักการอบแห้งเม็ดพืช	14
3.5 นิยามความชื้นในวัสดุ	15
3.5.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก	15
3.5.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง	15
3.6 ฟลูอิดไดเซชัน	15
3.7 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน	18
3.7.1 ฟลูอิดไดเซชันความเร็วของไหลต่ำสุด	19
3.7.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบและแบบขลุมน	20
3.7.3 การเกิดฟองก๊าซและชั้นสลับของของไหลกับเม็ดของแข็ง	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
3.8 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	20
3.8.1 ความเป็นทรงกลม	21
3.8.2 สัดส่วนช่องว่าง	21
3.8.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน	22
3.8.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง	23
3.8.5 การหาความเร็วของก๊าซในหอตลอดฟลูอิดไดซ์เบด	24
3.9 สถานะของฟลูอิดไดเซชัน	24
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	26
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	26
4.1.1 หอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด	26
4.1.2 ชุดวัดอุณหภูมิและความชื้นและความกดอากาศ	28
4.1.3 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ	29
4.1.4 ชุดป้อนอากาศ	30
4.1.5 ชุดท่อทางเดินของอากาศ	31
4.1.6 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพด	32
4.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง	33
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	34
4.3.1 การทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) ของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด	34
4.3.2 การทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพด	34
4.3.3 การทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพริกไทยหลังการอบ	34
บทที่ 5 ผลการทดลอง	36
5.1 ผลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (U_{mf})	36
5.2 ผลการทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทย	36
5.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพริกไทย	37
5.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมภายในหอตลอด	45
5.5 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบ	53
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	57
บรรณานุกรม	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก ก	59
1. การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์(U_{mf})	60
2. คำนวณความชื้นเริ่มต้น	61
3. การคำนวณหาความชื้นคงเหลือ	62
4. การคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน	63
ภาคผนวก ข	64
ตารางบันทึกผลการทดลอง	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันของมวลชีวภาพ	57
ตารางที่ ข.1 การทดลองครั้งที่ 1 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	58
ตารางที่ ข.2 การทดลองครั้งที่ 2 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	59
ตารางที่ ข.3 การทดลองครั้งที่ 3 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	60
ตารางที่ ข.4 การทดลองครั้งที่ 4 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	61
ตารางที่ ข.5 การทดลองครั้งที่ 5 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	62
ตารางที่ ข.6 การทดลองครั้งที่ 6 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	63
ตารางที่ ข.7 การทดลองครั้งที่ 7 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	64
ตารางที่ ข.8 การทดลองครั้งที่ 8 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	65
ตารางที่ ข.9 การทดลองครั้งที่ 9 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 170 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	66
ตารางที่ ข.10 การทดลองครั้งที่ 10 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	67
ตารางที่ ข.11 การทดลองครั้งที่ 11 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	68
ตารางที่ ข.12 การทดลองครั้งที่ 12 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	69
ตารางที่ ข.13 การทดลองครั้งที่ 13 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่อนระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้าที่
ตารางที่ ข.14 การทดลองครั้งที่ 14 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	71
ตารางที่ ข.15 การทดลองครั้งที่ 15 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	72
ตารางที่ ข.16 การทดลองครั้งที่ 16 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.073 m ³ /s	73
ตารางที่ ข.17 การทดลองครั้งที่ 17 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	74
ตารางที่ ข.18 การทดลองครั้งที่ 18 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.102 m ³ /s	75
ตารางที่ ข.19 การทดลองครั้งที่ 19 ในหอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา(หอเปล่า) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100° C อัตราการไหลอากาศ 0.087 m ³ /s	76
ตารางที่ ข.20 การทดลองหาค่าความเร็วค่าสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน(U_{mf})	77
ตารางที่ ข.21 การทดลองหาค่าความเร็วโดยใช้ Hot-wire กับ H_{optic}	78

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 แสดงการให้กำเนิดคลื่นอากาศจากแหล่งกำเนิดภายนอก	2
รูปที่ 1.2 แสดงค่าความขึ้นที่ลดลงโดยเทียบระหว่างฟลูอิด ไคซ์เบคแบบธรรมดา และแบบที่ใช้ลำโพง	2
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขึ้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง (Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985)	11
รูปที่ 3.2 การอบแห้งกับเวลา	13
รูปที่ 3.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไคซ์เบค [Daizo Kunii, 1991]	17
รูปที่ 3.4 ลักษณะต่างๆ ของฟลูอิดไคซ์เบคที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น	19
รูปที่ 3.5 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง (Kunii, D. Levenspiel, O. 1991)	21
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็วอากาศ	23
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของผลต่างของความดันกับความเร็วลมในเตา	24
รูปที่ 4.1 แสดงภาพของหีบอบแห้งเปล่า	26
รูปที่ 4.3 แสดงภาพของหีบอบแห้งผิวคลื่นแบบตั้ง	27
รูปที่ 4.2 แสดงภาพของลูกคลื่น	27
รูปที่ 4.4 แสดงภาพของหีบอบแห้งผิวคลื่นแบบห่าง	27
รูปที่ 4.5 แสดงภาพของชุดเคลวความร้อน	28
รูปที่ 4.6 แสดงภาพของชุดเบรกเกอร์ควบคุมเคลวความร้อน	28
รูปที่ 4.7 แสดงภาพชุดควบคุมอุณหภูมิของชุดเคลวความร้อน	28
รูปที่ 4.8 แสดงภาพเครื่องวัดอุณหภูมิแบบสวิตช์	29
รูปที่ 4.9 แผ่นออริฟิส	29
รูปที่ 4.10 แสดงภาพออริฟิสเมเตอร์	29
รูปที่ 4.12 ภาพแสดงมอเตอร์และพัดลมอัดอากาศ	30
รูปที่ 4.11 แสดงภาพมานอมิเตอร์แบบตัวยู	30
รูปที่ 4.13 ภาพแสดงอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	31
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงโกล์บวาล์ว และชุดออริฟิส	31
รูปที่ 4.14 ภาพแสดงตาชั่งดิจิทัล	32
รูปที่ 4.16 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบค	33
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็ว	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.073 m ³ /s ของหอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	37
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.087 m ³ /s ของหอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	37
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.102 m ³ /s ของหอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	38
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.073 m ³ /s หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	38
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.087 m ³ /s หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	39
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อัตราการไหล 0.102 m ³ /s หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	39
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	40
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	40
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	41
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	42
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	42
รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	43
รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบที่อัตราการไหล 0.087 m ³ /s และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอทดลองแบบต่าง ๆ	44
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลอง ที่อัตราการไหล 0.073 m ³ /Sของหอทดลองแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ ของหอตลอดแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	45
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ ของหอตลอดแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm	45
รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ หอตลอดแบบคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	46
รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ หอตลอดแบบคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	46
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ หอตลอดแบบคลื่นระยะพิตช์ 255 mm	47
รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	47
รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด ที่อัตราการไหล $0.102 \text{ m}^3/\text{s}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของหอแบบคลื่นระยะพิคซ์ 170 mm	52
รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ของหอแบบคลื่นระยะพิคซ์ 170 mm	52
รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอแบบคลื่นระยะพิคซ์ 170 mm	53
รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของหอแบบคลื่นระยะพิคซ์ 255 mm	54
รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ของหอแบบ คลื่นระยะพิคซ์ 255 mm	54
รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอแบบคลื่นระยะพิคซ์ 255 mm	55
รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว 1.2 m/s ของหอทดลองทั้ง 3 แบบ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

ตัวอักษร

A	=	พื้นที่หน้าตัดของฟลูอิดไดซ์เบด (m^2)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (m)
g	=	ค่าอัตราเร่งอันเนื่องมาจากแรง (m/s^2)
H	=	ความสูงของคอลัมน์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (m)
H_0	=	ความสูงของเบดเริ่มต้น (m)
ΔP	=	ค่าความดันลดในคอลัมน์ของฟลูอิดไดซ์เบด ($mm.Hg$)
u_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน (m/s)
u_t	=	ความเร็วลมหดลอย (m/s)
W	=	น้ำหนักของชั้นวัสดุ (kg)
X	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (เทียบกับน้ำหนักแห้ง) ของวัสดุอบ
W_d	=	น้ำหนักแห้งของวัสดุ (kg)
M_{p1}	=	สัดส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งทางเข้า ($kg\ water/kg\ solid$)
M_{p2}	=	สัดส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งทางออก ($kg\ water/kg\ solid$)
C_m	=	ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg)
T_{m2}	=	อุณหภูมิของวัสดุทางออก (K)
T_{m1}	=	อุณหภูมิของวัสดุทางเข้า (K)
h_{fg}	=	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ ($kJ/kg\ water$)
h_f	=	เอนทาลปีจำเพาะที่ทางเข้า (kJ/kg)
h_0	=	เอนทาลปีจำเพาะที่สภาวะบรรยากาศ (kJ/kg)
\dot{m}_{da}	=	อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s)
ΔT	=	ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าออกของระบบ

ตัวอักษรกรีก

ε_0	=	อัตราส่วนช่องว่างในคอนเริ่มต้น
ε_{mf}	=	อัตราส่วนช่องว่างที่ความเร็วต่ำสุดของการเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน
μ_f	=	ความหนืดของลมร้อน ($kg.m/s$)
ρ_s	=	ค่าความหนาแน่นของเม็ดวัสดุอบ (kg/m^3)
ρ_f	=	ค่าความหนาแน่นของลมร้อน (kg/m^3)
ρ_b	=	ความหนาแน่นปรากฏของชั้นวัสดุ (kg/m^3)

บทที่ 1

บทนำ

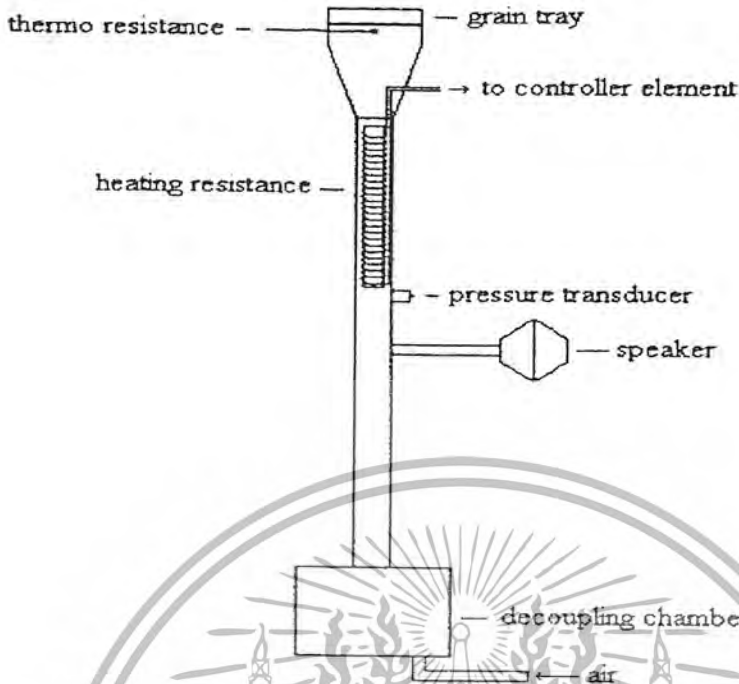
การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัสดุด้วยการระเหย ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน หรือการพาความร้อนจากแหล่งความร้อนมายังวัสดุ โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย และยังสามารถนำความชื้นออกจากวัสดุไปพร้อม ๆ กันด้วย

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

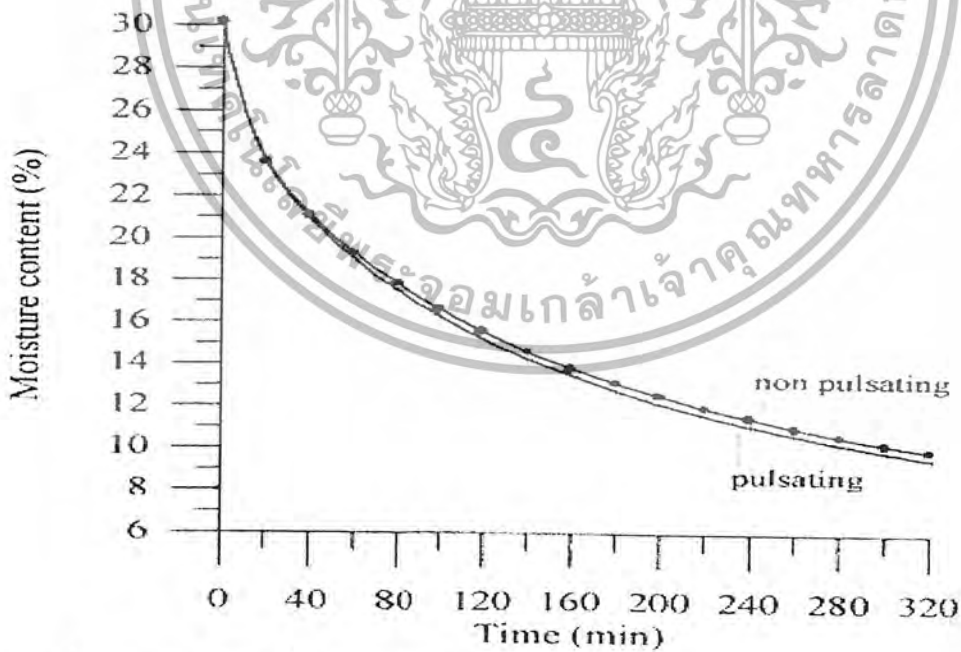
พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของจังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีการแปรรูปทั้งแบบสดและแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดสดทั่วไป และพริกไทยแห้งจะแบ่งเป็นสองประเภทคือพริกไทยดำและพริกไทยขาว ซึ่งจะนำไปขายทั้งเมล็ดในท้องตลาดและนำส่งโรงงานอุตสาหกรรมสู่กระบวนการผลิตเป็นพริกไทยป่นต่อไป

การผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งนอกจากเป็นภาระลดนอมอาหารให้มีอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นวิธีหนึ่งแล้ว ยังเป็นการเปลี่ยนรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับมากขึ้นด้วย ในปัจจุบันมีการผลิตทั้งในระดับอุตสาหกรรมในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ผู้ผลิตรายย่อยมักใช้การผลิตด้วยวิธีการตากแห้ง(ตากแดด)ตามธรรมชาติ ซึ่งการตากแห้งดังกล่าวมีปัญหาเกี่ยวกับเศษวัสดุและฝุ่นละออง หรือการรบกวนของแมลงต่าง ๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และยังคงค้างถึงชนิด ขนาด สี กลิ่นและความชื้นของพริกไทยอีกด้วย ดังนั้นการที่จะทำให้พริกไทยมีคุณภาพ สี สัน ความสะอาดและเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ท้องตลาดต้องการ จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการทำให้พริกไทยแห้ง มีคุณภาพและแยกเศษวัสดุ ฝุ่นละอองได้ในคราวเดียวกัน

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการและการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น ที่พัฒนามาจากเครื่องอบฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา ซึ่งได้แนวคิดมาจากการใช้ลำโพงต่อเข้ากับหอฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดา โดยอาศัยหลักการการสั่นของคลื่นเสียงในอากาศ ทำให้ภายในหอเกิดการไหลของอากาศแบบปั่นป่วนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของทั้งสองแล้วมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งที่วัสดุดิบ เวลา และน้ำหนักเท่ากัน แต่ปริมาณความชื้นที่วัดได้กลับมีค่าแตกต่างกันมาก จึงมีแนวคิดที่จะใช้เป็นผิวคลื่นที่ทำให้เกิดการไหลของอากาศแบบปั่นป่วนโดยตรงแทนการใช้ลำโพง [1]



รูปที่ 1.1 แสดงการให้กำเนิดคลื่นอากาศจากแหล่งกำเนิดภายนอก



รูปที่ 1.2 แสดงค่าความชื้นที่ลดลงโดยเทียบระหว่างฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาและแบบที่ใช้ลำโพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
- 2) ประยุกต์การเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบและแบบผิวคลื่นในกระบวนการอบแห้ง
- 3) ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่าง ๆ
- 4) ศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิ, ความเร็วของกระแสลมร้อนและลักษณะของกระแสลมร้อนที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวเรียบและผิวคลื่น
- 2) ทดลองหาความเร็วเบดหลุดลอย (U_{mf}) ของเมล็ดพริกไทย
- 3) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ที่การกระจายตัว ด้านล่าง หอ ,การกระจายตัวทั่วหอ และ การกระจายตัวอยู่ด้านบนหอ ซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศร้อนภายในหออบมีค่า $1.0 U_{mf}$, $1.2 U_{mf}$ และ $1.4 U_{mf}$ ตามลำดับที่อุณหภูมิ 70°C , 85°C และ 100°C
- 4) ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิ 70°C , 85°C และ 100°C ในช่วงความเร็วลม $1.0 U_{mf}$, $1.2 U_{mf}$ และ $1.4 U_{mf}$ โดยแบ่งเป็นกรณีดังนี้
 1. ฟลูอิด ไดซ์เบดแบบผิวเรียบ
 2. ฟลูอิด ไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 170 mm
 3. ฟลูอิด ไดซ์เบดแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 255 mm

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนด เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

Suksankraisom, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันจากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

Kozanoglu, Welti Chanes, Garcia Cuautle and Santos Jean (2002) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของไฮโดรไดนามิกของก๊าซฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาด 2250-7730 μm ในหอตลอดที่ควบคุมความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอตลอดขนาด 100 มิลลิเมตร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันในหอตลอดลดลง และช่องว่างในเบดที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน พบว่าไม่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชัน ของเชื้อเพลิงมวลชีวภาพ ถูกศึกษา โดย Abdullah, Husain and Yin Pong (2003) โดยใช้อากาศเป็นของไหลในระบบ โดยพิจารณา ความดันตกคร่อมเบดกับ Superficial air velocity และนำไปใช้หาค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิด ไคเซชันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ลำดับที่	ชนิดวัสดุ	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	Geldart Classification	u_{mf} (m/s)
1	ขี้เถ้า	786.5	B	0.22
2	แกลบ	1500	D	0.37
3	เปลือกถั่วลิสง	613.4	B	0.29
4	ถ่านหิน	518.8	B	0.51

ตารางที่ 2.1 ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชันของมวลชีวภาพ

จากผลการทดลองค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชันของ ขี้เถ้า เปลือกถั่วลิสง และ ถ่านหิน ซึ่งเป็น Geldart B มีค่าใกล้เคียงค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชันที่ได้จาก ทฤษฎี และในงานวิจัยยังบอกถึงความหนาแน่นและช่องว่างของเบดเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพ ของฟลูอิด ไคเซชัน

Mawatari, Tatamoto and Noda (2003) ได้หาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชัน สำหรับชุดการทดลองฟลูอิด ไคเซชันร่วมกับการสัน ซึ่งใช้กลุ่มของอนุภาค Geldart A และ C โดย เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการของ Ergun ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความเร็วต่ำ สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชัน โดยการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับ Geldart A แต่ Geldart C มีค่าแตกต่างกันเพราะอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อน

นายวรเมธ ทัดทอง (2546) ได้ศึกษาตัวแปรของกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิด ไคเซชัน จากเงื่อนไขในการทดลองการอบแห้งโดยใช้หอทดลองอะคริลิก ไส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm และ ความสูง 1000 mm อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอ ทดลองอยู่ในช่วง 60-100 °C อัตราการไหลเฉพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21-0.43 kg/s/kg dry coffee ความชื้นเริ่มต้น 68 % มาตรฐานเปียก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีพื้นฐานแบบจำลองมาจาก Newton และ Page ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตรา การอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตาม ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 °C ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงถึง 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 5 ชั่วโมง แต่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดข้าวโพดโดยผลเฉลยของ Fick's law อยู่ในช่วง 1.18×10^{-10} - 5.61×10^{-10} m^2/s ที่อุณหภูมิที่ระบุ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยการหาค่าคงที่การอบแห้ง (k_1) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแล้วนำไปแทนในสมการของ Newton และการหาค่าคงที่ของการอบแห้ง (k_2) และค่าคงที่ (n) ในสมการของ Page พบว่าแบบจำลองที่พัฒนามาจากสมการของ Page ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) อยู่ในช่วง 0.9671-0.9992 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของ Newton

นายทรงวุฒิ โพธิ์คี และคณะ (2546) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด โดยวิธีฟลูอิดไดเซชัน และวอร์เทค และยังได้ทดลองเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพของการอบแบบฟลูอิดไดเซชัน โดยการเพิ่มอากาศหมุนวนเข้าไปในเบดเพื่อเป็นการลดสัดส่วนช่องว่างภายในเบด (ϵ) ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งดีขึ้นซึ่งเมล็ดข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองนี้มีความชื้น 14% มาตรฐานแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก 52% โดยใช้หอทดลองขนาดความสูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.13 เมตร โดยใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งความร้อนโดยการทดลองนี้ใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 50, 75 และ 100 °C ที่ความเร็ว 1.3, 1.5 และ 1.7 m/s โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 2 ชั่วโมง และทำการวัดความชื้นทุก ๆ 20 นาที

อนันต์ พงษ์ธรรมาพิช (2539) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวโพดที่ความชื้นสูง และช่วงอุณหภูมิสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิทางเข้าหอทดลอง และอัตราการไหลจำเพาะ มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี ได้แก่ สมการของ Wang-Singh, Page และสมการของ Lewis มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า สมการของ Wang-Singh สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย (2540) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการอบแห้งถั่วเหลือง โดยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอุณหภูมิในการอบแห้ง 110-140 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7-33.3 มาตรฐานแห้ง ความสูงเบด 10-15 cm และความเร็วของการอบแห้ง 2.4-4.1 m/s จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ และพบว่า Page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน (2542) พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้สมการการอบแห้งทางทฤษฎี โดยพิจารณารูปทรงข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอกสั้น และใช้แบบจำลองสมการของ Arrhenius พบว่าสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ตลอดช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิของอากาศในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากกว่าความชื้นของข้าวเปลือก

Soponronnarit, Kittipom and Prachayawarakorn (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง และนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ บนพื้นฐานของพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดอยู่ระหว่าง 19-40% มาตรฐานแห้ง และอบแห้งภายใต้อุณหภูมิอากาศ 130-175 องศาเซลเซียส ความสูงของเบด 17-22 cm ความเร็วของอากาศ 2.7 m/s และเป็นเวลา 3-7 นาที จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 28% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 4.7-6.7 และ 0.3-0.6 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดน้อยกว่า 23% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเล็กน้อยกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 15.2-27.8 และ 0.8-2.0 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ

Sharma (1999) ทำการอบแห้งมันฝรั่งและมะม่วงดิบที่ 4 รูปปร่าง (แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกระบอกผ่าครึ่ง และพีรามิด) และสามขนาด (10, 15 และ 20 mm) ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C โดยวิธีฟลูอิดไดซ์เซชันต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลยอนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.08×10^{-9} และ $3.32 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 4.09×10^{-10} และ $1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.43×10^{-9} - $3.75 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 7.55×10^{-10} - $1.40 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่ำสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวดำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวดำ และความ

ยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane and Singh (1999) ทำการทดลองในเครื่องอบแห้งชนิดถาด ในการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งหัวหอมแบบแผ่น ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 50-80 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.25-1.00 m/s และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 10-20% และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Arrhenius-type model และ Power model โดยใช้เทคนิค non-linear regression analysis พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องสำหรับทำนายอัตราการอบแห้งหัวหอมแผ่น และยังพบอีกว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น และที่ความเร็วสูงสุด อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าน้อย อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด

กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สิริทิประภาพร (2545) ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยมีความหนาของพริกประมาณ 30 mm ความเร็วของลมร้อน 5.5 m/s และอุณหภูมิของอากาศร้อนอยู่ในช่วง 80-110 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพริกให้เหลือความชื้นน้อยกว่า 8% จะใช้เวลา 4 ชั่วโมง และจากการวิเคราะห์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบพริกอยู่ในช่วง 80-90 องศาเซลเซียส ถ้าอบด้วยอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง แต่สีของพริกจะคล้ำมากขึ้น และไม่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่ดี

Syahrul, Hamdullahpur and Dincer (2002) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความชื้นจากวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัสดุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

Srivastava and John (2002) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งเมล็ดธัญพืช โดยใช้สมการ Semi-empirical ของชั้นบางสำหรับทำนายความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดนิ่งของธัญพืช อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ และช่องว่างภายในเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบดมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

Akpinar, Midilli and Bicer (2003) ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งแผ่นมันฝรั่งแบบชั้นบาง ในเครื่องอบแห้งไซโคลน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการอบแห้งของชั้นบางในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้จำนวน 8 สมการ จากผลการทดลองอบแห้งแผ่นมันฝรั่งที่มีความหนา 12.5 และ 8 mm อุณหภูมิทางเข้าของอากาศที่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วอากาศ 1 และ 1.5 m/s สรุปได้ว่าแผ่นมันฝรั่งซึ่งหนา 12.5 mm จะใช้เวลาในการอบแห้ง 460-740 นาที ซึ่งมากกว่าที่ความหนาของแผ่นมันฝรั่ง 8 mm จะใช้เวลาการอบแห้ง 280-520 นาที ความเร็วอากาศมีผลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของชั้นบางถูกหาโดยเทคนิค non-linear regression analysis และหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของแบบจำลองการแพร่ ของสมการการอบแห้งมันฝรั่ง ซึ่งทั้ง 8 สมการให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง

Togrul and Pehlivan (2003) ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งของผลเอพริคอต (apricot) โดยผ่านอากาศร้อนผ่านห้องอบแห้ง ในการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 0.2, 0.5, 1.0 และ 1.5 m/s และอุณหภูมิอากาศ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการอบแห้งกับเวลา และปริมาณความชื้น ใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองการอบแห้งทางคณิตศาสตร์ทั้ง 14 แบบ ซึ่งพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ และได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ จากการทดลอง Logarithmic model ให้ความถูกต้องในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งผลเอพริคอตมากที่สุด การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วง Falling rate period ที่ได้จากการทดลองพบว่า การใช้เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอุณหภูมิภายในผลเอพริคอต

Senadeera, Bhandari, Young and Wijesinghe (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ของอนุภาคทรงสามรูปทรงคือ แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่ได้จากมันฝรั่ง 3 ขนาดในอัตราส่วนด้านต่อความยาว 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และจากการตัดเมล็ดหัวเขียวในอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับทรงกระบอก และเมล็ดหัวสำหรับทรงกลม ตามลำดับ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 15% และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้

โปรดใช้ Exponential model ($MR = \exp(-kt)$) และ Page model ($MR = \exp(-kt^n)$) พบวิจัยว่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การแพร่มีผลเพียงเล็กน้อยกับขนาดของอนุภาคเมื่อความชื้นถูกพิจารณาในสามมิติ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

Hatamipour and Mowla (2003) ทำการศึกษาสัมพัทธ์ของ การหดเหี่ยว ความหนาแน่น และการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และถั่วเขียว ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของวัสดุ ขนาด และการแพร่ของมวลซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น พบว่าอุณหภูมิของอากาศและความเร็วของอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การหดเหี่ยวและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันเพียงสองอย่างของปริมาณความชื้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น

Ertekin and Yaldiz (2004) ทำการอบแห้งมะเขือยาวโดยเทคนิคการอบแห้งของแผ่นบาง เพื่อหาคุณสมบัติของมะเขือยาว โดยเปลี่ยนแปดอุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศจาก 0.5-2.0 m/s และเปลี่ยนความหนาที่มะเขือยาวที่หั่นเป็นแผ่น โดยหาเวลาในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการอบแห้งกับแบบจำลองการอบแห้งของแผ่นบาง ผลกระทบของอุณหภูมิ และความเร็วอากาศต่อค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการอบแห้งโดยใช้เทคนิค Multiple regression analysis จากผลการทดลองแสดงว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วอากาศจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง และแผ่นของมะเขือยาวยิ่งบางทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศและเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มความเข้มของสีของผลิตภัณฑ์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มความเร็วอากาศ จะเพิ่มอัตราการลดลงของอัตราส่วนความชื้น และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Midilli และคณะ (2002) สามารถจำลองการอบแห้งของมะเขือยาวได้ดีที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากที่สุด และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นจะแตกต่างกันไปตามตามชนิดของธัญพืช และสภาวะเงื่อนไขในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความสำคัญต่อการทำนายการอบแห้ง เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวธัญพืชได้ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

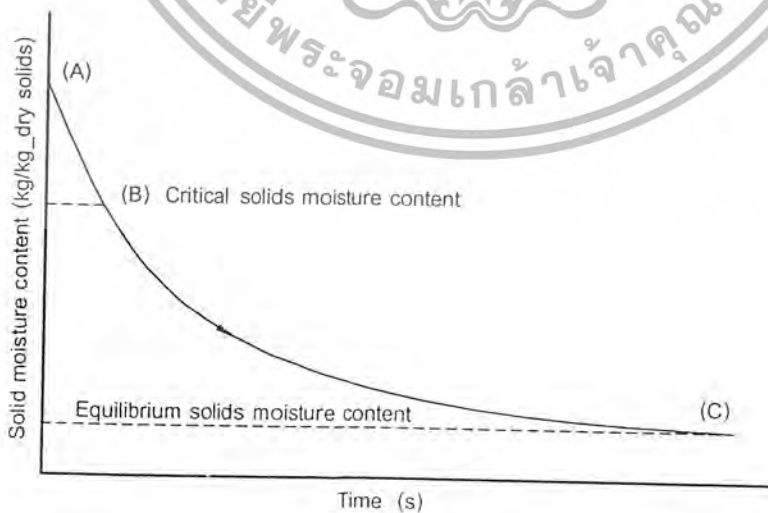
3.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง

การอบแห้งคือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย สิ่งสำคัญในการอบแห้งคือ การทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อให้ความชื้นของวัสดุนั้นมีค่าลดลง

โดยทั่วไปแล้วปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้ง มักจะถูกนิยามในรูปของอัตราส่วนของน้ำในวัสดุต่อมวลทั้งหมดของวัสดุหรือเรียกกันว่าน้ำหนักเปียก นั่นคือใช้มวลของวัสดุชื้นเป็นมาตรฐานของการคำนวณความชื้น แต่บางครั้งก็ใช้น้ำหนักเปียกในการคำนวณนั้นในแต่ละวัน ความชื้นในวัสดุมีค่าไม่เท่ากันอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้จึงอาจใช้เป็นน้ำหนักแห้งของวัสดุแทนได้ แล้วแต่ผู้ทำการคำนวณจะเลือกใช้

3.2 กระบวนการอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้งนั้นถ้าเรากระทำอย่างต่อเนื่องความชื้นของวัสดุจะแปรผกผันกับเวลาคือความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาในการอบมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ (Davidson, J. F., Cliff, R. and Harrison, D. 1985) ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate Drying Period)

จากรูปที่ 3.1 ในช่วง A ถึง B ผิววัสดุจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิวล่าช้ากว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุมายังผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของผิววัสดุมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ T_{wb} และความเข้มข้นของน้ำที่ผิววัสดุคงที่ ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ถ้า p_{wb} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, p คือ ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ และ K_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าอัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุ N_c ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่กำหนดโดยสมการ

$$N_c = K_p (p_{wb} - p) \quad (3.1)$$

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$N_c = \frac{h}{\lambda} (T - T_{wb}) \quad (3.2)$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุ, λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและ T คือ อุณหภูมิอากาศ

3.2.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

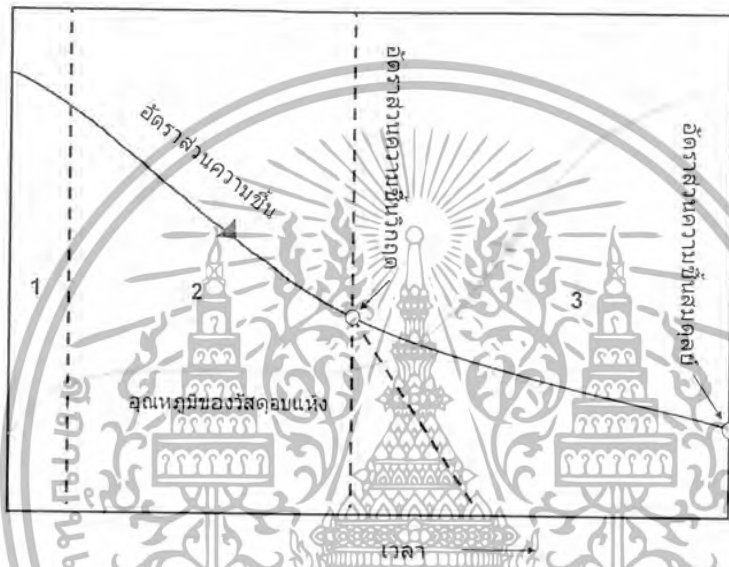
ช่วง B ถึง C หลังจากที่มีความชื้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุถูกระเหยออกไปมากแล้ว อัตราการอบแห้งจะเริ่มเปลี่ยนแปลงจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่ตำแหน่ง B นี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนั้น การแพร่ของความชื้นมายังผิววัสดุช้ากว่าการระเหยของน้ำที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุ โดยที่ผิวของวัสดุจะค่อยๆ แห้งและอุณหภูมิก็จะค่อยๆ สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ

ให้กับวัสดุส่วนหนึ่งจึงมีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการอบแห้งจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่งแล้วความชื้นก็จะไม่ลดลงอีก เรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ดังรูปที่ 3.1 ที่จุด C โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดพืชจะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น มีสมการอบแห้งหลายรูปแบบทั้ง สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี

และสมการเอมไพริคัลซึ่งได้จากทดลอง ที่พยายามทำนายในช่วงความชื้นลดลง

3.3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

เมื่อมีการอบแห้งวัสดุที่เปียกชื้นภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่คงที่ เช่น กรณีที่วางวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสมปริมาณมากที่อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งนี้กับเวลา จะได้เส้นกราฟคล้ายคลึงกับรูปที่ 3.2 ซึ่งเรียกว่าเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying Characteristic Curve)



รูปที่ 3.2 การอบแห้งกับเวลา

จากรูปที่ 3.2 เราแบ่งการอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1 การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ช่วงที่ 2 การอบแห้งที่ความเร็วคงที่

ช่วงที่ 3 การอบแห้งที่ความเร็วลดลง

โดยทั่วไปความชื้นที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้นจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้านำวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้คือ ช่วงที่ 1 ในรูปที่ 3.2 ส่วนช่วงที่ 2 อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ทรายใดที่ยังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้

จากรูปอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงที่ 2 นี้ ดังนั้นความเร็วไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการระเหยจะมีค่าคงที่ ในช่วงที่ 3 ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิวของวัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุ เกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น

สรุปแล้วความเร็วของการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลง เพราะนอกจากปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับจะลดลงแล้ว ยังต้องใช้ความร้อนนี้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วยการอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุล ค่าของอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จะต่อระหว่างช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 เรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤตผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยใด ๆ และอัตราส่วนความชื้นวิกฤตเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระซึ่งได้แก่ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไปได้โดยการอบแห้ง ในกรณีของวัสดุที่มีช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ยาวนานมาก จะไม่คำนึงถึงผลช่วงที่ 1 ก็ได้ ส่วนในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้นหรือในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิด อาจไม่มีช่วงที่ 2 เลยก็ได้

เงื่อนไขของการอบแห้งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ เงื่อนไขภายในของวัสดุที่ก่อให้เกิด การอบแห้งและเงื่อนไขภายในตัววัสดุเอง เงื่อนไขภายในจะเกี่ยวข้องกับวิธีถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุและวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในได้แก่ องค์ประกอบ รูปทรง อัตราส่วนความชื้น และอัตราส่วนความชื้นสมดุลของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น

3.4 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธีและเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจจะแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer) ซึ่งเทคนิคการอบแห้งฟลูอิดไดเซชันเป็นเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง

3.5 นิยามความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

3.5.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นมาตรฐานเป็ยกนิมใช้ในวงการค้า โดยทั่วๆ ไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$ ซึ่งเราจะสามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (3.3)$$

3.5.2 ความเข้มข้นมาตรฐานแห้ง, M_d

ความเข้มข้นมาตรฐานแห้งเป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง เหตุที่เกือบจะคงที่เป็นเพราะผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งมีโอกาสลดลงได้ ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย ดังนั้นเราสามารถหาความเข้มข้นมาตรฐานแห้งได้ตามสมการ

$$M_d = \frac{w-d}{d} \quad (3.4)$$

เมื่อ

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

3.6 ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันเป็นปรากฏการณ์แบบหนึ่งทำให้อนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์และวางไหล เมื่อมีของไหลไหลล้นผ่านอนุภาคของแข็งในคอลัมน์ บริเวณที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในคอลัมน์ตั้งแต่แผ่นกระจายของไหลนิยมเรียกว่า “เบด” ถ้าอนุภาคของแข็งอยู่นิ่งจะเรียกว่า “เบดนิ่ง” (fixed bed) ถ้าอนุภาคของแข็งทั้งหมดมีพฤติกรรมคล้ายของไหลเรียกว่า “ฟลูอิดไดซ์เบด” กล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของอนุภาคของแข็งภายในเบดหรือคอลัมน์ทดลองปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้โดยการอัดของไหลให้ไหลผ่านตะแกรงในทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วง และไหลผ่านอนุภาคของแข็งที่อยู่ในเบดนั้น ของไหลนี้อาจเป็นของเหลว ก๊าซ หรือของเหลวผสมกับก๊าซก็ได้ เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่งเม็คของแข็งเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล ถ้าลักษณะเม็คของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็คของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อนเราเรียกเบดลักษณะนี้เรียกว่า “ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น” (Dense – phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็คของแข็งออกไปจากหอทดลองอยู่แล้ว เบดลักษณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “ฟลูอิด ไคซ์เบดเจือจาง” (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหล อีกเล็กน้อยเมื่อดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอตกลงไป

ฟลูอิด ไคซ์เบดที่ใช้ของไหลที่ใช้เป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดที่มีลักษณะแบบนี้ว่า “เบดสม่ำเสมอ” หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.3 (b) ฟลูอิด ไคซ์เบดที่ใช้เป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิด ไคซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวลงขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตาม ภายในเบดจะเห็นว่าเคลื่อนไหวที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มนวลวนวายเบดชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิด ไคซ์เบดควุ่นยว ดังรูปที่ 3.3 (c) ปรากฏการณ์ของฟลูอิด ไคซ์เบดที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบด ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิด ไคซ์เบดใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดในฟลูอิด ไคซ์เบดของของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนอุทกอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

Channelling เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิด ไคซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือ ไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า Bubbling

Slugging การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอตกลง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

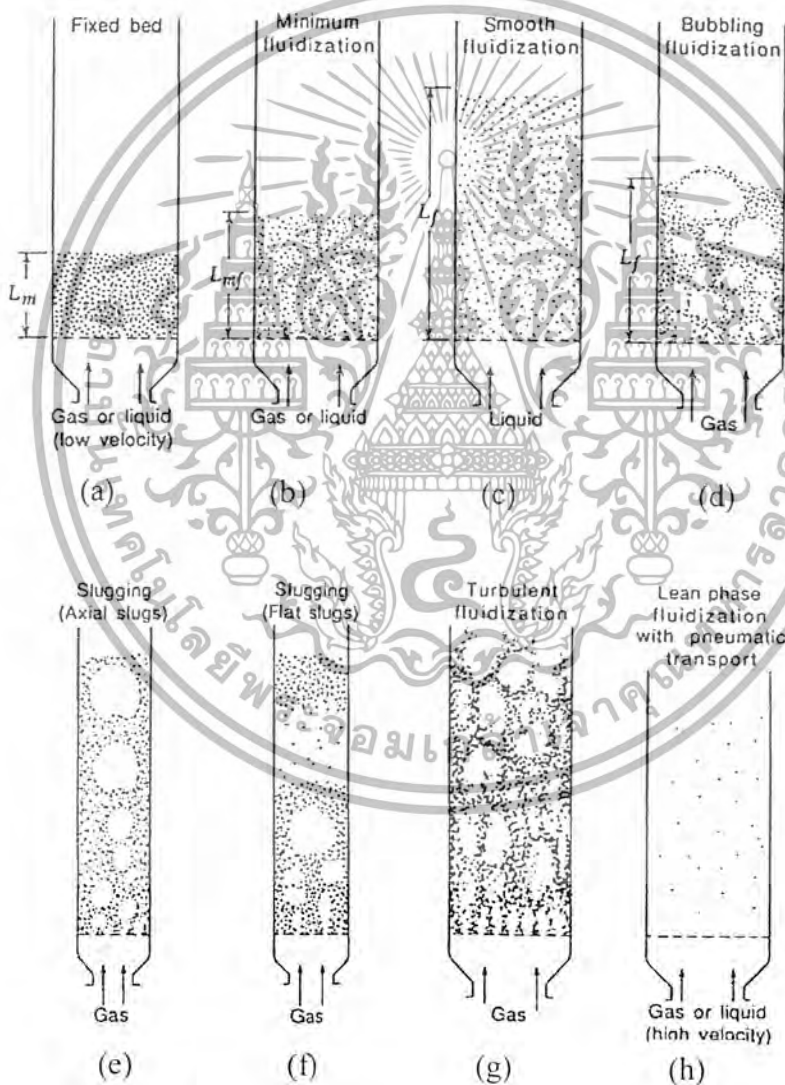
การเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิด ไคซ์เบดขึ้นนั้นต้องอาศัยองค์ประกอบต่างๆ เช่น ลอดัมน์ แผ่นกระจายของไหล และอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด เราสามารถแบ่งฟลูอิด ไคซ์เบดออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไดเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือก๊าซฟลูอิดไดเซชัน (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไดเซชันเหลว (Liquid Fluidization)

2. ฟลูอิดไดเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่าภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลวและก๊าซสำหรับฟลูอิดไดเซชันสามสถานะนั้นเป็นขบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไดเซชันสองสถานะ

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในเบดนั้นเราสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

3.7 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบบางประการ เช่น ความเร็วของของไหล ชนิดของเม็ดวัสดุที่ประกอบกันเป็นเบด และลักษณะของแผ่นกระจายของไหล เป็นต้น เมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ความดันตกในเบดเปลี่ยนแปลงด้วย เราสามารถลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของของไหลสรุปได้ดังนี้คือ

1. เมื่อป้อนของไหลด้วยความเร็วต่ำ ๆ ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งไปโดยไม่ทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ เบดลักษณะนี้จะเป็น เบดนิ่ง

3. เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้น อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน เบดลักษณะนี้เรียกว่า เบดขยายตัว (expanded bed)

3. เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งในแนวตั้งหายไป อนุภาคของแข็งที่ประกอบกันเป็นเบดจะลอยตัวเป็นอิสระ แรงกระทำเนื่องจากความดันตกในพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ของเบดจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลและอนุภาคของแข็งระหว่างหน้าตัดนั้น ๆ เบดในภาพเช่นนี้เป็นเบดที่เริ่มฟลูอิดไดซ์ เรียกเบดในลักษณะนี้ว่า “อินซิเพียนฟลูอิดไดซ์เบด” (incipiently fluidized bed) หรือเบดที่มีสภาพฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด (minimum fluidization)

4. เมื่อของไหลมีความเร็วมากขึ้น อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ห่างจากกันมากขึ้นตามความเร็วของของไหล และเริ่มเกิดฟองก๊าซเกิดขึ้น อนุภาคของแข็งเริ่มไหลหมุนเวียนดีขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการผสมผสานและการไหลเวียนของของแข็งรุนแรงยิ่งขึ้น เบดในลักษณะนี้เรียกว่า บับเบิ้ลฟลูอิดไดซ์เบด (bubbling fluidized bed) ส่วนของเบดที่ไม่รวมฟองเรียกว่า อิมัลชันเฟส (emulsion phase)

5. ฟลูอิดไดซ์เบดที่สามารถบ่งบอกระดับเบดได้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) และเมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าความเร็วขณะหลุดลอย อนุภาคของแข็งจะหลุดลอยไปกับกระแสการไหลของของไหลสถานะเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง (lean-phase fluidized bed) หรือการขนถ่ายด้วยของไหล

ดังได้กล่าวไว้แล้วว่า ความเร็วของของไหลเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ในที่นี้จะขออธิบายถึงลักษณะของเบดที่พบเห็นบ่อย ๆ ในการทำงาน โดยจะเขียนแยกเป็นชนิด ๆ ไปแสดงดังในรูปที่ 3.4

3.7.2 ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบและแบบขลุมน

WILHELM และ KWAWK ได้อธิบายไว้ว่า ฟลูอิดไดเซชันแบบเรียบมีลักษณะคือ เม็ดของแข็งแยกจากกัน โดยอิสระระยะห่างระหว่างเม็ดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ระยะห่างนี้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเร็วของของไหล เบริมีเนื้อสม่ำเสมอหรือกล่าวอีกประการหนึ่งคือ มีความหนาแน่นของเม็ดของแข็งสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้มักเกิดขึ้นในฟลูอิดไดเซชันของเหลวส่วนใหญ่ในก๊าซ ฟลูอิดไดเซชันแบบเกิดขึ้นยาก นอกจากเบตที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วต่ำสุดเล็กน้อย ส่วนเบตขลุมนเม็ดของแข็งไม่ได้เคลื่อนที่อย่างอิสระมันมีแนวโน้มที่จะรวมอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ๆ การเคลื่อนไหวของกลุ่มเป็นไปอย่างขลุมน นอกจากนี้บางส่วนของของไหลก่อตัวเป็นฟองที่ส่วนล่างของเบตแล้วฟองนี้จะชักนำให้เม็ดของแข็งลอยตามขึ้นไปจนถึงเบต ถ้าของไหลเป็นของเหลวการก่อตัวเป็นฟองมีส่วนคล้ายกับการเกิดฟองของก๊าซ เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นเบตจึงมีลักษณะเหมือนกับของเหลวกำลังเดือด เบตจึงไม่สม่ำเสมอ ภายในเบตจึงประกอบไปด้วยสถานะ 2 สถานะ คือ เบตหนาแน่นและเบตเจือจางอยู่พร้อมกัน

ถ้าพิจารณาถึงการปฏิบัติ ฟลูอิดไดเซชันแบบเบตขลุมนเกิดขึ้นได้ก็ต่อใช้เม็ดของแข็งและของไหล ที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันมาก ๆ ซึ่งก็ได้แก่ ก๊าซกับของแข็ง เป็นต้น

3.7.3 การเกิดฟองก๊าซและชั้นสลับของของไหลกับเม็ดของแข็ง

ลักษณะของเบตทั้งสองเกิดขึ้นเฉพาะในเบตขลุมนเท่านั้น ฟองที่เกิดขึ้นคล้ายกับเกิดจากก๊าซเริ่มแรกเกิดขึ้นที่ส่วนกลางเหนือแผ่นกระจาย หลังจากนั้นก็หลุดลอยผ่านชั้นเบตขึ้นไปจนถึงผิวหน้าของเบตแล้วก็แตกกระจายออก

ชั้นสลับเกิดขึ้นได้เมื่อฟองก๊าซหลาย ๆ ฟองมารวมกันแล้วเป็นฟองขนาดใหญ่จนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบต ฟองก๊าซก็แยกของแข็งออกเป็นชั้น ๆ ให้เห็นชัดเจน การเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งจะเคลื่อนที่คล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

เม็ดของแข็งเคลื่อนที่จนถึงความสูงระดับหนึ่ง ก็แยกออกตกกลับลงในเบตเหมือนกับฝนตก แล้วก่อตัวเป็นเบตขลุมนใหม่ เบตชนิดนี้เกิดขึ้นง่ายกับเบตที่มีความสูงมาก และเบตที่มีความเร็วของก๊าซมากด้วย

3.8 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

พลวัตกรรมของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไดเซชัน เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตระแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบต ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิ

ผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

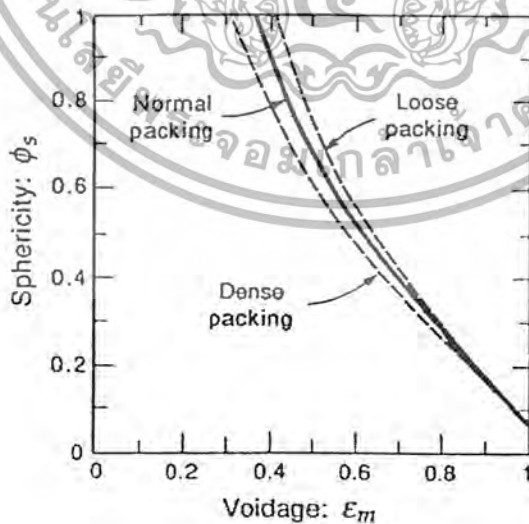
3.8.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรงกลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi_s = 1$) และถ้าถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi_s < 1$) เสมอ จากลักษณะทางกายภาพของเม็ดลึคพริกไทยที่เป็นทรงกลมในงานวิจัยนี้จึงมีค่า $\phi_s = 1$

3.8.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m)

กรณีที่มีเม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบดทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.5

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเดชัน ช่องว่างในเบดจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่า สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไอเดชันเบด (ε_{mf})



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง

(Kunii, D. Levenspiel, O. 1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลมเป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัตถุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบดแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

$$\varepsilon_{mf} = \left(\frac{0.071}{\phi_s} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

3.8.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (3.6)$$

โดยการประยุกต์สมการ (3.6) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (3.8)$$

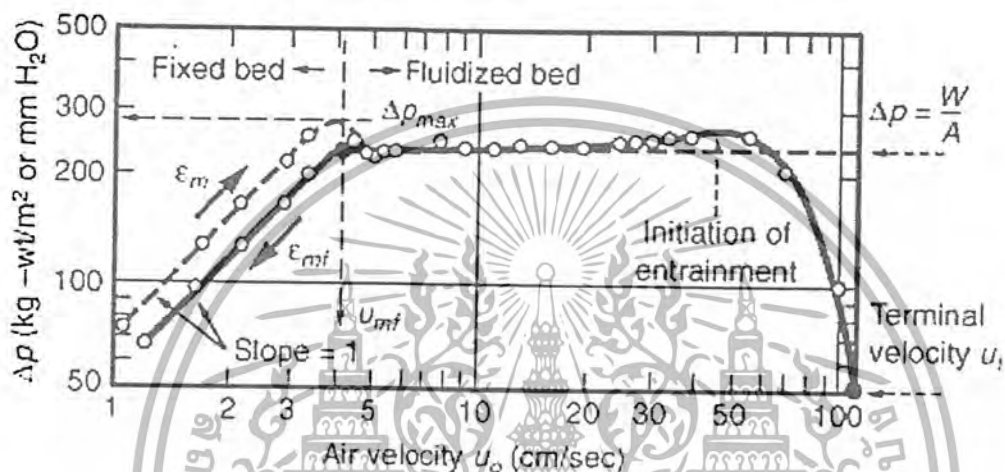
เมื่อ	Re_{mf}	คือ Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน
	d_p	คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
	g	คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม. ²
	L_{mf}	คือ ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
	Δp	คือ ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- μ คือ ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร³
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร³

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถหาได้อีกวิธีการหนึ่ง คือจากการทดลอง โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่

3.6



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ

3.8.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_f

ในฟลูอิดไอเซชันนั้นที่ขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอคอลง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดังสมการ

$$u_f^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

เมื่อ d_p^* คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ

โดยที่ $0.5 < \phi_s < 1$ และ

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \tag{3.10}$$

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

$$u_t = u_t^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \tag{3.11}$$

เมื่อ u_t^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

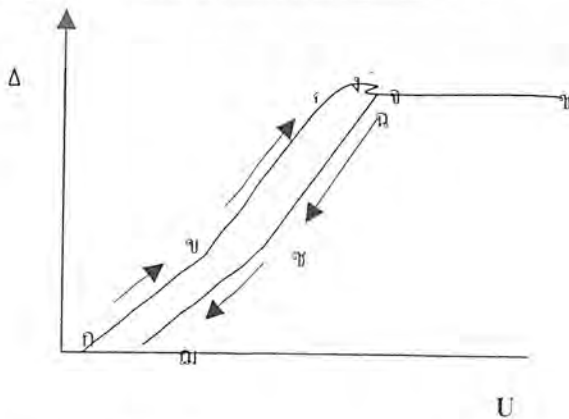
3.8.5 การหาความเร็วของก๊าซในหอทดลองฟลูอิดไดเซชัน (u_0)

การหาความเร็วของอากาศในหอทดลองฟลูอิดไดเซชัน ที่ทำให้อนุภาคภายในหอทดลองสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอทดลอง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (Soponronnarit และ คณะ, 1995)

$$u_0 = 1.3 u_{mf} \tag{3.12}$$

3.9 สถานะของฟลูอิดไลเซชัน

เม็ดของแข็งที่บรรจุลงไปในเบคกิ้งนั้นจะเป็นการบรรจุแบบไม่เป็นระเบียบ (แบบสุ่ม) เม็ดของแข็งจะก่ายกันอยู่ทำให้เกิดช่องว่างมากกว่าช่องว่างต่ำสุดที่เป็นเบคกิ้ง เมื่อผ่านของไหลเข้าไปในเบค สถานะของเบคจะเปลี่ยนตามความเร็วของของไหล ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปของความดันตกกับความเร็ว ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของผลต่างของความดันตกกับความเร็วลมในเบคกิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผ่านของไหลเข้าไปในเบดขณะที่ยังเป็นเบดหนึ่งความดันตกของเบดที่วัดได้จะดำเนินตามเส้น ก-ข ขณะที่ความเร็วต่ำ ๆ ความชันจะมีค่าเท่ากับ 1 และไปตามเส้น ข-ค เมื่อความเร็วสูงขึ้นความชันจะมีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ ERGUN ที่จุดนั้นความเร็วของไหลใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวจัดตัวเองให้เข้าระเบียบภายในเบดความดันตกขณะนั้นจะมากที่สุดคือ ช่วง ค-ง เมื่อเรียงตัวเรียบร้อยแล้วความดันตกจะลดลงมาอยู่ที่ จ ซึ่งต่ำกว่าความดันตกที่จะเกิด ฟลูอิดไอเซชัน จากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนถึงจุด ฉ แล้วจะคงที่ไปจนถึงจุด ช

เมื่อลดความเร็วของไหลจนถึงจุด ฉ ความดันยังคงที่อยู่ แต่จากจุด ฉ ความดันตกของเบดจะ ลดลงตามเส้น ฉ-ซ และ ซ-ฅ ตามลำดับ ถ้าเราทำการทดลองใหม่จากเบดเดิมนี้ ความดันตกจะเป็นไปตามเส้น ฉ-ซ และ ซ-ฅ เหมือนเดิม เพราะเบดขณะที่เปลี่ยนจากฟลูอิดไอเซชันเบดเข้าสู่เบดหนึ่งเม็ดของแข็งเริ่มจัดระเบียบตัวเองแล้ว เมื่อทำการทดลองใหม่จึงไม่ต้องเสียพลังงานในการจัดระเบียบอีกจึงเดินตามเส้น ฉ-ฅ ที่จุด ฉ นี้เราเรียกว่า จุดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน

การที่ความดันตกของเบดเริ่มแรกสูงกว่าความดันตกในขณะที่เบดเป็นระเบียบ เพราะช่องว่างภายในเบดจัดไม่เป็นระเบียบการไหลจึงเกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่าปกติ จากการทดลองพบว่าความดันตกในครั้งแรกมากกว่าความดันตกในเบดที่เป็นระเบียบประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์

3.10 ประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้ง

ประสิทธิภาพทางความร้อนในการอบแห้งนั้นเราหาได้จากพลังงานที่ถ่ายเทสู่วัสดุเปียกต่อพลังงานที่เราใช้ในกระบวนการอบแห้งซึ่งพลังงานที่ใช้ในการอบจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนเราสามารถทำการหาได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{W_d [h_{fg} (M_{p1} - M_{p2}) + c_m (T_{m2} - T_{m1})]}{m_{da} (h_1 - h_0) \Delta T} \quad (3.13)$$

เมื่อ	η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพทางความร้อน
	W_d	คือ	น้ำหนักแห้งของวัสดุ (kg)
	M_{p1}	คือ	สัดส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งทางเข้า (kg water/kg solid)
	M_{p2}	คือ	สัดส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งทางออก (kg water/kg solid)
	C_m	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg)
	T_{m2}	คือ	อุณหภูมิของวัสดุทางออก (K)
	T_{m1}	คือ	อุณหภูมิของวัสดุทางเข้า (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h_{fg}	คือ	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg water)
h_1	คือ	เอนทาลปีจำเพาะที่ทางเข้า (kJ/kg)
h_0	คือ	เอนทาลปีจำเพาะที่สภาวะบรรยากาศ (kJ/kg)
\dot{m}_{da}	คือ	อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s)
ΔT	คือ	ผลต่างอุณหภูมิทางเข้าออกของระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

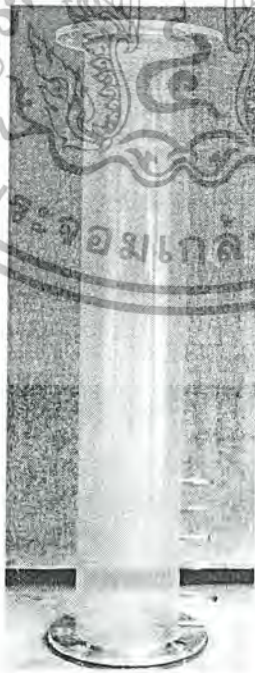
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวกลิ้งนั้น มีอุปกรณ์การทดลองดังต่อไปนี้

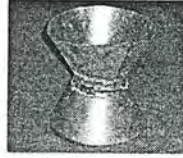
4.1.1 หอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด

ลักษณะของหอบแห้งเป็นท่อนอะคลีลิกใสทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 170 มิลลิเมตร มีความสูง 1000 มิลลิเมตร การทดลองแบ่งหอบแห้งเป็น 3 แบบด้วยกันคือ หอบเปล่า หอบผิวกลิ้งแบบดี และหอบผิวกลิ้งแบบห่าง ซึ่งในหอบที่มีผิวกลิ้งนั้นจะมีลูกกลิ้งที่ทำจากสังกะสี นำมาขัดเป็นรูปกรวย และเชื่อมต่อกันด้วยตะกั่วบัดกรีให้เข้ารูป ขนาดลูกกลิ้งเป็น 1 ใน 3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง ขนาดของฐานและความสูงลูกกลิ้งมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหอบแห้ง ลักษณะการจัดวางลูกกลิ้งแบบดี และลูกกลิ้งแบบห่างนั้น เราได้ทำการจัดวางลูกกลิ้งแบบดี โดยวางให้ลูกกลิ้งชิดติดกัน ไม่ให้มีช่องว่าง และการจัดวางลูกกลิ้งแบบห่างเราจัดวางให้ลูกกลิ้งแต่ละลูกวางห่างกันเป็นระยะ 1 ใน 3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของหอบ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพของหอบแห้งเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงภาพของลูกคลื่น



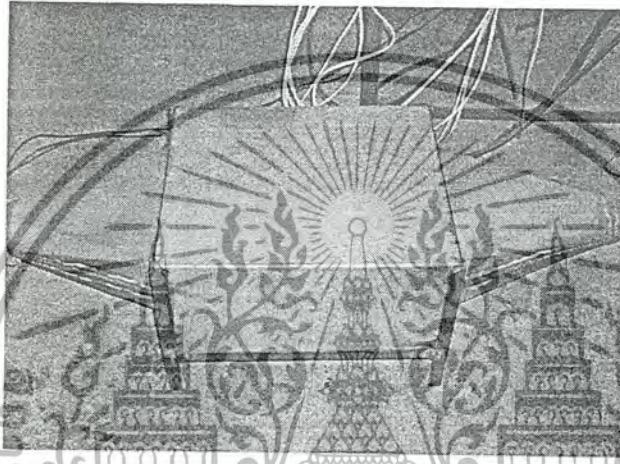
รูปที่ 4.3 แสดงภาพของหอบแห้งผิวคลื่นแบบดี

รูปที่ 4.4 แสดงภาพของหอบแห้งผิวคลื่นแบบห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ชุดลดความร้อนและชุดควบคุมอุณหภูมิ

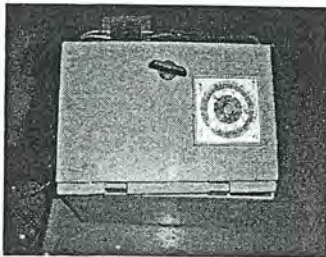
ชุดลดความร้อนออกแบบให้สามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูง ๆ ได้ มีรูปทรงเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในมีช่องลมหน้าคัตสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดตั้งชุดลดความร้อน ไว้ข้างทางลมที่ผ่านเข้ามา มีฉนวนใยแก้วทนความร้อนหุ้มอยู่ 2 ชั้น และหุ้มด้วยกล่องเหล็กที่อยู่นอกสุด ด้านทางเข้าและทางออกได้ติดตั้งกรวยฐานสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้อากาศสามารถสัมผัสกับชุดลดความร้อนได้ทั่วถึงกัน โดยมีเบรกเกอร์ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลและชุดควบคุมอุณหภูมิของชุดลดความร้อน



รูปที่ 4.5 แสดงภาพของชุดลดความร้อน

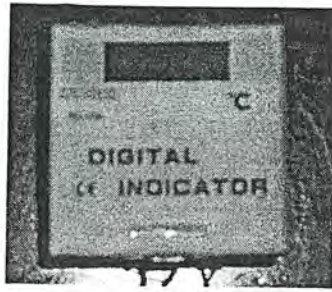


รูปที่ 4.6 แสดงภาพของชุดเบรกเกอร์ควบคุมชุดลดความร้อน



รูปที่ 4.7 แสดงภาพชุดควบคุมอุณหภูมิของชุดลดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



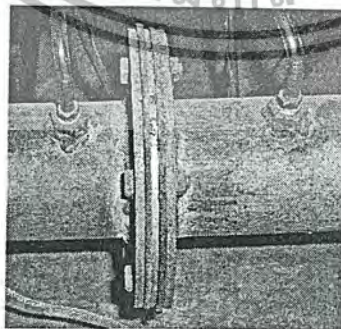
รูปที่ 4.8 แสดงภาพเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล

4.1.3 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศแบบฟลูอิดไดซ์เบด จะใช้ออร์ฟิสและค่าความดันตกคร่อมที่ผ่านออร์ฟิสสามารถอ่านค่าโดยใช้มาโนมิเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหล การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้มาตรฐาน (ANSI/API 2530) และมาโนมิเตอร์แบบตัววู ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวภายใน

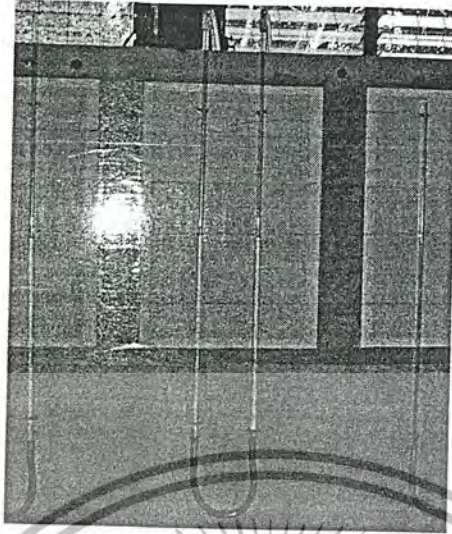


รูปที่ 4.9 แผ่นออร์ฟิส



รูปที่ 4.10 แสดงภาพออร์ฟิสมิเตอร์

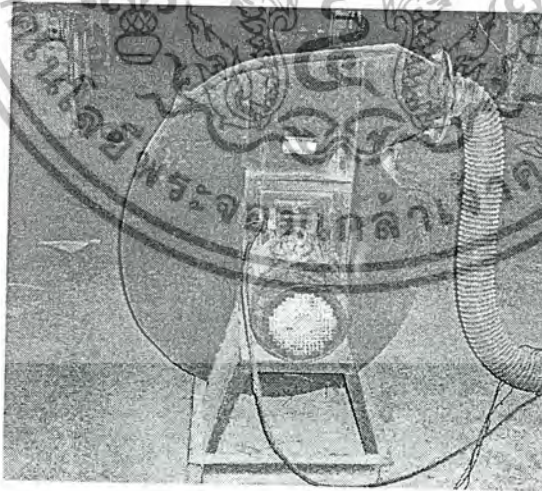
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงภาพมอมิเตอร์แบบคั่วยู

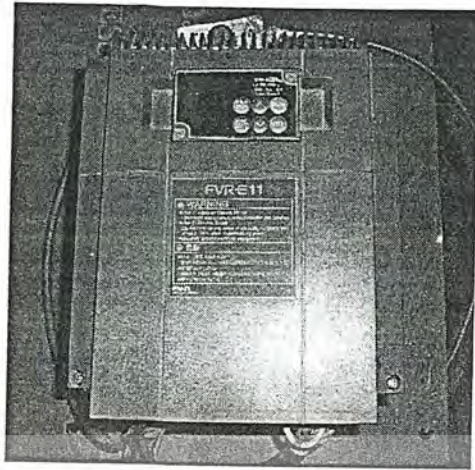
4.1.4 ชุดป้อนอากาศ

ชุดป้อนอากาศนั้นได้ใช้พัดลมอัดอากาศ ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า ใบพัดอัดอากาศ เป็นแบบคอนกรีตฟูกอส และอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงมอเตอร์และพัดลมอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์

4.1.5 ชุดท่อทางเดินของอากาศ

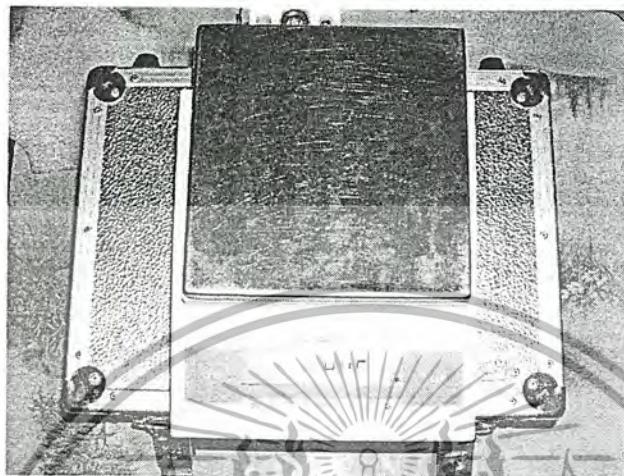
ชุดท่อทางเดินของอากาศใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) ติดตั้ง
โกล์บวาล์ว และชุดออริฟิส์วาล์วอัตราการไหลไว้



รูปที่ 4.14 ภาพแสดง โกล์บวาล์ว และชุดออริฟิส์

4.1.6 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพด

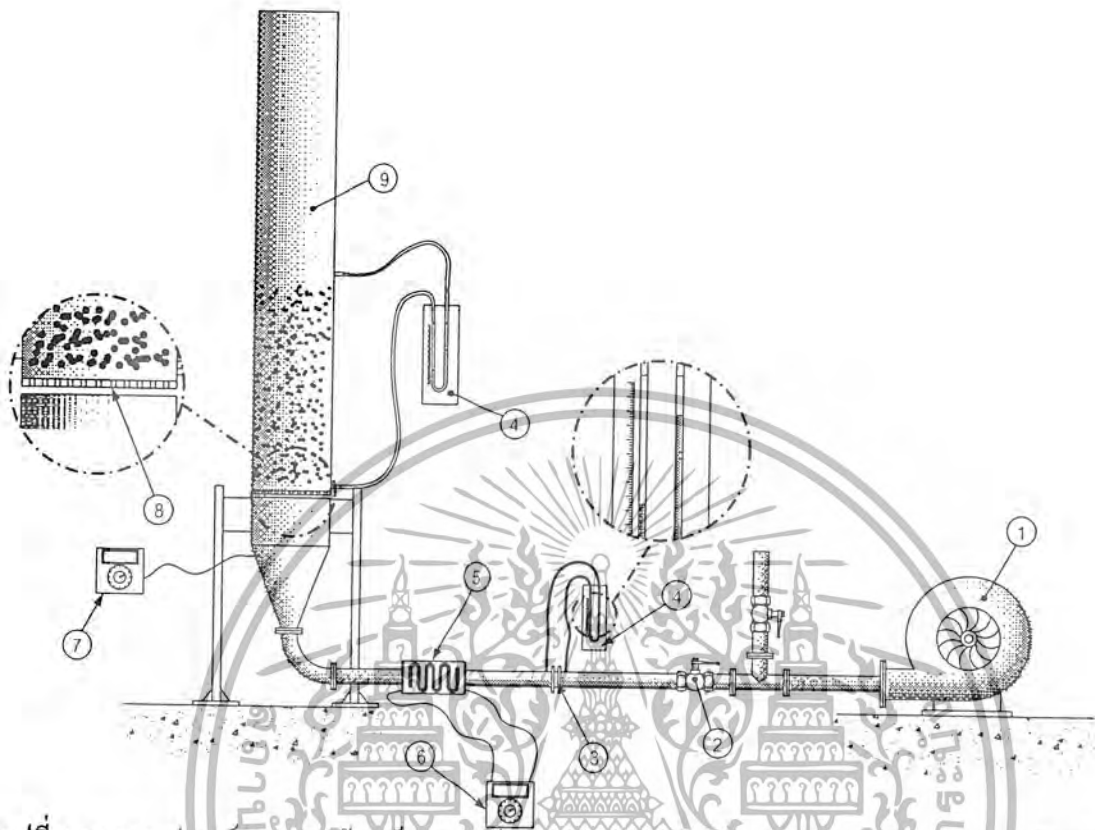
อุปกรณ์วัดน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยเป็นตาชั่ง แสดงผลเป็นแบบตัวเลขดิจิทัลซึ่งค่าอยู่ในช่วง 0 – 3000 กรัม



รูปที่ 4.14 ภาพแสดงตาชั่งดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 4.16 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเม็ดคากาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยประกอบด้วย (1) พัดลมอัดอากาศขนาด 10 แรงม้า, (2) โกลบวาล์ว, (3) ออร์ฟิสมิเตอร์, (4) มานอมิเตอร์แบบท่อตัว, (5) ชุดลดความร้อน, (6) ชุดควบคุมอุณหภูมิชุดลดความร้อน, (7) ชุดวัดอุณหภูมิ, (8) แผ่นกระจายอากาศ และ (9) หอททดลองรูปทรงกระบอก

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งเพื่อใช้ในการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดคอฟริกไทยนั้นการป้อนลมร้อนจะถูกป้อนเข้าทางส่วนล่างของห้องอบแห้ง เพื่อใช้ศึกษาคุณลักษณะของเมล็ดคอฟริกไทยเมื่อถูกอบแห้ง

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดลอง เริ่มต้นจากการประกอบเครื่องอบแห้งเข้าด้วยกัน เมื่อติดตั้งเรียบร้อยแล้วทำการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ ชุดควบคุมอุณหภูมิชุดลดความร้อนแหล่งกำเนิดคือ พัดลมอัดอากาศ ในส่วนของอากาศในท่อจะมี โกลบวาล์ว ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและวัดอัตราการไหลผ่านชุดออร์ฟิสมิเตอร์ และ มานอมิเตอร์แบบท่อตัว ซึ่งอากาศจะไหลเข้าไปผสมกับความร้อนที่ได้จากชุดลดความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศก่อนการอบแห้ง ก่อนที่จะทำการทดลองจำเป็นต้องปรับอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองให้ได้เสียก่อน ก่อนที่จะป้อนเมล็ดคอฟริกไทยเข้าในห้องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.4.1 การทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) ของการเกิดฟลูอิดไลซ์เบด

- 1) เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลมอัดอากาศให้อากาศไหลผ่านเข้าไปยังระบบของเครื่องอบแห้ง
- 2) นำข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นใส่เข้าไปในหอตกลงให้เบด(เมล็ดพริกไทย) มีน้ำหนัก 1000 กรัม
- 3) ทำการเพิ่มความเร็วไปเรื่อยๆ พร้อมกับบันทึกค่าที่ได้จากการทดลองจนถึงค่าหนึ่ง ที่เห็นว่าค่าที่บันทึกเริ่มคงที่แล้ว
- 4) นำค่าที่ได้จากการคำนวณมาสร้างกราฟเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุด (U_{mf}) ของการเกิดฟลูอิดไลซ์เบด

4.4.2 การทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าวโพด

- 1) นำเมล็ดพริกไทยที่ใช้ในการทดลอง มาชั่งน้ำหนักก่อนนำเมล็ดพริกไทยเข้าสู่อบและบันทึกค่า
- 2) นำเมล็ดข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองไปเข้าสู่อบไฟฟ้าทำการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ISTA
- 3) นำเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการอบไปชั่งน้ำหนัก
- 4) นำค่าที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น (ภาคผนวก ก)

4.4.3 การทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพริกไทยหลังการอบ

- 1) เปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลมอัดอากาศ ให้อากาศไหลผ่านเข้าไปยังระบบของเครื่องอบแห้ง
- 2) นำพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นที่มีน้ำหนัก 1000 กรัมใส่เข้าเครื่องอบแห้งที่มีอุณหภูมิปกติ
- 3) วัดความเร็วของอากาศในท่อแบบฟลูอิดไลซ์เบด ด้วย Hot-wire anemometer ให้ได้ความเร็วของอากาศในหอตกลงเท่ากับ $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$
- 4) นำข้าวโพดนี้ออกจากหอตกลง และเปิดเครื่องให้ความร้อนและปรับตัวควบคุมอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส
- 5) ป้อนข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นเข้าเครื่องอบแห้งให้ได้น้ำหนักของเมล็ดพริกไทย 1000 กรัม
- 6) นำข้าวโพดออกมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป บันทึกน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 100 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) เปลี่ยนความเร็วลมเป็น 0.087 และ 0.102 m^3/s ตามลำดับ เปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็น 85 และ 100 องศาเซลเซียส และดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-7 ตามลำดับ

8) เปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศร้อนเป็น 85 และ 100 องศาเซลเซียส และดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-8 ตามลำดับ

9) เปลี่ยนหอบแห้งเป็นแบบผิวคลื่นถี่ ผิวคลื่นห่าง และหอบเปล่าตามลำดับและดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-9 ตามลำดับ

10) นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบและสรุปผล

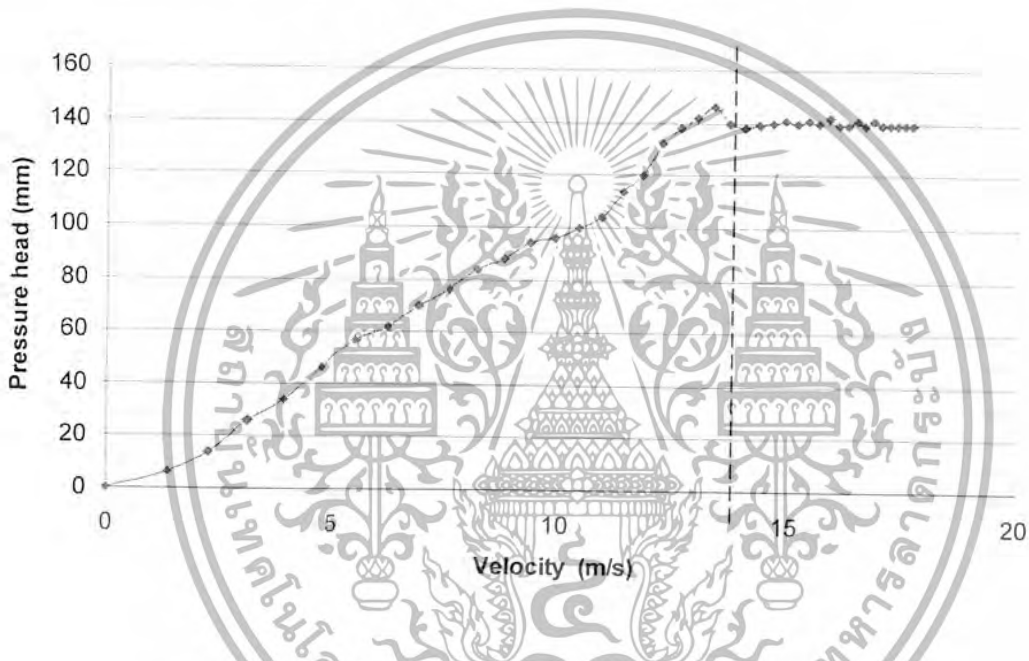


บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (U_{mf})

จากผลการทดลองหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด (U_{mf}) ซึ่งผลการทดลองได้แสดงเป็นตารางไว้ที่ภาคผนวก ข แล้ว จากข้อมูลในภาคผนวกดังกล่าวสามารถนำมาสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของความดันกับความเร็วดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็ว

จากกราฟ จะเห็นว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นค่าความดันตกคร่อมภายในหอตกลงจะค่อยๆ สูงขึ้น จนเมื่อถึงค่าความเร็วค่าหนึ่งที่มีลักษณะฟลูอิดไดซ์เซชันทั่วทั้งเบดแล้วค่าความดันตกคร่อมก็จะเริ่มคงที่ไปเรื่อยๆ ดังกราฟที่ได้แสดงไว้ จะได้ U_{mf} ในรูปความเร็วเท่ากับ 14 m/s หรือเท่ากับ $1U_{mf}$ ดังนั้น $1.2U_{mf}$ เท่ากับ 16.8 m/s และ $1.4U_{mf}$ เท่ากับ 19.6 m/s

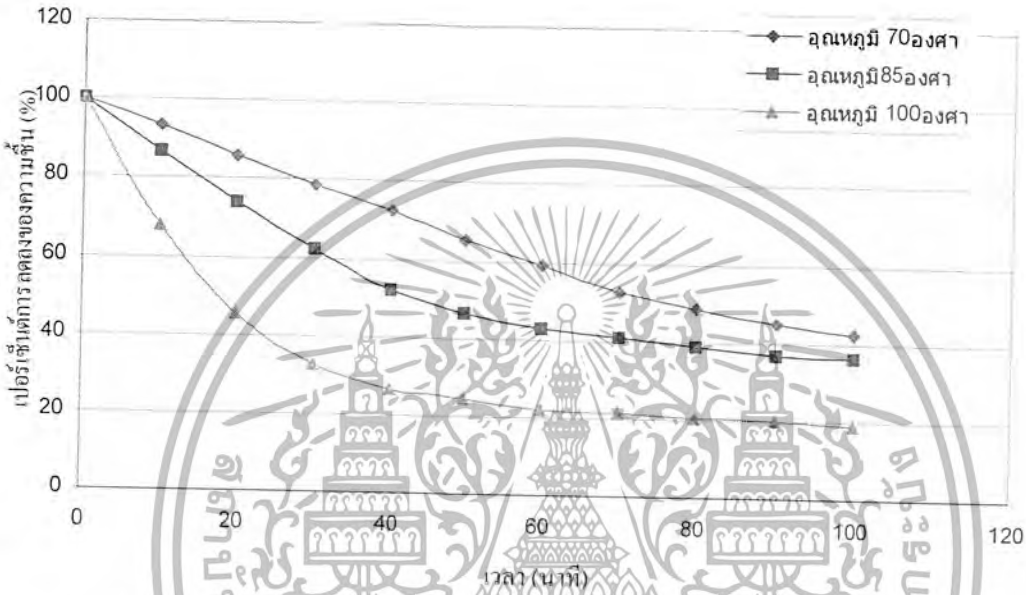
5.2 ผลการทดลองหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพริกไทย

การทดลองนั้นได้ทดลอง 3 ครั้งด้วยกันซึ่งแสดงเป็นตารางไว้ดังนี้

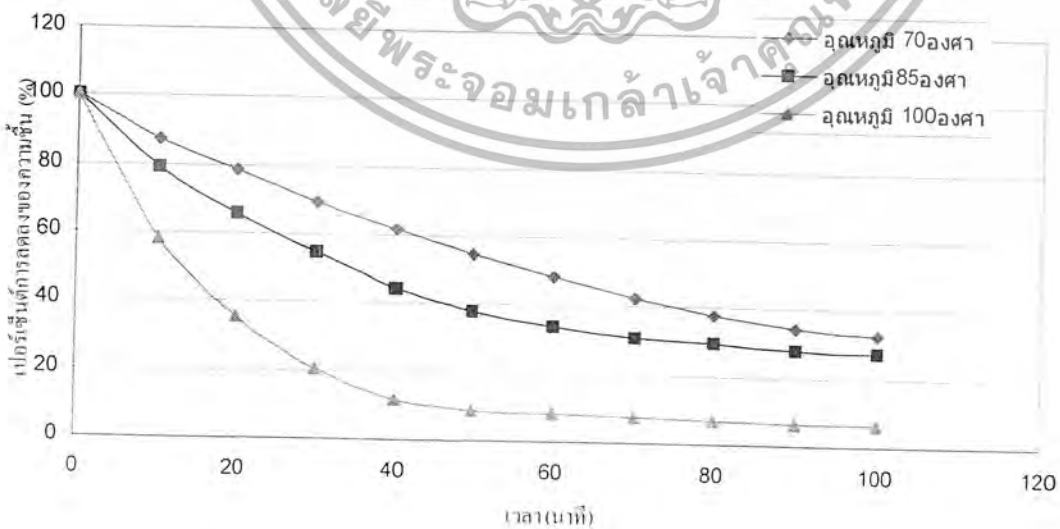
เมล็ดก่อนการอบ (กรัม)	เมล็ดหลังการอบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้
10	2.02	79.8
10	2.12	78.8
10	2.05	79.5

5.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพริกไทย

จากผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงของเมล็ดพริกไทยของแต่ละความเร็ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งจะได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนี้ ทั้งนี้ตัวอย่างการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (เทียบกับน้ำหนักแห้ง) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

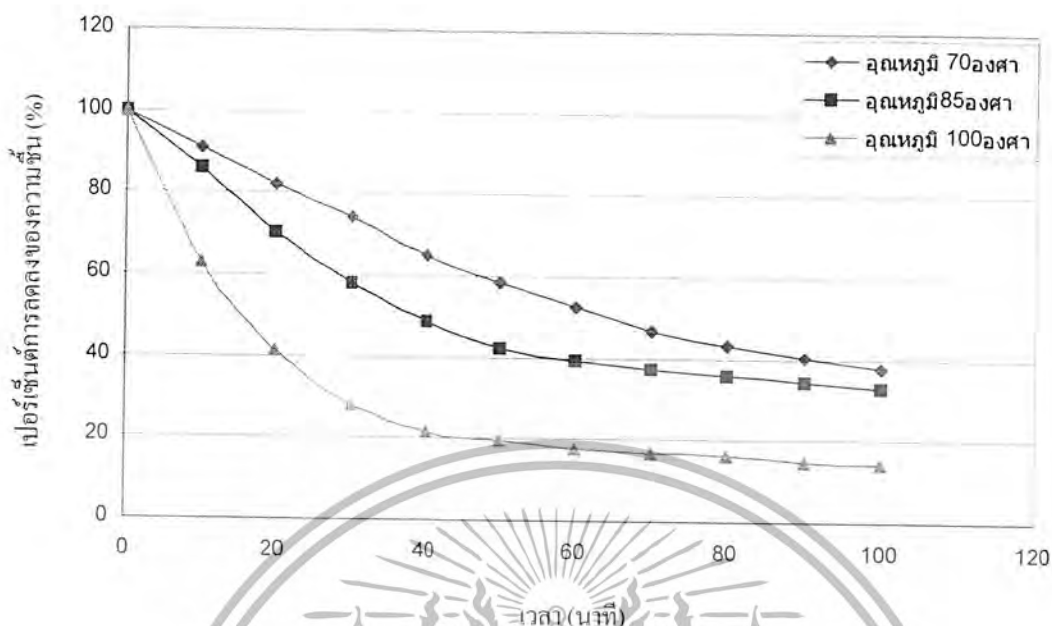


รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว $1.0 U_{mf}$ ของหอบแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 170 mm



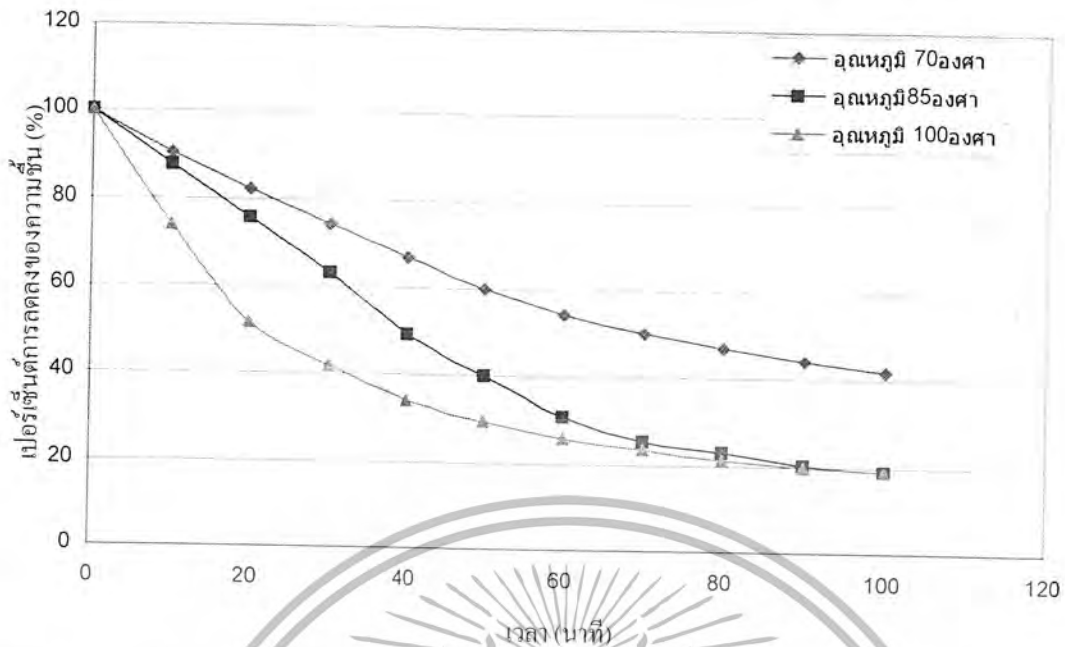
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว $1.2 U_{mf}$ ของหอบแบบผิวคลื่นระยะพิตซ์ 170 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

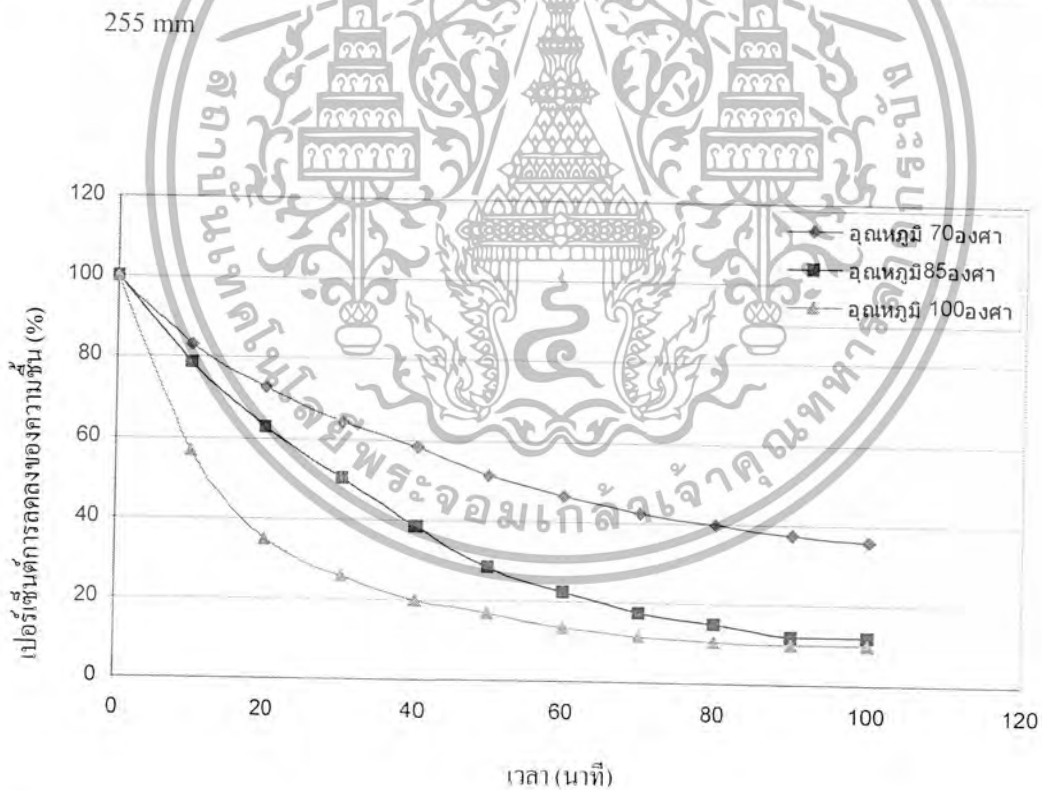


รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว 1.4U_m ของหอแบบผิวกลสีนระยะพิตซ์ 170 mm

กราฟรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 85 และ 70 องศาเซลเซียสและที่ความเร็ว 1.2U_m นั้น (ดูรูปที่ 5.2) เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงมากที่สุดคือที่ 10.56 เปอร์เซ็นต์



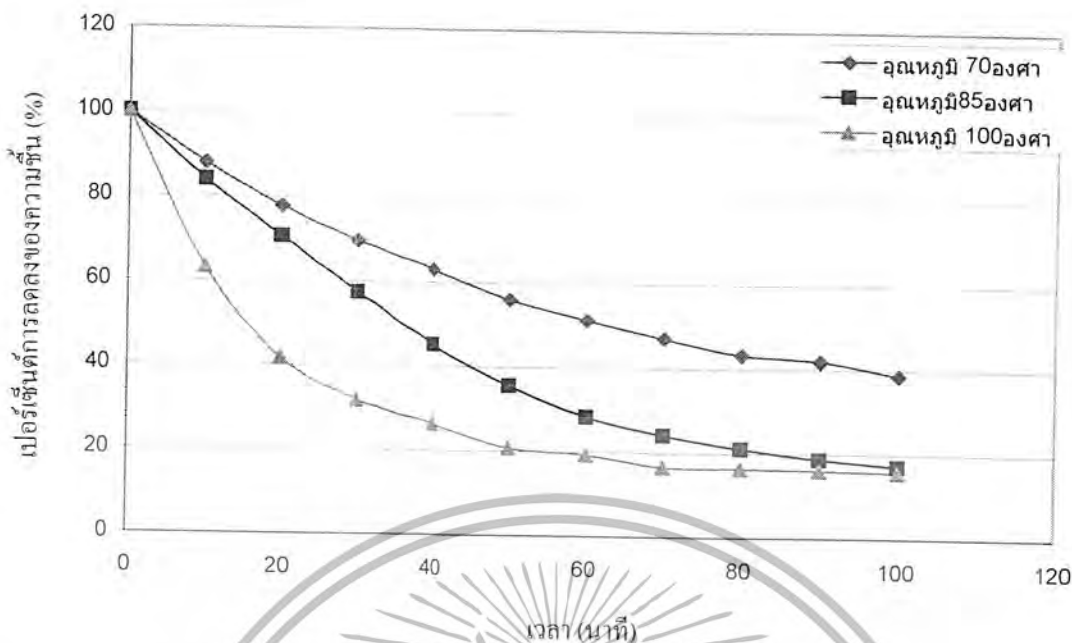
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว $1.0 U_{m1}$ หอแบบผิวคลื่นระยะพิคซ์



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว $1.2 U_{m1}$ หอแบบผิวคลื่นระยะพิคซ์

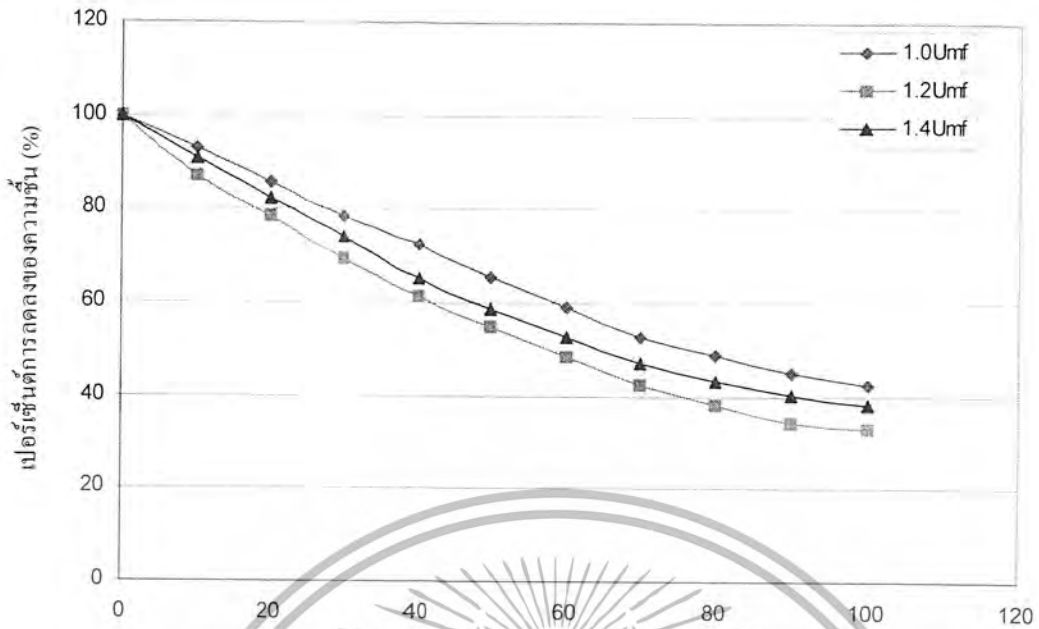
255 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

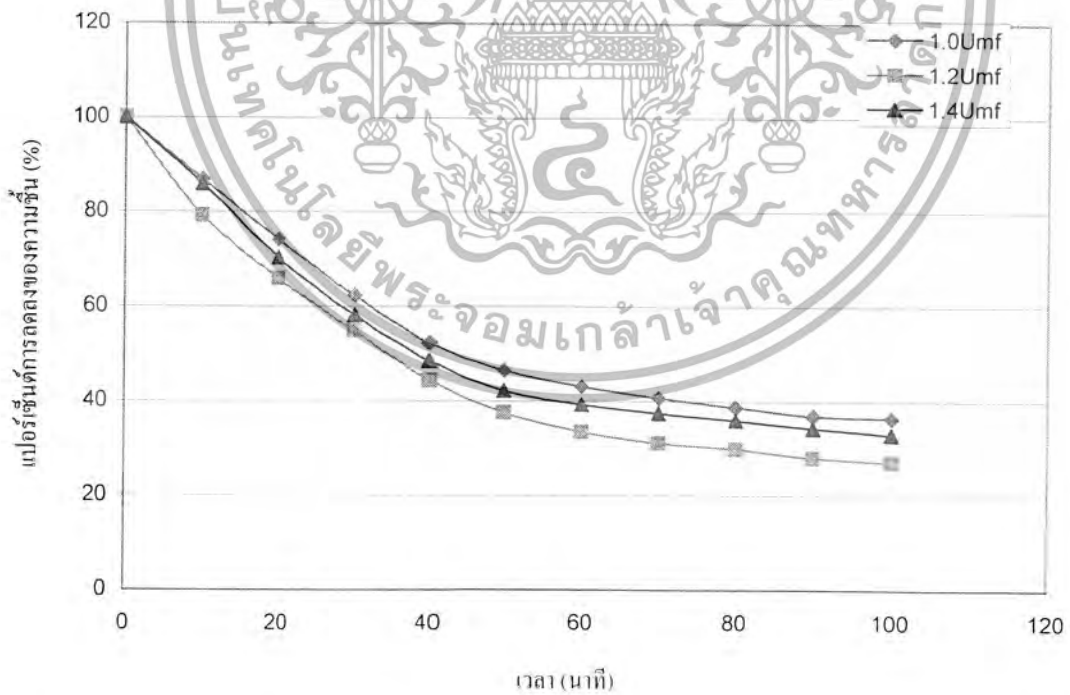


รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่ความเร็ว $1.4U_{mf}$ ห่อแบบผิวคลื่นระยะพิคซ์ 255 mm

กราฟรูปที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 85 และ 70 องศาเซลเซียสและที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ นั้น (ดูรูปที่ 5.6) เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงมากที่สุดคือที่ 12.46 เปอร์เซ็นต์

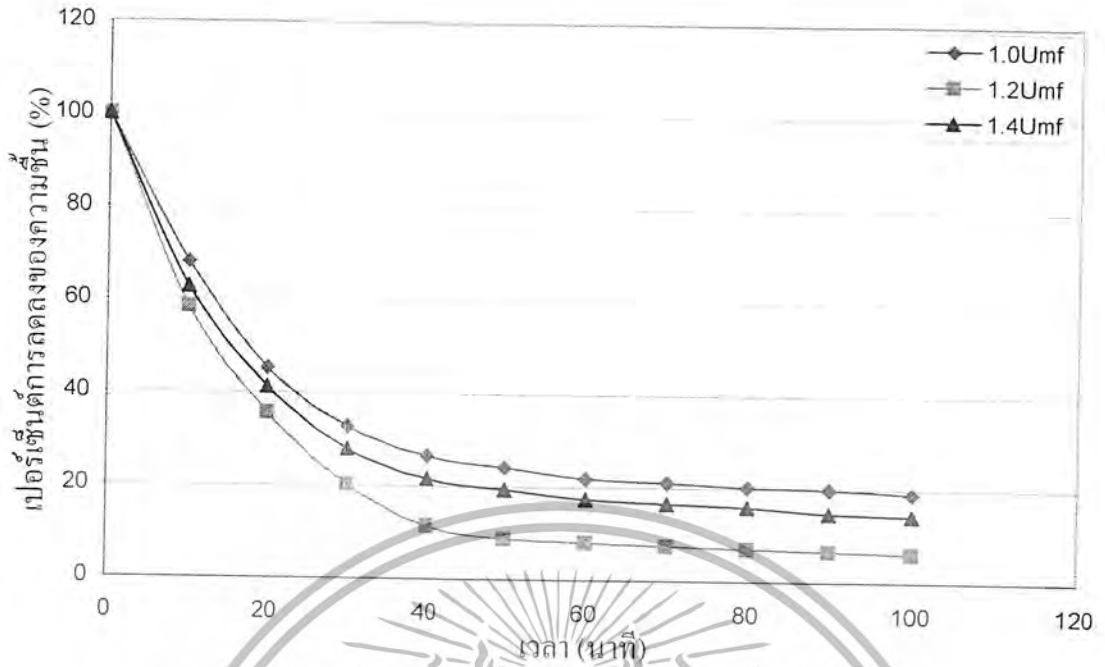


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่น ระยะพิตช์ 170 mm



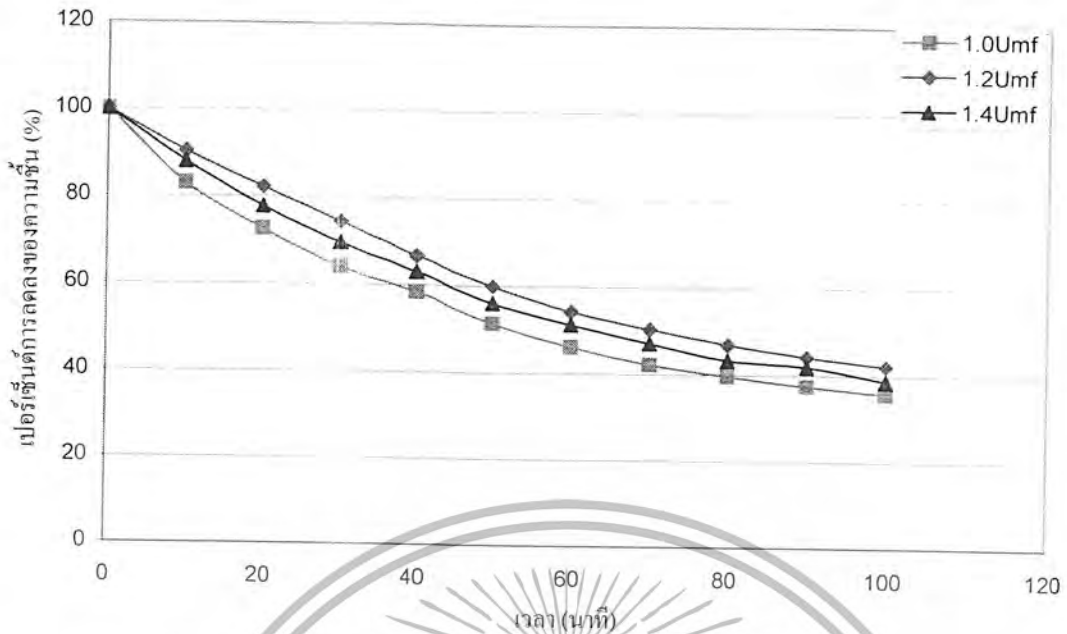
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส หอแบบผิวคลื่น ระยะพิตช์ 170 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

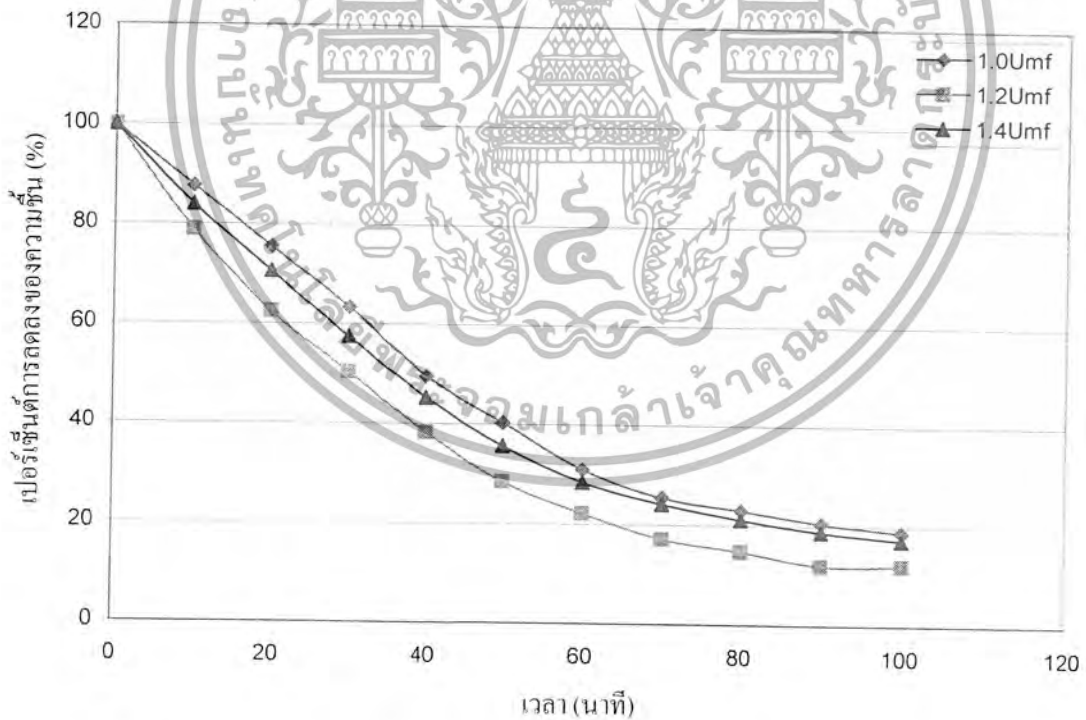


รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของแบบผิวคลื่อน ระยะพิตช์ 170 mm

กราฟรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 1.2 U_{mf} นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 1 U_{mf} และ 1.4 U_{mf} และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนั้น (ดูรูปที่ 5.10) เส้นกราฟที่ความเร็ว 1.2 U_{mf} จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงมากที่สุดคือที่ 14.80 เปอร์เซ็นต์

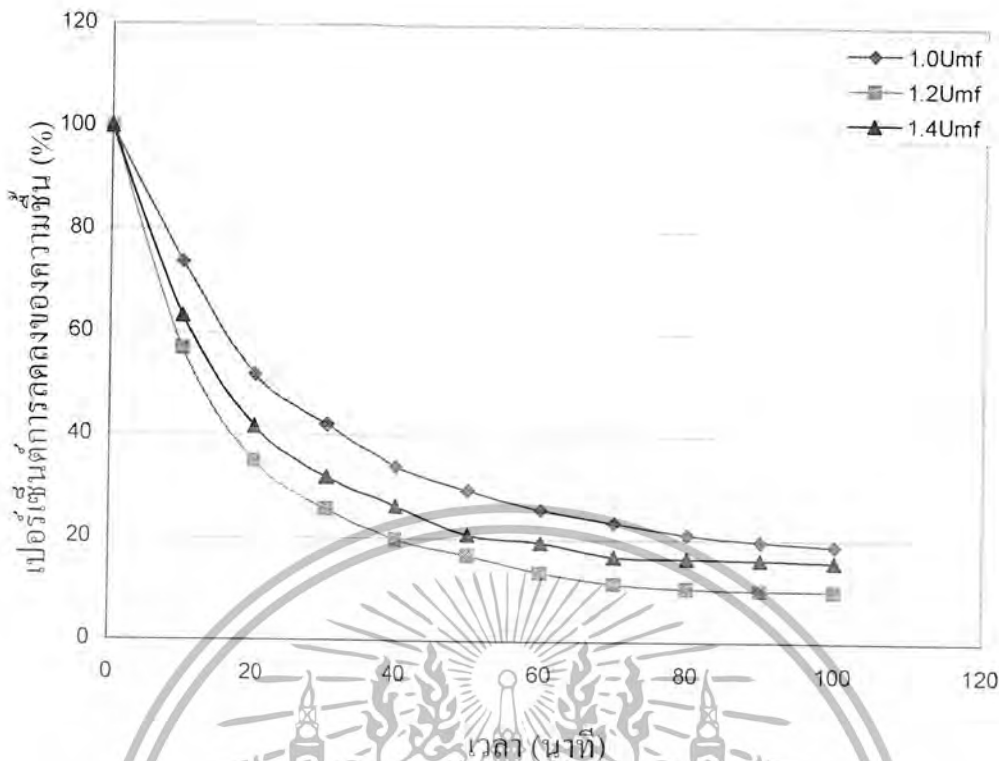


รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสหอบแบบผิวคลื่น ระยะพิตช์ 255 mm



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสหอบแบบผิวคลื่น ระยะพิตช์ 255 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

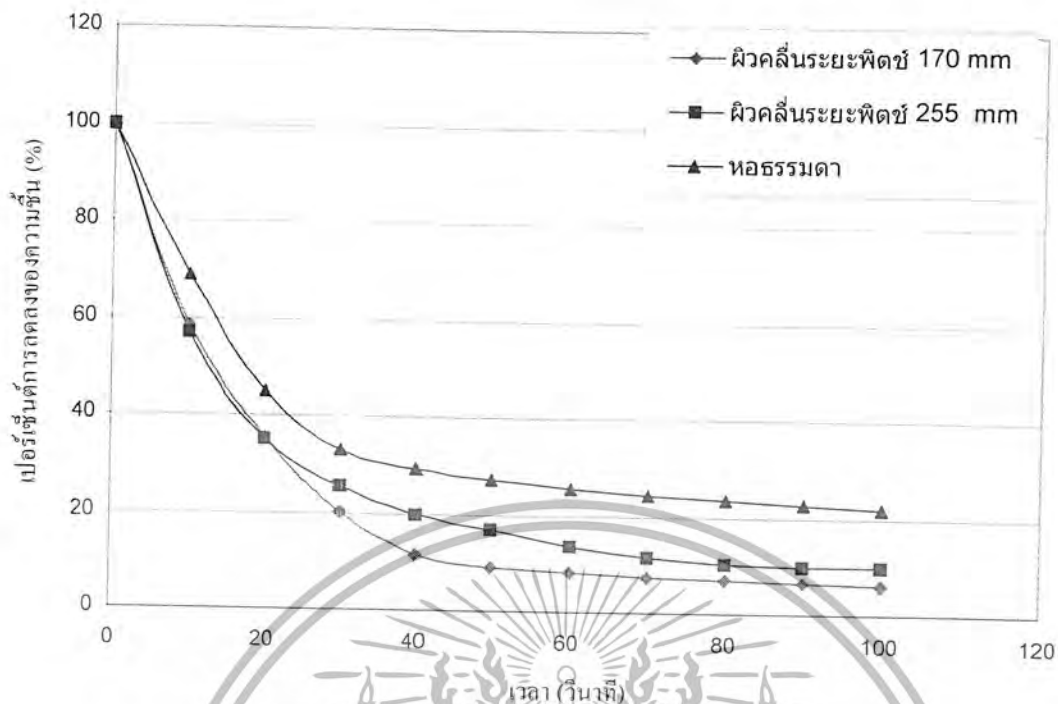


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของแบบผิวคลื่น ระยะพิตช์ 255 mm

กราฟรูปที่ 5.11, 5.12 และ 5.13 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเร็วซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 1.2 U_{mf} นั้นมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 1.0 U_{mf} และ 1.4 U_{mf} และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสบน (ดูรูปที่ 5.13) เส้นกราฟที่ความเร็ว 1.2 U_{mf} จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงมากที่สุดคือที่ 10.09 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟรูปที่ 5.2 ถึง 5.13 สรุปได้ว่า หอทดลองแต่ละแบบจะสามารถลดความชื้นได้มากที่สุดเมื่อใช้ความเร็ว 1.2 U_{mf} และ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

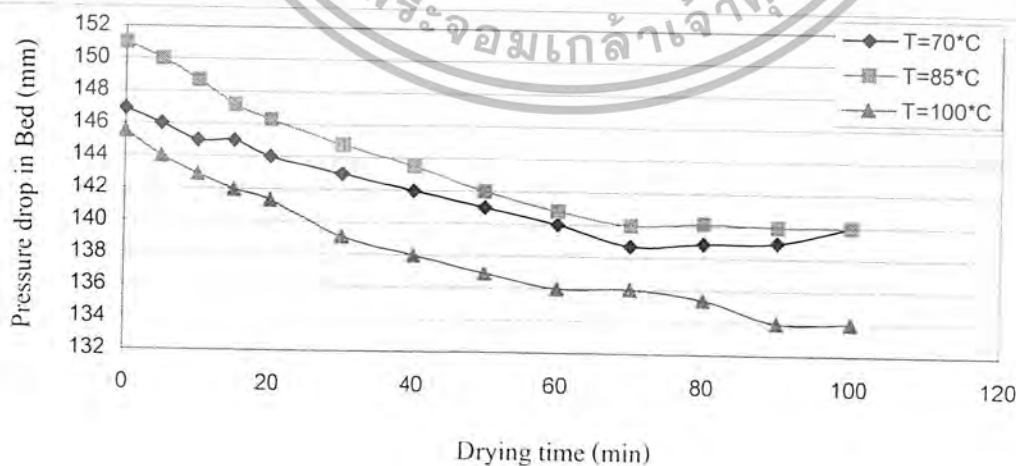
จากกราฟรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบที่ความเร็ว 1.2 U_{mf} และ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของหอทดลองแบบต่าง ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่หอทดลองแบบผิวคลื่นระยะพิตช์ 170 mm สามารถลดความชื้นลงได้มากกว่าหอทดลองแบบอื่น เมื่อใช้เวลาในการอบเท่ากัน



รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอตลอดแบบต่างๆ

5.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมภายในหอตลอด

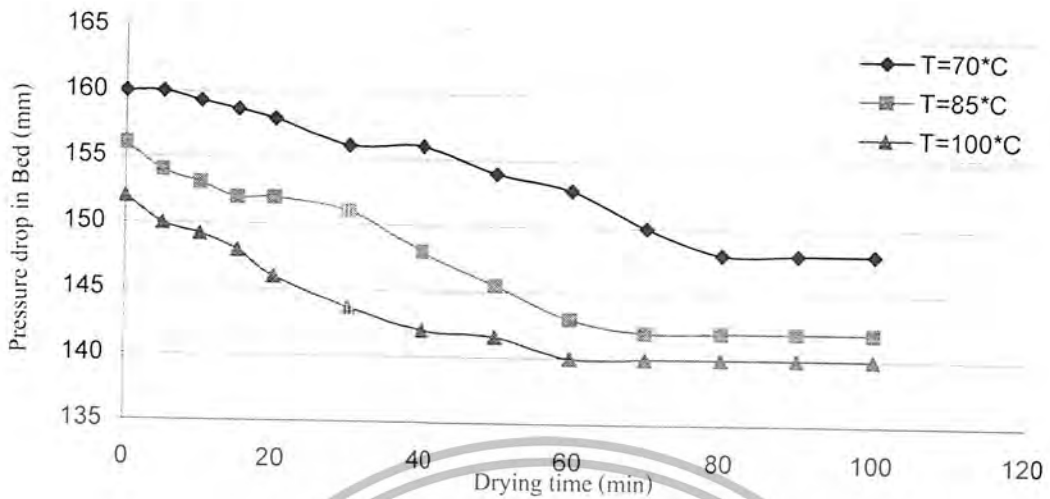
จากผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่หอตลอดของหอแต่ละชนิด แต่ละความเร็ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งจะได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนี้



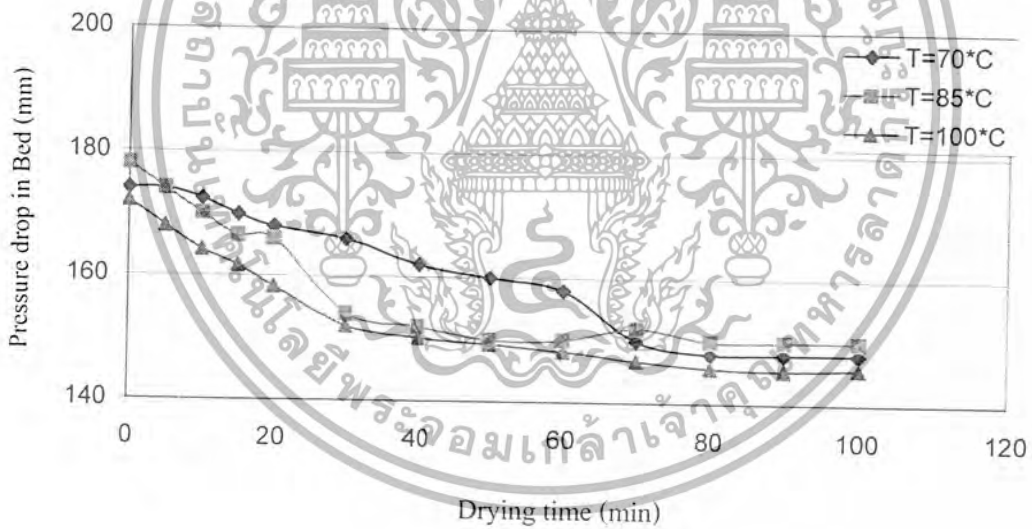
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอดที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ ของหอ

ทดลองแบบผิวคลี่ระยะพิชช 170 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



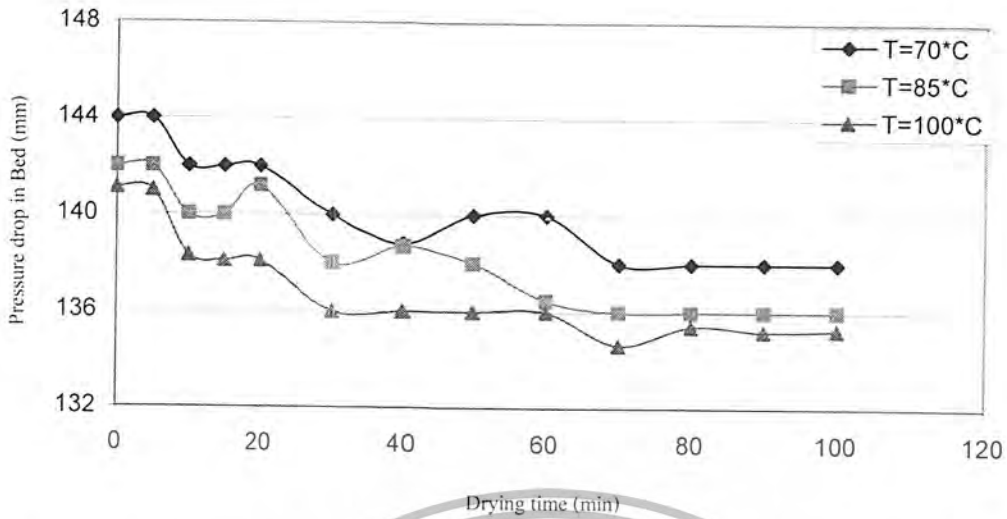
รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.2 U_{mf}$ ของหอทดลองแบบฝิวคัสตันระยะพิตช์ 170 mm



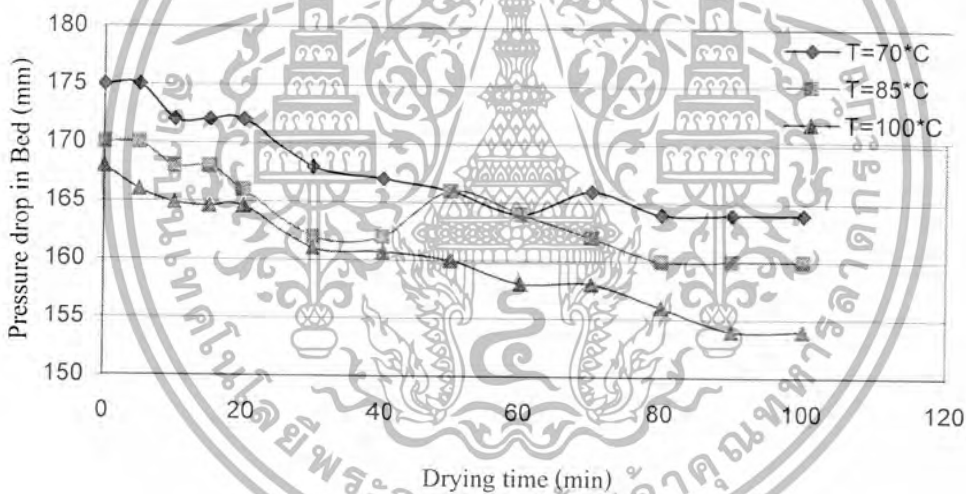
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.4 U_{mf}$ ของหอทดลองแบบฝิวคัสตันระยะพิตช์ 170 mm

กราฟรูปที่ 5.15 , 5.16 และ 5.17 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ความดันตกคร่อมภายในหอทดลองที่อุณหภูมิต่าง และที่ความเร็ว $1.0 U_{mf}$ นั้น (ดูรูปที่ 5.15) เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีความดันตกคร่อมต่ำที่สุด

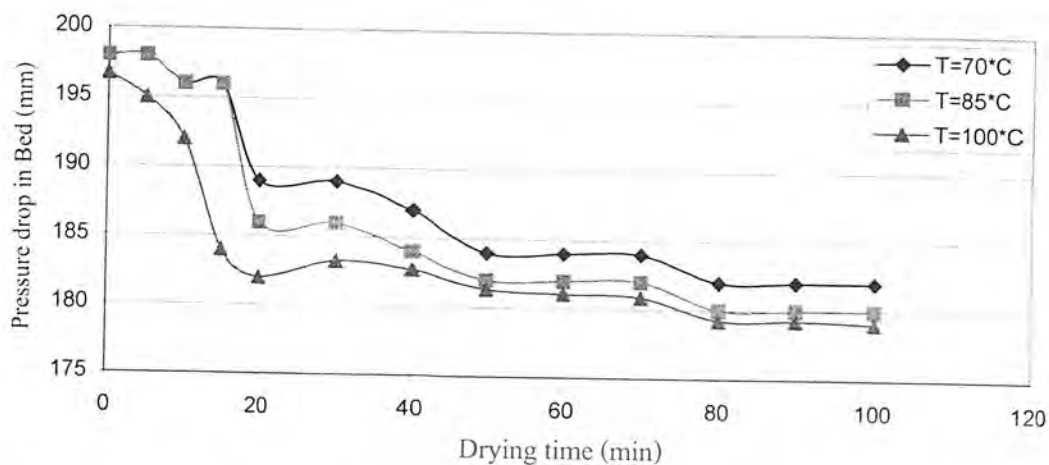
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ หอทดลองแบบคลื่นระยะพิทซ์ 255 mm

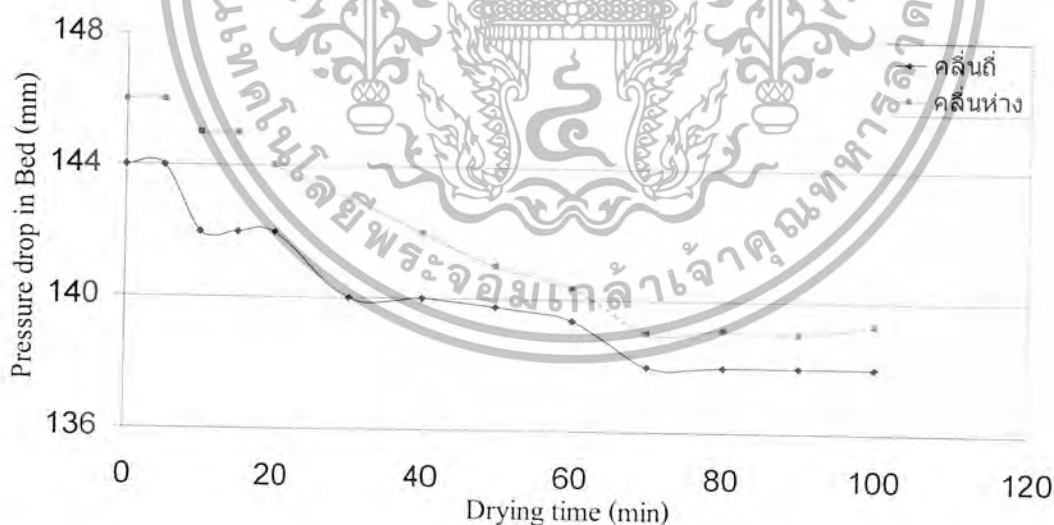


รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ หอทดลองแบบคลื่นระยะพิทซ์ 255 mm



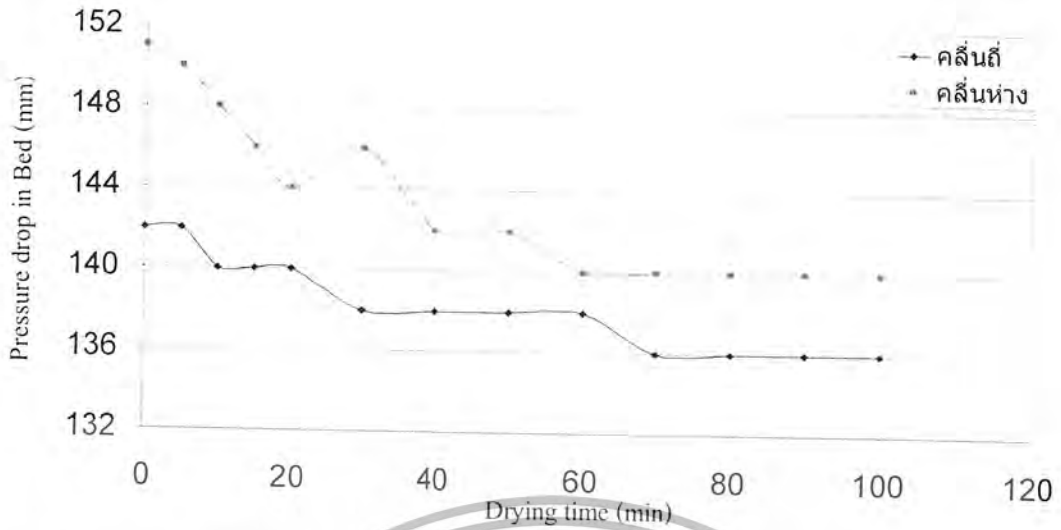
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอดที่ความเร็ว $1.4U_{mf}$ หอตลอดแบบคลื่นระยะพิทซ์ 255 mm

กราฟรูปที่ 5.18, 5.19 และ 5.20 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ความดันตกคร่อมภายในหอตลอดที่อุณหภูมิต่าง และที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ นั้น (ดูรูปที่ 5.18) เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีความดันตกคร่อมต่ำที่สุด



รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอดที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

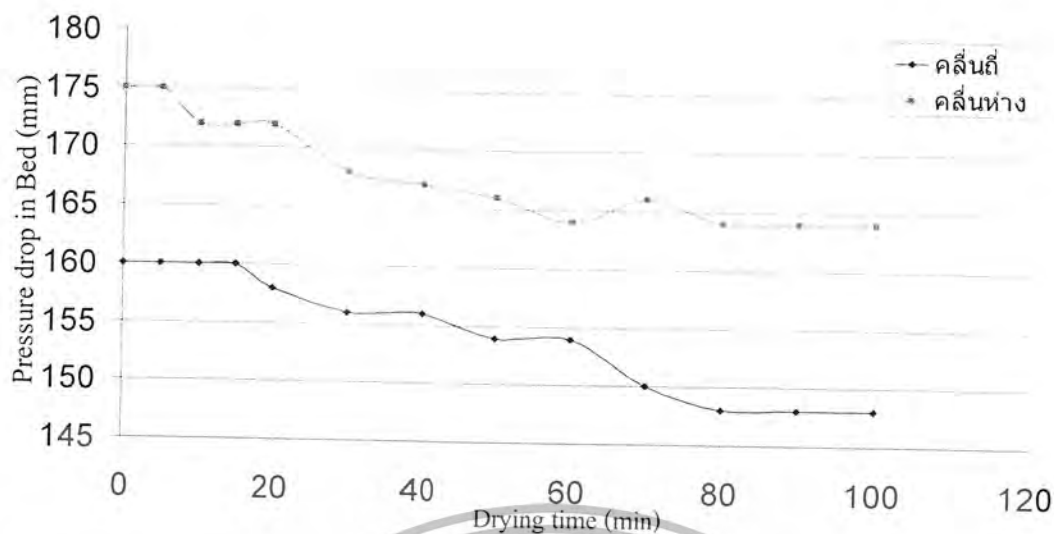


รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

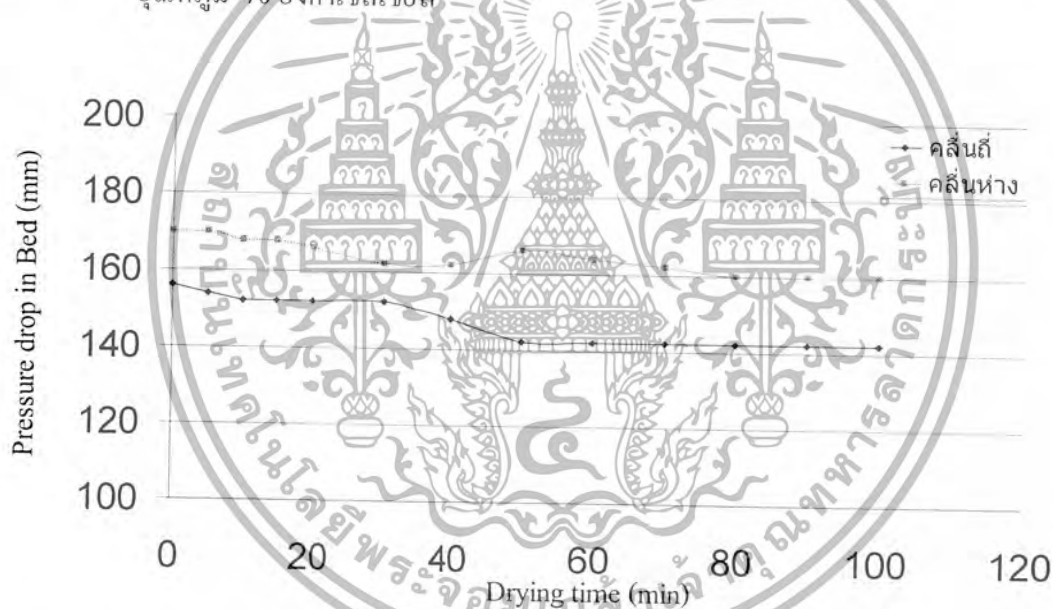


รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.0U_{mf}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

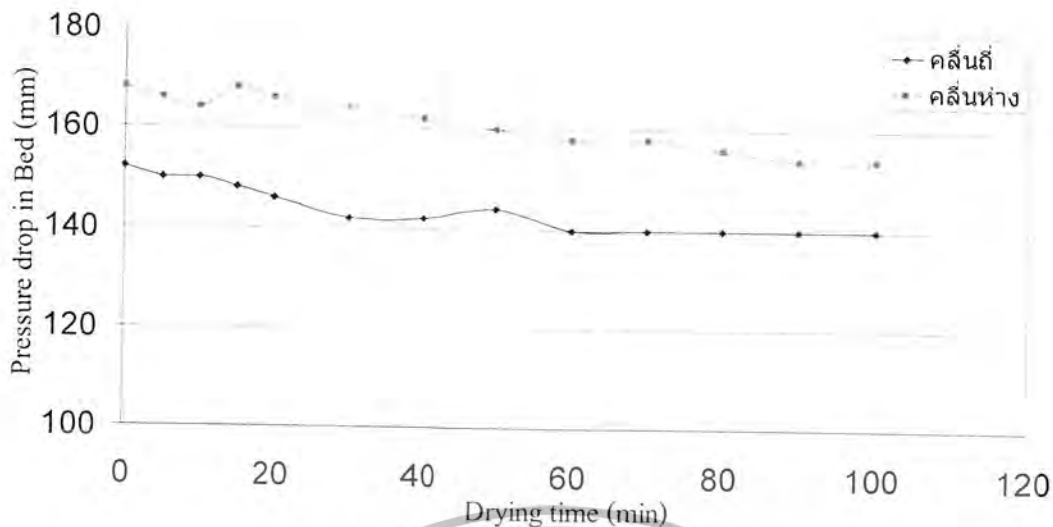
กราฟรูปที่ 5.21 , 5.22 และ 5.23 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ความดันตกคร่อมภายในหอทดลองที่แตกต่างกัน ของความเร็ว $1.0U_{mf}$ และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น(ดูรูปที่ 5.23) เส้นกราฟของหอทดลองแบบคลิ้นระยะพิคซ์ 170 mm จะมีความดันตกคร่อมต่ำที่สุด



รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอดที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$
อุณหภูมิจาก 70 องศาเซลเซียส

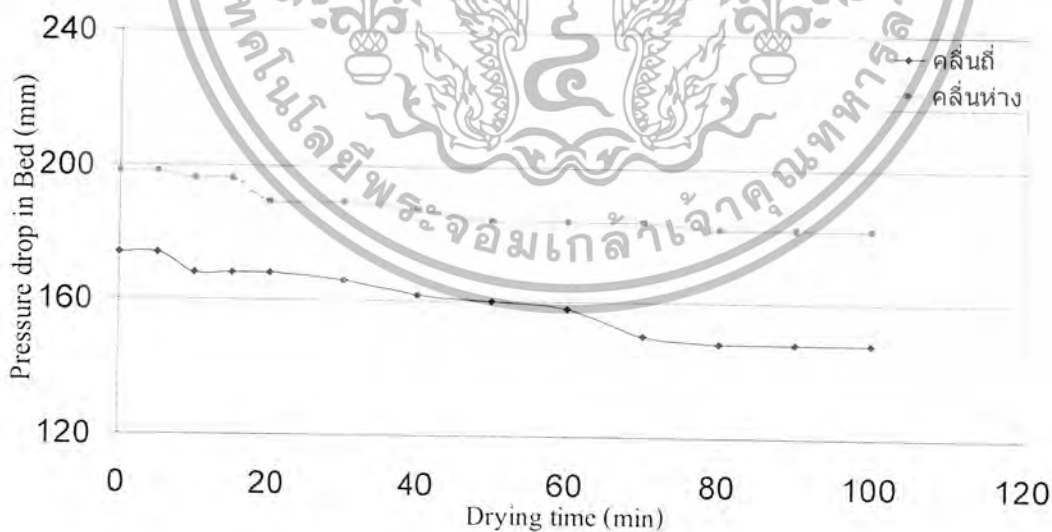


รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอตลอดที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$
อุณหภูมิจาก 85 องศาเซลเซียส

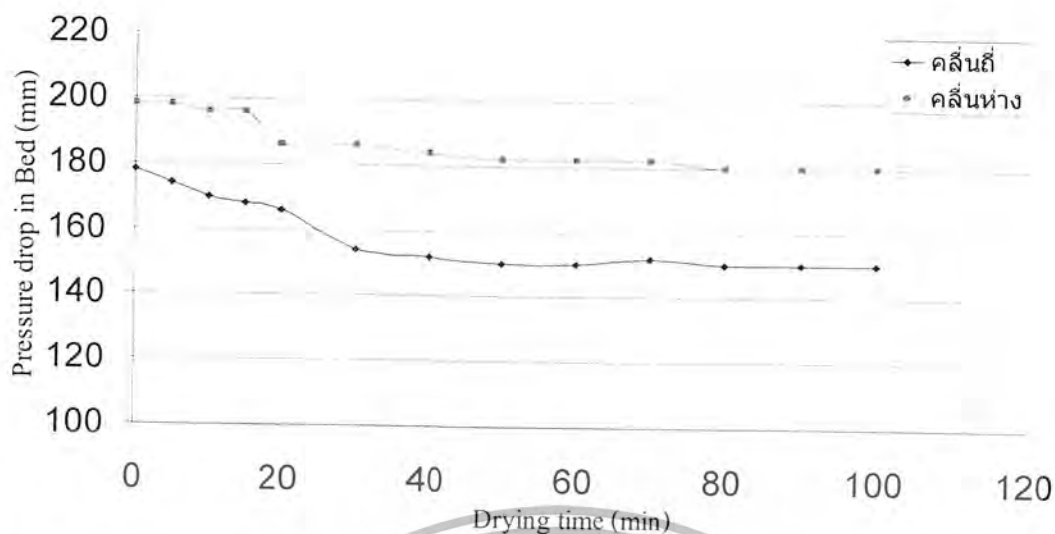


รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

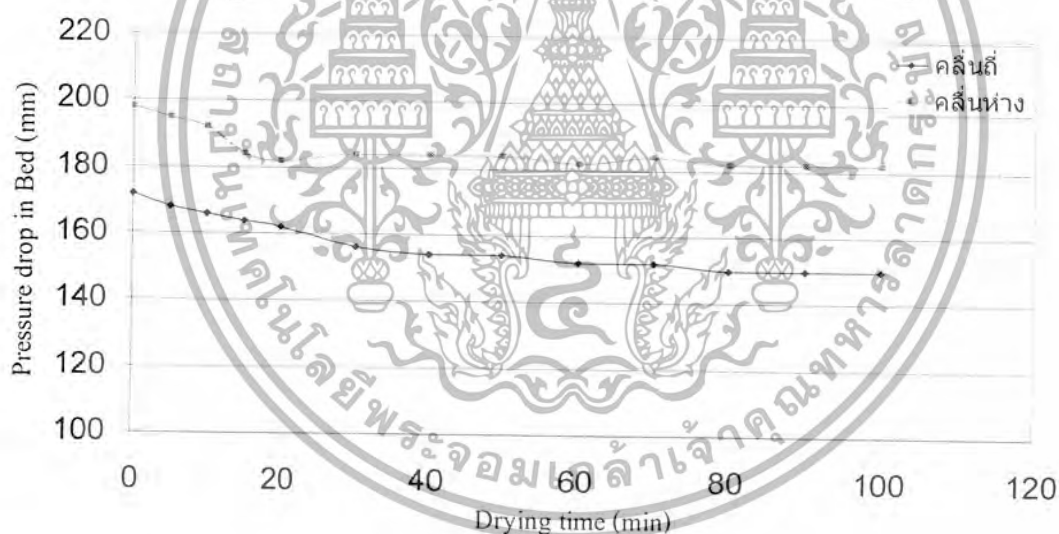
กราฟรูปที่ 5.24 , 5.25 และ 5.26 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ความดันตกคร่อมภายในหอทดลองที่แตกต่างกัน ของความเร็ว $1.2U_{mf}$ และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น(ดูรูปที่ 5.26) เส้นกราฟของหอทดลองแบบคลิ่นระยะพิช 170 mm จะมีความดันตกคร่อมต่ำที่สุด



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.4U_{mf}$ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.4U_{mf}$ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

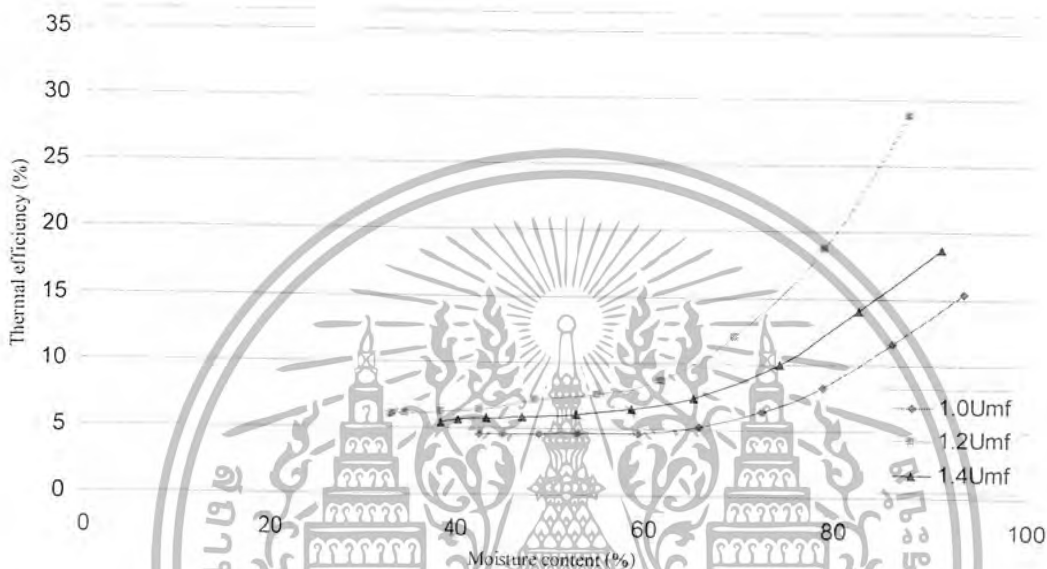


รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันภายในหอทดลองที่ความเร็ว $1.4U_{mf}$ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

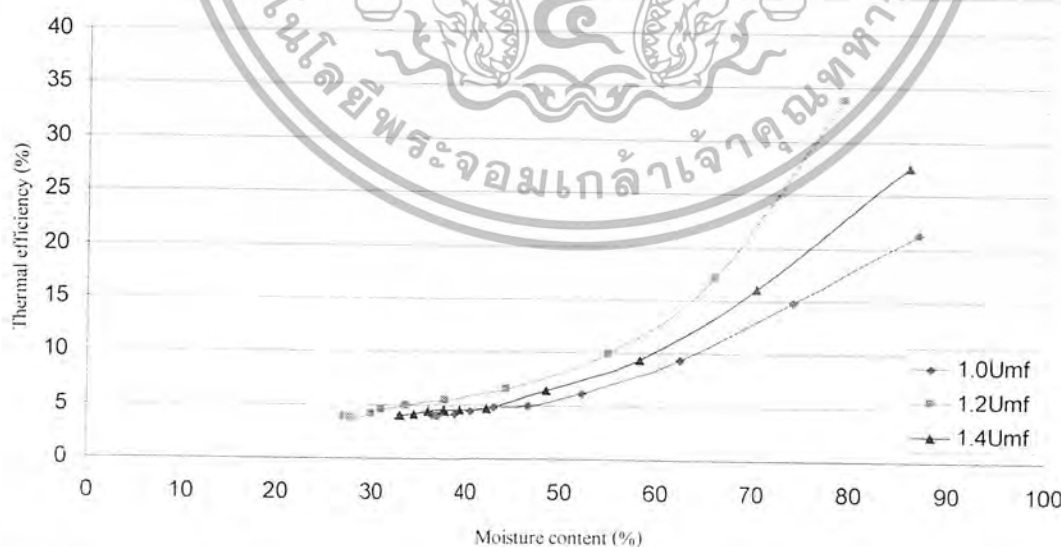
กราฟรูปที่ 5.27 , 5.28 และ 5.29 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ความดันตกคร่อมภายในหอทดลองที่แตกต่างกัน ของความเร็ว $1.4U_{mf}$ และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น(ดูรูปที่ 5.29) เส้นกราฟของหอทดลองแบบคลิน์ระยะพิชซ์ 170 mm จะมีความดันตกคร่อมต่ำที่สุด

5.5 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบ

จากผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบเมล็ดคพริกไทยของแต่ละความเร็ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งจะได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนี้ ทั้งนี้ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

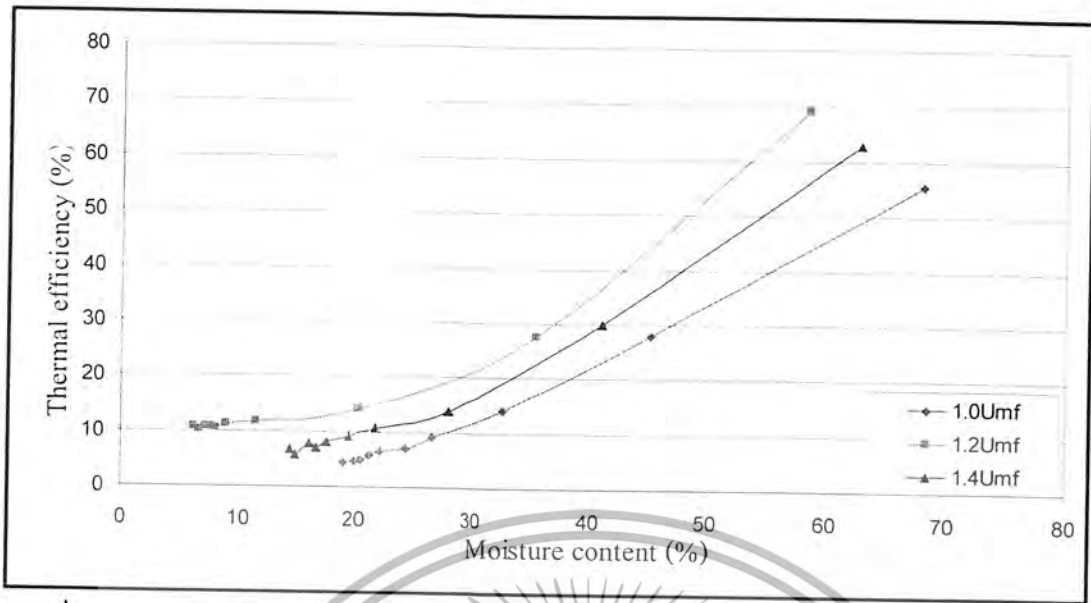


รูปที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของหอบแบบคลื่นระยะพิคซ์ 170 mm



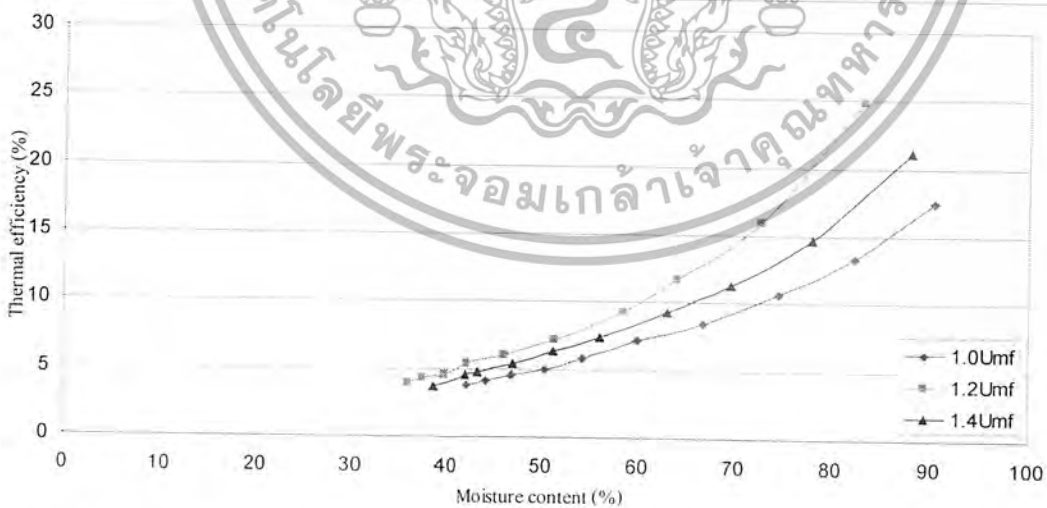
รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ของหอบแบบคลื่นระยะพิคซ์ 170 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



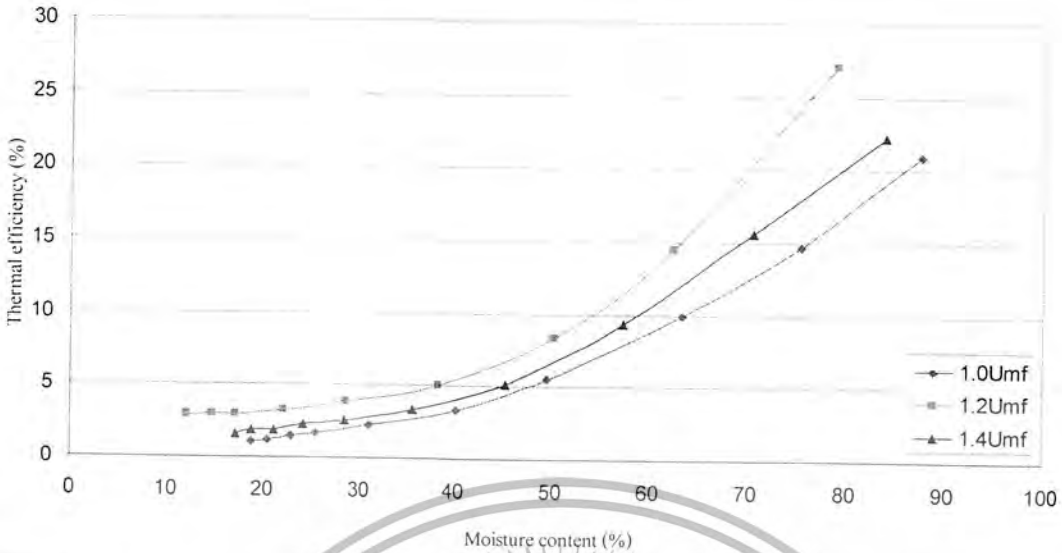
รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของหอบแบบคลื่นระยะพิตช์ 170 mm

กราฟรูปที่ 5.30 , 5.31 และ 5.32 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของหอบทดลองแบบคลื่นระยะพิตช์ 170 mm และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น (ดูรูปที่ 5.32) เส้นกราฟประสิทธิภาพของความเร็ว 1.2U_{mf} จะมีค่าสูงที่สุด และสามารถลดความชื้นได้มากที่สุด



รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสของหอบแบบคลื่นระยะพิตช์ 255 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

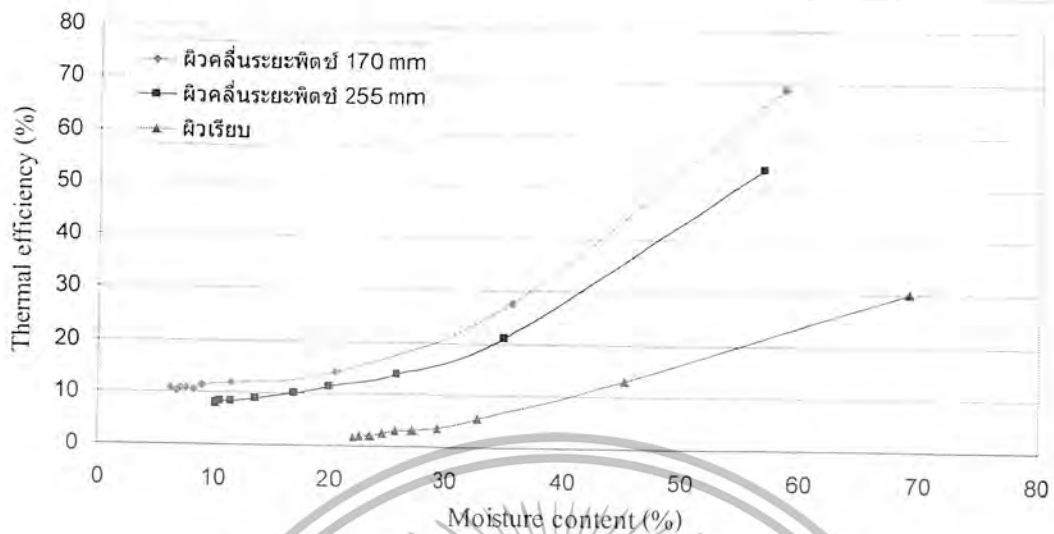


รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสของหอบแบบ คดีนระยะพิตช์ 255 mm



รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของหอบแบบ คดีนระยะพิตช์ 255 mm

กราฟรูปที่ 5.33 , 5.34 และ 5.35 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพทางความร้อนของ หอบทดลองแบบคดีนระยะพิตช์ 255 mm และที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นั้น(ดูรูปที่ 5.35) เส้นกราฟประสิทธิภาพของความเร็ว 1.2U_m จะมีค่าสูงที่สุด และสามารถลดความชื้นได้มากที่สุด



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็ว $1.2U_{mf}$ ของหอทดลองทั้ง 3 แบบ

จากกราฟรูปที่ 5.30 ถึง 5.35 สรุปได้ว่าหอทดลองแต่ละแบบจะสามารถลดความชื้นได้มากที่สุดเมื่อใช้ความเร็ว $1.2U_{mf}$ และ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากกราฟรูปที่ 5.36 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ และ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของหอทดลองแบบต่าง ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่หอทดลองแบบผิวด้านระยะพิคซ์ 170 mm มีประสิทธิภาพทางความร้อนและสามารถลดความชื้นได้มากกว่าหอทดลองแบบอื่น เมื่อใช้เวลาในการอบเท่ากัน

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่เราได้ทำการทดลองมานั้นเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งนั้นเราเห็นได้ว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพการอบแห้งจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นซึ่งประสิทธิภาพการอบแห้งมีค่าแปรผันตามกับอุณหภูมิ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จึงสามารถทำให้อัตราการลดความชื้นได้เร็วกว่าอุณหภูมิ 85 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เราจึงเลือกอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเมื่อเราจะวิเคราะห์ผลของตัวแปรอื่นที่เราสนใจ ตัวแปรอีกตัวที่เราสนใจนั้นคือการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยภายในบริเวณเบด ซึ่งเราได้ทำการกำหนดให้มีการกระจายตัวภายในเบดอยู่สามระดับ คือ 1.การกระจายตัวของเมล็ดอยู่ด้านล่างของห่อ 2.การกระจายตัวของเมล็ดทั่วห่อ และ 3.การกระจายตัวของเมล็ดอยู่ด้านบนของห่อ โดยค่าของการกระจายตัวนั้นเราแสดงอยู่ในรูปของอัตราการไหลของอากาศซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.073 , 0.087 และ 0.102 m^3/s ตามลำดับ จากผลการทดลองที่เราได้ไม่ว่าตัวแปรอุณหภูมิจะเปลี่ยนเป็นขนาดเท่าใดก็ตาม ณ ที่การกระจายตัวของเมล็ดภายในเบดทั่วห่อ (อัตราการไหล 0.087 m^3/s) จะสามารถทำให้อัตราการลดของปริมาณความชื้นได้เร็วกว่า ที่การกระจายตัวอยู่ด้านล่างของห่อ และการกระจายตัวอยู่ด้านบนของห่อ ดังนั้นเราจึงใช้ค่าการกระจายตัวทั่วห่อมาเป็นอีกตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับตัวแปรชนิดอื่น เมื่อเราทำการกำหนดตัวแปรที่เราจะนำมาเปรียบเทียบได้แล้วเราจึงได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะเงื่อนไขของตัวแปรที่เรากำหนดจากนั้นทำการเปลี่ยนห่อที่ใช้ทำการอบ ซึ่งจะเห็นได้จากกราฟเปรียบเทียบห่ออบชนิดต่าง ๆ เห็นได้ว่าห่ออบชนิดผิวคลื่นถี่มีความสามารถในการลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าห่ออบชนิดผิวคลื่นห่าง และชนิดผิวเรียบ (ห่ออบแบบธรรมดา) ดังนั้นห่ออบชนิดผิวคลื่นถี่จึงมีประสิทธิภาพในการอบแห้งดีกว่าห่ออบชนิดอื่นที่เรานำมาเปรียบเทียบ

ผิวคลื่นที่เราใส่ในห่ออบมีผลทำให้การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทำให้เราสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลดลงได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานอื่น ๆ เข้ามาช่วยในการอบเพื่อให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าเราจะนำห่ออบแบบผิวคลื่นมาใช้งานจริงเราควรจะทำการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดจากการใช้ผิวคลื่นให้ละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อที่เราจะสามารถออกแบบห่ออบได้อย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุดตามความเหมาะสมกับการใช้งานของเราได้ ซึ่งจะช่วยให้เราประหยัดพลังงานมากขึ้นพร้อมกับประสิทธิภาพที่มากขึ้น

บรรณานุกรม

- S.R.S. Dias , *Investigation of food grains drying with pulsating air flows* , Universidade Estadual paulista campus Guaratingueta : Bazil,@ www.sciencedirect.com.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ, 2535. การอบแห้งเมล็ดพืชอาหาร,พิมพ์ครั้งที่5, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 50-67.
- Kunii,d.,1969,*Fluidization Engineering*, New York, John Wiley and Sons, pp.66 – 120.
- สมศักดิ์ คำรงเลิศ, 2528,ฟลูอิดไอเซชัน, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 3 – 84.
- อรุณี ผุดผ่อง, 2531, การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1 – 38.
- S. Syahrul^a ,F. Hamdullahpur^b ,I. Dincer^c ,2002,*Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles*
- กฤษรัญ กิ่งแสง ,ปีเตอร์ เจตน์เจริญรักษ์ ,ยุทธนา เขียมสมบัติ,2542,เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไอเซชัน
- กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ, 2546. คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน...?. กรุงเทพฯ : ดอกหญ้ากรุฟ.
- กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัยและ กิตติ สติธิประภาพร, 2545. “การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง” หน้า 592-595 ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ. งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท บพิศการพิมพ์ จำกัด
- ณัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณธฤทธิ และ อภิชาติ เทอดโยธิน. 2542. “แบบจำลองการแพร่ ความชื้นของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน.” หน้า 268-273. ใน การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย. 2540. “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิด ไอเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนันต์ พงษ์จรกุลพานิช. 2539. “การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Abdullah, M.Z. Husain, Z. and Yin Pong, S.L. 2003. “Analysis of cold flow fluidization test
results for various.” **Biomass & Bioenergy**. 24 : 487-494.

Akpinar, E. Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. “Single layer drying behavior of potato slices in a
convective cyclone dryer and mathematical modeling.” **Energy Conversion
and
Management**. 44 : 1689-1705.

Brooker, D.B. Bakker-Arkema, F.D. and Hall, C.W. 1981. **Drying Cereal Grains**. The AVI
publish Company, Inc, Westport, Connecticut

Crank, J. 1975. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed. Oxford : Oxford University
Press.

Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985. **Fluidization**. 2nd ed. London : Academic
Press

Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. “Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer
drying model.” **Journal of Food Engineering**. 63 : 349-359.

Kozanoglu, B.U. Welti Chanes, J. Garcia Cuautle, D. and Santos Jean J.P. 2002.
“Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations; an
experimental study.” **Power Technology**. 125 : 55-60.

Kunii, D. Levenspiel, O. 1991. **Fluidization Engineering**. 2nd. United States of America :
Butterworth-Heinemann.

Mawatari, Y. Tatemoto, Y. Noda, K. 2003. “Prediction of minimum fluidization velocity for
vibrated fluidized bed.” **Power Technology**. 131 : 66-70.

Midilli, A. Olgun, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. **Drying
Technology**, 20(7), 1503-1513.

Montgomery, D.C. 1997. **DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS**. Fourth
edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc.

Senadeera, W. Bhandari, B.R. Toung, G. Wijesinghe, B. 2003. “Influence of shapes of
selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying.”
Journal of Food Engineering. 58 :277-283.

Sharma, R.R. 1999. “Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.

- Soponronarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. "Cross-flow fluidized bed paddy dryer." *Drying Technology*. 53(8) : 2207-2216
- Soponronarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORN DRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." *Agricultural Engineering Journal*. 8(4) : 223-231.
- Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" *Energy Conversion and management*. 43 : 1689-1708.
- Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minimum Fluidisation Velocity form Correlations: An Observation." *Asia J. Energy Environ*. 2(2) : 145-154.
- Syahrl, S. Hamdullahpur, F. and Dineer, I. 2002. "Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles." *Applied Thermal Engineering*. 22 : 1763-1775.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. "Modeling of drying kinetics of single apricot." *Journal of Food Engineering* 58 : 23-32.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเหมาะสำหรับการอบวัสดุที่มีลักษณะรูปร่างทรงกลม ดังนั้นในการออกแบบจึงใช้คุณสมบัติของเม็ดทรงกลมเป็นวัสดุพื้นฐานในการทดลอง

1. การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์ (U_{mf})

จากทฤษฎีสูทรในการคำนวณไม่สามารถนำมาคำนวณในหอแบบผิวกลื่นได้ จึงได้ทำการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์ (U_{mf}) โดยการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔH_{orific} กับ ΔH_{bed} จะได้ค่า

$$U_{mf} = 46 \text{ mm H}_2\text{O} \quad \text{ที่ } \Delta H_{\text{bed}} \text{ คงที่}$$

นำค่าที่ได้ไปหาความเร็วและอัตราการไหลอากาศ โดยใช้ค่าจากสมการ fit-curve ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔH_{orific} กับ ความเร็วที่วัดได้จาก hot-wire ที่ท่อ 0.081 เมตร จะได้สมการ

$$V = 2E-05H^3 - 0.0049H^2 + 0.4798H + 0.4323 \quad (\text{m/s})$$

$$\text{แทนค่า } H = U_{mf} = 46 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$V = 2E-05 \times 46^3 - 0.0049 \times 46^2 + 0.4798 \times 46 + 0.4323$$

$$V = 14.0812 \text{ m/s}$$

$$\text{และ} \quad Q = VA$$

$$= 14.0812 \times \pi / 4 \times 0.081^2$$

$$= 0.073 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. คำนวณความชื้นเริ่มต้น

จากการทำการอบแห้งเมล็ดพริกไทย น้ำหนักสุทธิ 10 กรัม อบจนแห้งและน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงจะได้น้ำหนักแห้ง 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 80 \%$$

3. การคำนวณหาความชื้นคงเหลือ

$$\begin{aligned} Wd &= (w-d)/d \times 100 \% \\ &= (1000-943.46)/1000 \times 100 \% \\ &= 94.346 \% \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาประสิทธิภาพความร้อน

$$\eta_{th} = \frac{m_s C_{p,s} (T_i - T_o) + m_w C_{p,w} (T_i - T_o) + m_w h_{fg}}{m_d C_{p,s} (T_i - T_o)}$$

$$\text{และ } h_{fg} = C_{p,w} T_o + wx(2501 + 1.82T_o)$$

$$w = 0.01122, \quad T_i = 70^\circ\text{C}, \quad T_o = 62.2^\circ\text{C}, \quad C_{p,w} = 4.19, \quad C_{p,s} = 1.5$$

$$m_s = 0.2, \quad m_w = 0.8, \quad m_d = 1.0031$$

$$\eta_{th} =$$

$$\frac{0.2 \times 1.5 \times (70 - 62.2) + 0.8 \times 4.19 \times (70 - 62.2) + 0.8 \times (4.19 \times 62.2 + 0.01122 \times (2501 + 1.82 \times 62.2))}{1.0031 \times 0.087 \times (70 - 62.2)}$$

$$\eta_{th} = 21.3824 \%$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 การทดลองครั้งที่ 1 ในหอบแห้งฟลูอิดเบดแบบผิวคลื่นถ้

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

อุณหภูมิห้อง 32 °C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาท)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	146	8.6	57.8	100	0
10	910.69	145	8.2	59.9	91.069	17.38436
20	832.44	144	7.9	58.1	82.4766	12.97143
30	768.05	143	7.8	56.9	74.7415	9.553382
40	708.78	142	7.8	54.9	67.0246	7.497639
50	658.54	141	6.8	55.9	59.9363	6.621357
60	615.95	140	6.6	56.7	53.469	5.965618
70	575.05	138	6.4	56.7	46.8289	5.688633
80	554.05	140	6.3	62.4	43.177	5.462663
90	539.22	139	6.2	64.5	40.5003	5.435244
100	528.78	140	6	66	38.5642	5.323131

ตารางที่ ข.2 การทดลองครั้งที่ 2 ในหอบแห้งฟลูอิดเบดแบบผิวดินถั่ว

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.087 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	160	8.7	59.2	100	0
10	905.21	160	8.4	62.2	90.521	21.38239
20	826.92	158	7.7	61.1	81.8722	15.10557
30	761.37	156	7.6	59.6	73.9452	10.66127
40	688.58	156	7.6	54.8	64.3848	7.702966
50	646.59	154	6.6	60.3	58.2867	7.129465
60	606.28	154	5.5	60.1	52.0525	6.466854
70	572.68	150	5.4	61.4	46.5105	6.298786
80	551.82	148	5.4	64.4	42.868	5.91967
90	533.28	148	5.2	64.7	39.5082	5.85569
100	518.88	148	5	65.8	36.8079	5.765213

ตารางที่ ข.3 การทดลองครั้งที่ 3 ในหอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบเบดเคลื่อนที่

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70°C

อุณหภูมิห้อง 32°C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ $0.102\text{ m}^3/\text{s}$

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	174	8.5	58.2	100	0
10	908.25	168	8.3	62.9	90.825	18.76502
20	830.15	168	7.5	62	82.226	14.1039
30	762	166	7.5	60.2	74.0167	9.91012
40	693.05	162	7.4	57	64.9681	7.312127
50	648.31	160	6.8	60.4	58.5126	6.537677
60	610.68	158	6.5	61.3	52.7083	6.066506
70	575.56	150	6.4	61.6	46.9573	5.876596
80	553.78	148	6.2	64.5	43.1732	5.725581
90	537.36	148	6.3	65.7	40.2081	5.629621
100	526.01	148	6.1	66.9	38.0959	5.434282

ตารางที่ ข.4 การทดลองครั้งที่ 4 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์แบบเบดแบบผิวคลื่นถั่ว

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	151	10.6	67.8	100	0
10	869.29	148	9.8	68.6	86.929	21.24702
20	758.36	144	9.5	65.4878	74.168	14.87004
30	668.85	146	9.2	63.0468	62.3649	10.38
40	601.53	142	8.5	63.5116	52.2999	7.879992
50	566.7	142	8.2	71.6517	46.5096	7.050015
60	547.14	140	7.8	76.6079	43.0581	6.539463
70	534.2	140	7.5	79.2719	40.6931	6.470379
80	523.86	140	7.2	80.1184	38.7574	6.090038
90	514.3	140	6.8	80.4146	36.9325	5.95995
100	511.74	140	6.4	83.7432	36.4348	5.959897

ตารางที่ ข.5 การทดลองครั้งที่ 5 ในหอบแห้งฟลูอิดเบดแบบผิวดินถั่ว

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.087 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	156	10.9	69.8	100	0
10	844.66	152	10.1	70.4	84.466	25.3043
20	738.29	152	9.4	70.4	71.8728	17.03466
30	643.23	152	9	66.2161	58.9971	11.53962
40	582.33	148	8.2	69.5631	49.5292	9.040007
50	529.17	142	7.9	69.2367	40.4004	7.75997
60	510.82	142	7	78.9703	36.9327	7.369994
70	500.45	142	6.2	81.5484	34.9026	7.179239
80	489.34	142	5.9	81.2585	32.6826	7.11991
90	476.04	142	5.1	80.6321	29.9647	6.999955
100	468.45	142	4.4	82.5433	28.3703	7.000163

ตารางที่ ข.6 การทดลองครั้งที่ 6 ในหอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบพิวคตินี่

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.102 m³/s

เวลา(นาท)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	178	10.2	70	100	0
10	858.75	170	9.7	71.8	85.875	21.50205
20	745.35	166	9.4	70.8	72.6698	15.88904
30	656.53	154	9.1	69.0509	60.7532	10.89987
40	594.56	152	8.8	70.7554	51.3142	8.399996
50	539.2	150	8.8	70.4214	42.0031	7.180011
60	523.74	150	7.6	80.4109	39.1359	6.920952
70	514.02	152	6.9	81.9912	37.28	6.599821
80	506.5	150	6.2	82.6901	35.817	6.600011
90	497.94	150	5.8	82.3542	34.127	6.539816
100	491.02	150	5.2	82.8363	32.7373	6.409939

ตารางที่ ข.7 การทดลองครั้งที่ 7 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์เบดแบบผิวคลื่นถี่

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

อุณหภูมิห้อง 32 °C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	146	12.2	86.1	100	0
10	681.29	142	11.1	74.8	68.129	55.6052
20	525.18	142	9.6	77.0	45.21512	27.9007
30	452.05	138	9.1	78.6	31.29037	14
40	431.61	138	8.6	91.5	26.76874	10.4001
50	421.41	136	8.2	94.9	24.4055	8.69994
60	411.82	136	7.8	94.6	22.1298	7.69958
70	405.5	136	7.2	96.4	20.59515	7.39969
80	400.95	136	6.9	97.2	19.47308	6.69991
90	396.67	134	6.4	97.4	18.40562	6.79999
100	389.53	134	5.9	95.8	16.60563	6.70006

ตารางที่ ข.8 การทดลองครั้งที่ 8 ในหอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบพิวคลิ่นถึ

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100°C

อุณหภูมิห้อง 32°C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ $0.087\text{ m}^3/\text{s}$

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	146	12.2	86.1	100	0
10	681.29	142	11.1	74.8	68.129	55.6052
20	525.18	142	9.6	77.0	45.21512	27.9007
30	452.05	138	9.1	78.6	31.29037	14
40	431.61	138	8.6	91.5	26.76874	10.4001
50	421.41	136	8.2	94.9	24.4055	8.69994
60	411.82	136	7.8	94.6	22.1298	7.69958
70	405.5	136	7.2	96.4	20.59515	7.39969
80	400.95	136	6.9	97.2	19.47308	6.69991
90	396.67	134	6.4	97.4	18.40562	6.79999
100	389.53	134	5.9	95.8	16.60563	6.70006

ตารางที่ ข.9 การทดลองครั้งที่ 9 ในหอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบผิวคลื่นถี่

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100°C

อุณหภูมิห้อง 32°C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ $0.102\text{ m}^3/\text{s}$

เวลา(นาท)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	172	12.5	88.2	100	0
10	664.76	166	11.5	81.8	66.476	62.87901
20	521.04	162	9.5	83.1	44.85617	30.00041
30	455.88	156	9	86.8	32.35041	16.90067
40	433.3	154	8.5	94.9	27.39735	12.50007
50	421.32	154	8.1	96.9	24.63252	10.29922
60	412.3	152	7.8	96.8	22.49163	9.399606
70	405.84	152	7.2	97.8	20.92481	8.699956
80	401.38	150	6.5	98.5	19.82586	8.899831
90	396.47	150	5.9	98.7	18.60258	9.09998
100	394.29	150	5.6	97.7	18.05273	8.699955

ตารางที่ ข.10 การทดลองครั้งที่ 10 ในหอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบผิวกลิ้งห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

อุณหภูมิห้อง 32 °C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาทื)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	144	8.6	57.8	100	0
10	903.56	142	8.2	81.8	90.356	13.02998
20	830.14	142	7.9	84.2	82.2304	11.86999
30	766.05	140	7.8	84.7	74.51	10.67029
40	706.46	140	7.8	84.2	66.7311	9.699922
50	658.54	140	6.8	86.7	59.948	9.199754
60	615.95	140	6.6	87.7	53.4807	8.869644
70	575.05	138	6.4	87.7	46.8405	8.449974
80	554.05	138	6.3	93.4	43.1887	8.310013
90	549.35	138	6.1	98.7	42.3404	8.360228
100	521.01	138	6	91.1	37.1815	8.220003

ตารางที่ ข.11 การทดลองครั้งที่ 11 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์แบบพิวคลีนถั่วห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70°C

อุณหภูมิห้อง 32°C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ $0.087\text{ m}^3/\text{s}$

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	175	8.7	59.2	100	0
10	905.21	172	8.4	60.5	90.521	17.27708
20	830.92	172	7.7	61.7	82.3141	15.12125
30	762.37	168	7.6	61.6	74.0642	13.07082
40	687.58	167	7.6	60.8	64.254	11.09
50	646.59	166	6.6	62.4	58.2925	10.53014
60	606.28	164	6.4	62.9	52.0582	9.999998
70	572.68	166	6.3	62.8	46.5162	9.600002
80	551.82	164	6.3	66.1	42.8737	9.409847
90	540.92	164	6	69.1	40.8984	9.380234
100	518.34	164	5.9	64.7	36.7241	9.280004

ตารางที่ ข.12 การทดลองครั้งที่ 12 ในหอบแห้งฟลูอิดไรซ์แบบพิวคตินแห้ง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 70 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.102 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	198	8.9	59.4	100	0
10	908.25	196	8.4	60.7	90.825	15.13068
20	831.15	189	7.9	62.2	82.3361	13.72
30	763.19	189	7.7	62.2	74.1595	12.1
40	692.15	187	7.7	61.8	64.8512	10.62955
50	648.31	184	6.6	63.2	58.5173	9.98058
60	610.68	184	6.4	63.5	52.713	9.379999
70	575.56	184	6.2	63.6	46.9621	9.029905
80	553.78	182	6.2	66.5	43.1779	8.799918
90	546.21	182	6.1	69.2	41.8109	8.779978
100	521.76	182	6.2	65.2	37.3346	8.680012

ตารางที่ ข.13 การทดลองครั้งที่ 13 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์แบบผิวคลื่นห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

อุณหภูมิห้อง 32 °C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	142	10.6	64.2	100	0
10	849.23	140	9.8	66.4	84.923	21.27044
20	736.58	140	9.5	65.9	71.658	15.51002
30	643.75	138	8.7	65.0	59.0552	11.70967
40	550.74	138	8.1	61.6	44.607	9.55002
50	486.6	138	8	65.7	32.9609	8.390012
60	454.59	138	6.8	74.2	26.3826	7.810393
70	438.67	136	6.5	79.3	22.8805	7.700034
80	428.39	136	6.2	81.1	20.5371	7.439717
90	420.47	136	6	82.0	18.6883	7.379993
100	414.05	136	5.8	82.5	17.1615	7.279946

ตารางที่ ข.14 การทดลองครั้งที่ 14 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์แบบแบบผิวคลื่นห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.087 m³/s

อุณหภูมิห้อง 32 °C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาทื)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	170	10.9	67.5	100	0
10	839.53	168	10.1	70.4	83.953	23.60928
20	728.74	166	9.5	69.8	70.7563	16.90766
30	632.01	162	8.7	68.8	57.4827	12.82037
40	552.82	162	7.9	66.3	44.9529	10.71
50	494.3	166	6.9	70.3	34.3671	9.440035
60	460.95	164	6.5	76.7	27.6202	8.759998
70	442.13	162	6.2	80.6	23.5374	8.439994
80	429.66	160	5.2	82.2	20.7169	8.279969
90	420.12	160	4.7	82.8	18.4966	8.119644
100	412.343	160	4.2	83.2	16.6454	7.95998

ตารางที่ ข.15 การทดลองครั้งที่ 15 ในหอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบผิวคลื่นห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 85°C

อุณหภูมิห้อง 32°C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ $0.102\text{ m}^3/\text{s}$

เวลา(นาทื)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	198	11.5	68.1	100	0
10	840.19	196	10.7	68.4	84.019	17.89163
20	727.56	186	8.4	70.1	70.6137	13.55
30	631.52	186	8.3	69.2	57.4134	10.67382
40	554.59	184	7.3	67.0	45.2317	9.000015
50	501.29	182	6.3	71.5	35.621	8.297357
60	465.14	182	5.1	77.8	28.4096	7.80965
70	445.45	182	4.7	81.2	24.1765	7.439563
80	431.96	180	4.5	82.3	21.1481	7.329966
90	421.8	180	4.7	82.9	18.796	7.069871
100	415.02	180	4.3	83.3	17.1886	6.999969

ตารางที่ ข.16 การทดลองครั้งที่ 16 ในหอบแห้งฟลูอิดซ์แบบเบบผิวคลื่นห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.073 m³/s

เวลา(นาทื)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบต (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	142	12	85.5	100	0
10	675.46	140	10.9	74.2	67.546	53.6553
20	507.62	138	9.4	73.0	42.6977	24.30002
30	448.29	136	9.2	81.3	31.0099	13.1009
40	428.29	136	8.7	91.2	26.5485	9.699021
50	415.72	136	8.3	93.4	23.6135	8.200211
60	407.3	136	7.9	95.0	21.5881	7.199944
70	400.37	138	7.3	95.4	19.8867	6.299984
80	395.32	138	7	96.4	18.6254	5.800162
90	392.09	138	6.5	97.7	17.8083	5.699985
100	389.02	138	6	97.9	17.0253	5.700019

ตารางที่ ข.17 การทดลองครั้งที่ 17 ในหอบแห้งฟลูอิดไรซ์เบดแบบผิวคลื่นห่าง

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.087 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	168	12.2	87.8	100	0
10	645.89	164	11.1	80.4	64.589	66.05924
20	505.6	166	8.8	82.2	42.8686	33.30001
30	457.96	164	8.9	89.1	33.4461	20.30041
40	439.09	162	8.3	95.1	29.3257	15.19994
50	427.53	160	7.9	96.4	26.6929	13.09943
60	419.64	158	7.7	97.3	24.8475	11.49999
70	412.39	158	6.9	97.7	23.1198	10.89996
80	409.31	156	6.3	98.3	22.3729	10.39983
90	403.25	154	5.9	98.9	20.8924	9.89999
100	399.68	154	5.6	99.0	20.0071	9.89999

ตารางที่ ข.18 การทดลองครั้งที่ 18 ในหอบแห้งฟลูอิดไอซ์เบดแบบผิวคลื่นถี่

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 °C

อุณหภูมิห้อง 32 °C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

อัตราการไหลอากาศ 0.102 m³/s

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	198	12.3	87.6	100	0
10	668.69	192	11.3	81.2	66.869	60.14007
20	526.05	182	9.3	82.2	45.5377	29.70002
30	461.46	184	9.1	89.7	33.2594	17.80016
40	438	184	8.6	94.9	28.1756	12.19994
50	425.81	184	8.2	96.3	25.3925	10.59981
60	417.01	182	7.9	97.2	23.3258	9.300265
70	410.25	184	7.3	97.6	21.7048	8.400073
80	404.64	182	6.6	98.1	20.3373	7.799798
90	398.78	182	6	98.8	18.8891	7.499996
100	394.12	182	5.7	98.9	17.7205	7.499984

ตารางที่ ข.19 การทดลองครั้งที่ 19 ในหอบแห้งฟลูอิดไคซ์แบบธรรมดา(หอเปล่า)

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 100 ° C

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศเข้า 0.2 % RH

อัตราการไหลอากาศ 0.087 m³/s

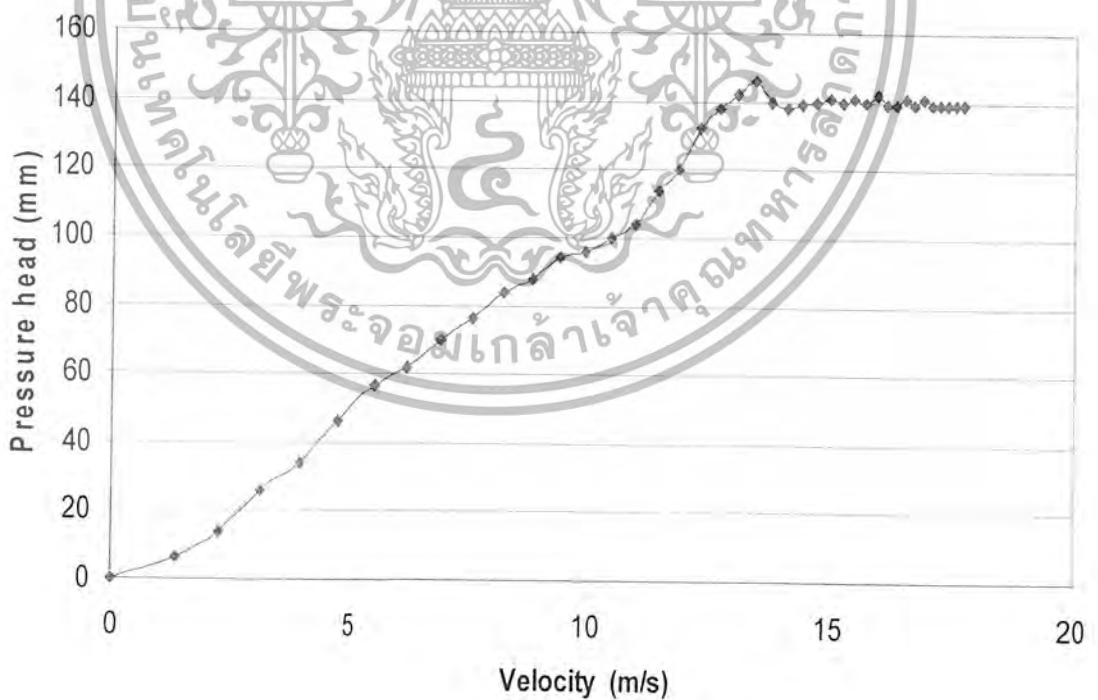
อุณหภูมิห้อง 32 ° C

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 1000 กรัม

เวลา(นาที)	มวลที่เหลือ(กรัม)	ความดันเบด (mm.H ₂ O)	ความชื้นอากาศออก(%)	อุณหภูมิอากาศออก(*C)	ความชื้นที่เหลือ(%)	ประสิทธิภาพ(%)
0	1000	98	10.9	66.9	100	0
10	690.13	96	10.1	70.9	69.013	29.999
20	525.36	86	8.9	71	45.1378	13.050
30	460.54	86	8.3	72.1	32.7996	5.382
40	444.02	84	7.8	73.5	29.2125	3.700
50	434.49	82	6.2	73.3	27.0662	3.000
60	427.75	82	7.1	73.4	25.5149	2.900
70	422.68	82	6.2	75.1	24.3297	2.401
80	418.44	80	4.1	74.9	23.3266	1.900
90	415.27	80	4.7	75.2	22.569	2.001
100	412.49	80	4.4	75.7	21.8995	1.700

ตารางที่ ข.20 การทดลองหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน(U_{mf})

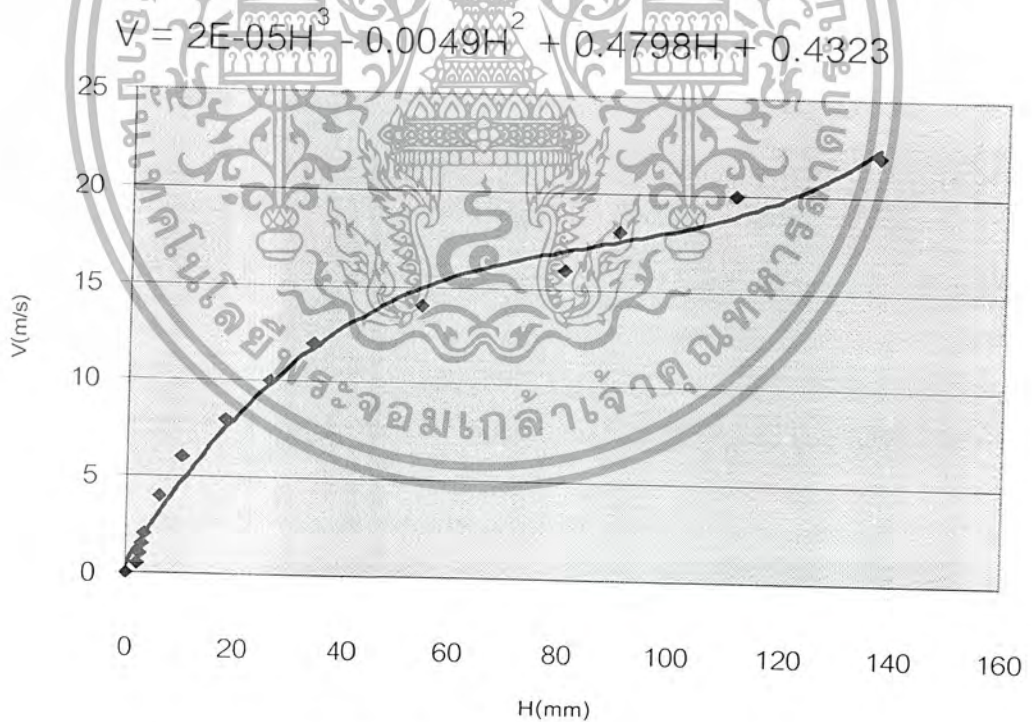
P_{bed} (mm.H ₂ O)	V(m/s)	P_{bed} (mm.H ₂ O)	V(m/s)
2	1	42	13
4	2	44	14
6	3	46	14
8	4	48	14
10	5	50	15
12	6	52	15
14	6	54	15
16	7	56	15
18	8	58	16
20	8	60	16
22	9	62	16
24	9	64	16
26	10	66	17
28	10	68	17
30	11	70	17
32	11	72	17
34	12	74	17
36	12	76	17
38	13	78	18
40	13	80	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 การทดลองหาค่าความเร็วโดยใช้ Hot-wire กับ H_{orific}

H(mm)	V(m/s)
137	22
111	20
90	18
80	16
54	14
34	12
26	10
18	8
10	6
6	4
3	2
2.8	1.5
2.5	1
2	0.5
0	0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้