

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องอบแห้งผิวคลื่นที่มีการไหลเป็นจังหวะ

CYCLIC FLOW FLUIDIZED WAVY-SURFACED DRYER

นาย รัชชัย เมฆะ

นาย วีระพงษ์ ทรมแพทย์

นาย สุรเทพ พุกเกษม

ร.พ.

ร 395 ค

9550

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 81775

วัน,เดือน,ปี 24 ส.ย. 2551

b. 11937103

i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งผิวคลื่นที่มีการไหลเป็นจังหวะ
Cyclic flow fluidized wavy-surfaced dryer



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องอบแห้งผิวคลื่นที่มีการไหลเป็นจังหวะ

Cyclic flow fluidized wavy-surfaced dryer

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1.นาย ชวชัย เมฆะ | รหัสประจำตัว 48015376 |
| 2.นาย วีระพงษ์ พรหมแพทย์ | รหัสประจำตัว 48015395 |
| 3.นาย สุรเทพ พุกเกษม | รหัสประจำตัว 48015405 |


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบผิวคลื่นที่มีการไหลเป็นจังหวะ

นาย รัชชัย เมฆะ 48015376
นาย วีระพงษ์ พรหมแพทย์ 48015395
นาย สุรเทพ ทุกเกษม 48015405
รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบควบคุมความเร็วลมเป็นจังหวะ โดยใช้ลึนปีกผีเสื้อเป็นตัวควบคุม เพื่อหาความเร็วลม อุณหภูมิ ขนาดของผิวคลื่นและลึนปีกผีเสื้อที่เหมาะสม เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพที่สุด จะทำการทดลองโดยใช้หอออะคลิสิกไซทรวงสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 80 มม. ยาว 200 มม. สูง 1000 มม. ในหอททดลองจะใส่ผิวคลื่นชนิดต่างๆ ส่วนด้านล่างของหอททดลองจะมีลึนปีกผีเสื้อ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความเร็วลมที่เข้าภายในห่อให้เป็นจังหวะ ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปลือก) เริ่มทดลองที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอททดลอง $1.1 U_{mf}$, $1.3 U_{mf}$, $1.8 U_{mf}$ และ $2.0 U_{mf}$ โดยใช้เวลาดทดลองแต่ละกรณี 2 ชั่วโมง วัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 5 นาที สิ่งที่ได้รับจากการทดลองคือ ความเร็วลม อุณหภูมิ ผิวคลื่น ขนาดของลึนปีกผีเสื้อ และความเร็วรอบของเพลลาที่ใช้ในการเปิด-ปิด ลึนปีกผีเสื้อที่เหมาะสมในการอบแห้ง และได้ทราบลักษณะการไหลของอากาศที่มีผลต่อการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cyclic flow fluidized wavy-surfaced dryer

Mr. Thawatchai Meka 48015376

Mr. Weerapong Prompat 48015395

Mr. Suratep Pookkasem 48015405

Assoc.prof.Dr.Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

The paper deals with the characteristic study of drying pepper corn with cyclic air velocity fluidization by using a throttle valve to optimize air, velocity, temperature, wavy-surfaced and amplitude (size) of the throttle valve that provides the best efficiency. Transparent rectangular acrylic bed is used with wide 80 mm length 200 mm and 1000 mm. height inside and the throttle valve is introduced at the bed inlet to create air cyclic flow. Experiment with pepper of 80% moisture content (wet standard) is employed with varying inlet air temperature at 80° and 90° and air velocity of $1.1 U_{mf}$, $1.3 U_{mf}$, $1.8 U_{mf}$ and $2.0 U_{mf}$. Drying time and weight pepper corn are measured in every 5 min for 120 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และความ
ร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลท่านแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญา
บัตรนี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร และรุ่นพี่
ปริญญาเอก ที่ให้ความเอาใจใส่แนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอกราบ
ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็น
ที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังคง
ให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุด
ประมาทและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์ใด ๆ ที่เป็นผลอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณ
ทุกท่าน

นาย ธีรชัย เมณะ
นาย วีระพงษ์ พรหมแพทย์
นาย สุรเทพ ทุกเกษม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 แนวความคิดของการวิจัย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	2
1.5 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.6 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างชุดทดลอง.....	2
1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคฟลูอิด ไคเซชัน.....	3
1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ทฤษฎีฟลูอิด ไคเซชัน.....	10
2.1.1 ประเภทของฟลูอิด ไคเซชัน.....	10
2.1.2 ลักษณะของฟลูอิด ไคซ์เบค.....	10
2.2 กลศาสตร์ของฟลูอิด ไคเซชัน.....	13
2.2.1 ความเป็นทรงกลม.....	13
2.2.2 สัดส่วนช่องว่าง.....	13
2.2.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซชัน.....	14
2.2.4 ความเร็วคอติสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง.....	16
2.3 กระบวนการอบแห้ง.....	16
2.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	17
2.3.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	18
2.4 นิยามความชื้นในวัสดุ.....	18
2.5 หลักการอบแห้งเมสตีฟ.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 ความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุ.....	19
2.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบ.....	20
2.8 ก๊าซฟลูอิด ไคเซรัน.....	20
2.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอทดลองฟลูอิด ไคซ์เบค.....	21
2.10 ฟลูอิด ไคเซรันความเร็วของไหลต่ำสุด.....	21
2.11 การหาความเร็วลม โดยใช้ออร์ฟิต.....	22
2.12 การคำนวณหากำลังและขนาดของพัดลมอัดอากาศ.....	24
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชที่มีการไหลเป็นจังหวะ	
3.1 การออกแบบเครื่องมือทดลอง.....	27
3.2 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของเมล็ดพืชไทย.....	28
3.3 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดพืชไทย.....	29
3.4 ความหนาแน่นของเมล็ดพืชไทย.....	29
3.5 ความสูงที่เกิดฟลูอิด ไคเซรัน.....	30
3.6 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซรัน.....	30
3.7 การคำนวณหาความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ.....	32
3.8 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ.....	33
3.9 การหาขนาดของฮีตเตอร์.....	36
3.9.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_p	36
3.9.2 การหาขนาดความต้านทานของขดลวดของฮีตเตอร์ (R).....	37
3.10 ผลที่ได้รับจากการออกแบบและการคำนวณ.....	38
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง.....	39
4.1.1 การคัดเลือกเมล็ดพืชไทย.....	39
4.1.2 การหาความชื้นเริ่มต้น.....	39
4.1.3 การควบคุมความเร็วอากาศที่ทางเข้าเบค.....	23
4.2 องค์ประกอบของการทดลอง.....	40
4.2.1 การเตรียมเมล็ดพืชไทยสำหรับทดลอง.....	40
4.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2.1 เป็นเครื่องมือวัดแบบ ลวดร้อน(Hot-Wire).....	41
4.2.2.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ Techo –Meter.....	41
4.2.3 ชุดป้อนอากาศ (Blower).....	42
4.2.4 ชุดควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศ (Inverter).....	42
4.2.5 ชุดให้ความร้อน (Heater).....	43
4.2.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน.....	43
4.2.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice).....	44
4.2.8 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักของเมล็ดพริก ไทย.....	45
4.2.9 ชุดลีนปีกผีเสื้อ.....	45
4.2.10 ชุดควบคุมความเร็วรอบของลีนปีกผีเสื้อ.....	46
4.2.11 หอทดลอง.....	46
4.3 วิธีการทดลอง.....	47
4.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคเซรัน	47
4.3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดพริก ไทยแบบผิวกลั่นที่มีการ ไหลเป็นจังหวะ.....	47
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
5.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาของหอทดลองแบบต่าง ๆ ที่ยังไม่ใส่ลีนปีกผีเสื้อ.....	49
5.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาของหอทดลองผิวกลั่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร โดยใส่ลีนปีกผีเสื้อ.....	62
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรเบื้องต้นที่ใช้คำนวณความเร็วค่าสุดท้ายที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน.....	28
ตารางที่ 3.2 ผลของวิธี Trial and Error เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศต่อพื้นที่.....	36
ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดความดันของขดลวดฮีตเตอร์.....	37
ตารางที่ 3.4 ผลสรุปของค่าที่ได้จากการคำนวณอุปกรณ์จากทฤษฎี.....	38
ก.1 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอระดมอากาศอุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	72
ก.2 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือของหอระดมอากาศอุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	73
ก.3 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือของหอระดมอากาศอุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	75
ก.4 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 30 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	77
ก.5 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 30 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	78
ก.6 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 30 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	79
ก.7 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 30 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	80
ก.8 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 45 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	81
ก.9 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 45 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	82
ก.10 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 45 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	83
ก.11 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 45 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	84
ก.12 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 60 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	85
ก.13 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 60 องศา ห่าง 2 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	86
ก.14 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 60 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	87
ก.15 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอผิวดกลั่น 60 องศา ห่าง 3 ชม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.16 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ห่าง 2 ชม. ตะแกรงเต็ม อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	89
ก.17 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ยอดคดห่าง 2 ชม. ตะแกรงเต็ม ระยะห่าง 2.5 ชม. อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	90
ก.18 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ลดขนาด ตะแกรงเต็ม ระยะห่าง 2.5 ชม. อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	91
ก.19 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ลดขนาด ใส่ลินปีกผีเสื้อ 1.1 <i>Umf</i> อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	92
ก.20 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ลดขนาด ใส่ลินปีกผีเสื้อ 1.3 <i>Umf</i> อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	93
ก.21 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ลดขนาด ใส่ลินปีกผีเสื้อ 1.8 <i>Umf</i> อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	94
ก.22 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดก 45 องศา ลดขนาด ใส่ลินปีกผีเสื้อ 2.0 <i>Umf</i> อุณหภูมิจนการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส.....	95
ข.1 ตารางคุณสมบัติของอากาศ.....	97
ค.1 บทความ.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไอเซน.....	12
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง.....	14
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลอคกับความเร็วอากาศ.....	15
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง.....	18
2.5 ความสัมพันธ์ของ C และ Re ที่ค่า B ต่างๆกัน.....	23
2.6 การสูญเสียความดันของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบต่าง ๆ.....	23
2.7 แสดงตำแหน่งความดันของชุดทดลอง.....	25
3.1 แบบจำลองการเรียงตัวของเม็ดคพริกไทย.....	28
4.1 เมล็ดคพริกไทยที่คัดแยกแล้ว พร้อมทั้งจะทดลอง.....	41
4.2 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ (Hot-Wire)	41
4.3 เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์.....	42
4.4 ชุดป้อนอากาศ (Blower)	42
4.5 ชุดควบคุมความเร็วรอบ (Inverter)	43
4.6 ชุดให้ความร้อน (Heater)	43
4.7 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน.....	44
4.8 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice).....	44
4.9 มาโนมิเตอร์ (Manometer).....	45
4.10 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก.....	45
4.11 ถังปิกมีเสื่อ.....	46
4.12 ชุดควบคุมความเร็วรอบของถังปิกมีเสื่อ.....	46
4.13 หอททดลอง.....	47
5.14 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเครื่องอบแห้งผิวดินที่มีการไหลเป็นจังหวะ.....	48
5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอพลูอิด ไคซ์เบคของหอธรรมดา ที่ความเร็วต่าง ๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 60°C.....	49
5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอพลูอิด ไคซ์เบคของหอธรรมดาที่ความเร็วต่าง ๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C.....	50
5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอพลูอิด ไคซ์เบคธรรมดาที่ความเร็วต่าง ๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 90°C.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 หอททดลอง ผิวคลื่น 30 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดันคั่นคอยู่ที่ผิวคลื่น.....	51
5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	52
5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C.....	52
5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 3 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	53
5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 3 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C.....	53
5.9 หอททดลอง ผิวคลื่น 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดันคั่นคอยู่ที่ผิวคลื่น.....	54
5.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 20 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	54
5.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 20 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C.....	55
5.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	55
5.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C.....	56
5.14 หอททดลองผิวคลื่น 60 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดันคั่นคอยู่ที่ผิวคลื่น.....	56
5.15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	57
5.16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 30 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C.....	57
5.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 กราฟแสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบผิวคลื่นระหว่างมุม 30,45 และ 60 องศา ตะแกรงติดอยู่ที่ผิวคลื่น โดยนำผลการทดลองที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบ.....	58
5.19 หอททดลองผิวคลื่น 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงเต็ม.....	59
5.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 20 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม.....	60
5.21 หอททดลองผิวคลื่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ผิวคลื่นเว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ตะแกรงเต็ม.....	60
5.21 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอททดลอง 20 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม.....	61
5.22 หอททดลองผิวคลื่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดลง คู่ละ 5 มิลลิเมตร ผิวคลื่นเว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ตะแกรงเต็ม.....	61
5.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองลดขนาดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดที่ละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม.....	62
5.24 แสดงชุดคลื่นปีกผีเสื้อ ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของลม โดยเป็นจังหวะ.....	63
5.25 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองลดขนาดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดที่ละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.1 <i>Umf</i> อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ไล่คลื่นปีกผีเสื้อ.....	63
5.26 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองลดขนาดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดที่ละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.3 <i>Umf</i> อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ไล่คลื่นปีกผีเสื้อ.....	64
5.27 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองลดขนาดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดที่ละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.8 <i>Umf</i> อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ไล่คลื่นปีกผีเสื้อ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ทรงกลม, เมตร ²
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน, เมตร ² /วินาที
d	มวลของวัตถุแห้ง (ไม่มีความร้อน), กิโลกรัม
d_p	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
d_p^*	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ
g	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม. ²
h_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัตถุ
K	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
K_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_1	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_2	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
L_{mf}	ความสูงค่าตุคของเบค, เมตร
M	ปริมาณความร้อน, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
M_{eq}	ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_{in}	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก
\bar{M}_t	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
MR	อัตราส่วนความชื้น
N_c	อัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
n	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
p	ความดันย่อยของไอในอากาศ
p_{wb}	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
Δp	ความดันต่างของเบค, นิวตัน/เมตร ²
Re_{mf}	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ ที่ความเร็วค่าตุคที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน
r	รัศมีทรงกลม, เมตร
SP	อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ
T	อุณหภูมิอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอตกลง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชัน, เมตร/วินาที
u_i	ความเร็วคกอิสระของของแข็ง
u_i^*	ความเร็วคกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มติ
V	ปริมาตรทรงกลม, เมตร ³
w	มวลของวัสดุ, กิโลกรัม
ε_m	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไคเซชัน
ϕ_s	ค่าความเป็นทรงกลม
λ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
μ	ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
ρ_g	ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร ³
ρ_p	ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร ³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดของการวิจัย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งกรรมวิธีที่ทำให้การอบแห้งประหยัดที่สุด คือจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะพิเศษและ โครงสร้างของเครื่องอบแห้งรวมทั้งมีการเลือกใช้อุปกรณ์และสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมด้วย ซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นนี้ออกไปโดยระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับความร้อนแฝงของการระเหยความร้อนดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายเทไปยังวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากหลักการเดียวกันดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีการพัฒนามาจากเครื่องอบแห้งในปัจจุบัน ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ใช้กันอยู่นั้น การไล่ความชื้นออกจากวัสดุจะทำได้เร็วในช่วงเริ่มแรกของการอบ คือความชื้นที่บริเวณผิวของวัสดุจะระเหยได้เร็ว แต่หลังจากนั้นการระเหยของความชื้นจะล่าช้า เพราะความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุจะค่อยๆ แพร่ออกมาถึงผิวของวัสดุอย่างช้าๆ ทำให้ช่วงเวลาของการอบช่วงนี้ยาวนานกว่าในช่วงแรก จากปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดแนวความคิดของงานวิจัยของการอบแห้ง เพื่อดึงความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุออกมาสู่ผิวของวัสดุให้เร็วที่สุด เพื่อลดระยะเวลาของการอบแห้งลง แต่ยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการใส่ชุดควบคุมความเร็วลมด้วยลิ้นปีกผีเสื้อที่ตรงบริเวณทางเข้าหอบอย่าง เป็นจังหวะ

ในการศึกษาการอบแห้งมักจะมีการจำลองเครื่องมือการอบแห้ง ซึ่งมีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงและกำหนดสภาวะการทำงานให้ได้สภาวะเดียวกันกับการทำงานจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืชให้มีคุณภาพ และประสิทธิภาพในการอบแห้งดีที่สุด

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ ในการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ลักษณะที่เป็นรูปทรงกลม เช่น เมล็ดพริกไทย

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.2.4 เพื่อศึกษาความถี่ของลิ้นปีกผีเสื้อที่มีผลต่อการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการอบแห้งเมล็ดคพริกไทย โดยการควบคุมความเร็วรอบของลีนปิกพีเสื่อ เฉพาะวิธีการทดลอง

1.3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์เมล็ดคพริกไทยที่ต้องการอบแห้งครั้งละ 200 กรัม

1.3.3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียสและใช้ความเร็วในการทดลองของแต่ละหอตทดลองที่ 1.1Umf, 1.3Umf, 1.8Umf และ 2.0Umf

1.3.4 ในการทดลองของห่อที่มีแผ่นขยายทำมุม 45 องศา จะมีการทดลองห่อละ 2 แบบด้วยกัน โดยจะให้มุมของแผ่นขยายมีระยะห่างตั้งแต่ 3 เซนติเมตร และ 2 เซนติเมตร

1.3.5 การควบคุมการไหลของอากาศโดยใช้ลีนปิกพีเสื่อและควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบได้

1.3.6 ใช้เวลาในการอบแห้งของแต่ละหอตทดลองเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทุก ๆ 5 นาที จะนำมาชั่งโดยในการชั่งแต่ละครั้งไม่เกิน 10 วินาที

1.3.7 นำผลข้อมูลจากการทดลองของหอตทดลองแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่คงเหลือในเมล็ดคพริกไทย

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

1.4.1 วิธีการใหม่ที่สามารถอบแห้งได้รวดเร็ว

1.4.2 วิธีการใหม่สามารถนำไปใช้อบแห้งวัสดุที่มีรูปร่างทรงกลม และรูปร่างทรงเรขาคณิต แทนวิธีการอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบคที่สามารถอบแห้งวัสดุที่มีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลม

1.5 เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.1 เครื่องวัดความเร็วอากาศแบบลวดร้อน (Hot-Wire) สำหรับวัดความเร็วอากาศ

1.5.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

1.5.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลชนิด มีความละเอียด ทศนิยมสี่ตำแหน่ง

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างหตุทดลอง

1.6.1 พัดลมอัดอากาศ

1.6.2 ชุดท่ออากาศอัดภายในบรรจุสวิตเตอร์

1.6.3 ชุดท่อสำหรับควบคุมความเร็วอากาศภายในบรรจุตัวควบคุมแบบลีนปิกพีเสื่อ(Damper)

1.6.4 ชุดวงจรไฟฟ้าควบคุมความเร็วของลีนปิกพีเสื่อ

1.6.5 ชุดเบคทดลองสำหรับใส่เมล็ดคพริกไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6.6 เทอร์โมสแตท
- 1.6.7 เทอร์โมคัปเปิล
- 1.6.8 ตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้า

1.7 งานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคฟลูอิดไอเซนซ์

Suksankraisorn, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์ ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไอซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์ที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซนซ์ที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซนซ์ มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์จากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

Mawatari, Tatemoto and Noda (2003) ได้หาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์สำหรับชุดการทดลองฟลูอิดไอซ์เบดร่วมกับการสั่น ซึ่งใช้กลุ่มของอนุภาค Geldart A และ C โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการของ Ergun ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซนซ์โดยการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับ Geldart A แต่ Geldart C มีค่าแตกต่างกันเพราะอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อน

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อนันต์ พงษ์ธรกุลพานิช (2539) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวโพดที่ความชื้นสูง และช่วงอุณหภูมิสูงด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซนซ์ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิทางเข้าหอตลอด และอัตราการไหลจำเพาะ มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี ได้แก่ สมการของ Wang-Singh, Page และสมการของ Lewis มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า สมการของ Wang-Singh สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย (2540) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไอเซนซ์ โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอุณหภูมิในการอบแห้ง 110-140 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7-33.3 มาตรฐานแห้ง ความสูงเบด 10-15 cm และความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการอบแห้ง 2.4-4.1 m/s จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง และอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ และพบว่า Page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

ฉัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ ไสภณรณฤทธิ และ อภิชาติ เทอดโยธิน (2542) พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิด ไคซ์เบค โดยใช้สมการการอบแห้งทางทฤษฎี โดยพิจารณารูปทรงข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอกสั้น และใช้แบบจำลองสมการของ Arrhenius พบว่าสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ตลอดช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิของอากาศในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมากกว่าความชื้นของข้าวเปลือก

Soponronnarit, Kittiporn and Prachayawarakorn (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่องอบแห้งฟลูอิด ไคซ์เบคแบบต่อเนื่อง และนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ บนพื้นฐานของพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดอยู่ระหว่าง 19-40% มาตรฐานแห้ง และอบแห้งภายใต้อุณหภูมิอากาศ 130-175 องศาเซลเซียส ความสูงของเบค 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 รูปร่าง (แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกระบอกผ่าครึ่ง และพีรามิด) และสามขนาด (10, 15 และ 20 mm) ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยวิธีฟลูอิด ไคซ์เบคต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลยอนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.08×10^{-9} ถึง $3.32 \times 10^{-9} m^2/s$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 4.09×10^{-10} ถึง $1.18 \times 10^{-9} m^2/s$ และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.43×10^{-9} ถึง $3.75 \times 10^{-9} m^2/s$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 7.55×10^{-10} ถึง $1.40 \times 10^{-9} m^2/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำๆ และความยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane and Singh (1999) ทำการทดลองในเครื่องอบแห้งชนิดถาดในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งหัวหอมแบบแผ่น 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 สติธิประภาพร (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 แต่สีของพริกจะคล้ำมากขึ้นและไม่สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่ดี

Syahrul, Hamdullahpur and Dincer (2002) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิด ไคซ์เบคของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลอง ประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบคลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความร้อนจากวัตถุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัตถุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

Srivastava and John (2002) ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งเมล็ดธัญพืช โดยใช้สมการ Simi-empirical ของชั้นบางสำหรับทำนายความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเบคนึ่งของธัญพืช อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ และช่องว่างภายในเบค ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบคเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบคมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดพืช

Akpinar, Midilli and Bicer (2003) ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งแผ่นมันฝรั่งแบบชั้นบาง ในเครื่องอบแห้งไซโคลน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการอบแห้งของชั้นบางในงานวิจัยก่อนหน้านี้จำนวน 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 สมการให้ผลสอดคล้องดีกับผลการทดลอง

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 ซึ่งพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ 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 ของอนุภาคทั้งสามรูปทรงคือ แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก และทรงกลม ที่ได้จากมันฝรั่ง 3 ขนาดในอัตราส่วนด้านต่อความยาว 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และจากการตัดเมล็ดหัวเขียวในอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอก และเมล็ดถั่วสำหรับทรงกลม ตามลำดับ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 15% และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ Exponential model ($MR = \exp(-kt)$) และ Page model ($MR = \exp(-kt^n)$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลเพียงเล็กน้อยกับขนาดของอนุภาคเมื่อความชื้นถูกพิจารณาในสามมิติ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

Hatamipour and Mowla (2003) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ การหดเหี่ยว ความหนาแน่น และการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเขียว ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไคเซชัน งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของวัสดุ ขนาด และการแพร่ของมวลซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น พบว่าอุณหภูมิของอากาศ และความเร็วของอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การหดเหี่ยวและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันเพียงสองอย่างของปริมาณความชื้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น

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

วรเมธ ทัดทอง (2546) ได้ทำการศึกษาตัวแปรของกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด ทำการทดลองโดยใช้ห่ออะคลิลิกใส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร ความสูง 1000 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิที่ทางเข้าของห่อทดลองอยู่ในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเฉพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 0.43 kg/s-kg dry coffee ความชื้นเริ่มต้น 18% มาตรฐานเปียก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Newton และ Page ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นตาม และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงสู่ 14% มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 5 ชั่วโมง และสรุปได้ว่าอัตราการไหลของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

กิตติชัย พาวขุนทด สุวิทย์ สุวรรณรุ่งโรจน์ และ เอกรินทร์ จินดาพิ (2547) ได้ทำการศึกษาและทำการทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบค โดยการติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไป วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดพริกไทย ผิวคลื่นที่เพิ่มเข้าไปจะมีลักษณะเป็นกรวยที่มีรูขนาด 1/3 ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอททดลอง สูง 85 เซนติเมตร วางสลับกันเป็นลูกคลื่นหลาย ๆ ลูกคลื่นต่อกัน ในการทดลองใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 100 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศร้อนภายในหอบอบมีค่า 1.0 Umf , 1.2 Umf และ 1.4 Umf ผลการทดลองพบว่าเมื่อติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไปจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในหอททดลองมากขึ้น ทำให้การอบแห้งเร็วกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบคแบบธรรมดาถึง 30%

พงษ์ศักดิ์ หมทอง สกล ผลิกระ โทก และ สยาม เป็น (2547) ได้ทำการประยุกต์การใช้เทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบคแบบผิวคลื่นสำหรับอบเมล็ดกาแฟ โดยใช้หอททดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 เมตร สูง 1 เมตร ทดลองโดยแบ่งลักษณะภายในหอบอบออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้ หอบอบแบบธรรมดา หอบอบแบบผิวคลื่น หอบอบแบบวงแหวน และหอบอบแบบผิวคลื่นวงแหวน โดยการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเฉพาะของอากาศและความเร็วลมที่ทางเข้าหอบอบ 4 ถึง 6 m/s จากการทดลองสรุปได้ว่าหอบอบแบบผิวคลื่นสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าหอบอบลักษณะอื่น ๆ คือสามารถลดความชื้นของเมล็ดกาแฟจาก 66% เหลือเพียง 14% และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมากที่สุดก็คืออุณหภูมิ

ขจรศักดิ์ เพ็ญจันทร์ ชัชวาลย์ ทองประภา และ ชานนท์ พงศ์ชัยประสิทธิ์ ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวโพดชนิดฟลูอิด ไคซ์เบค โดยใช้เทคนิคลมหมุนควงมาใช้ในการอบอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนเป็นเทอร์โบ หอททดลองทำจากอะคริลิกใส ภายในหอททดลองจะมีกรวยที่ทำด้วยสังกะสีทำมุม 60 และ 70 องศา กับขอบของตัวเทอร์โบ โดยการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80 % มวล 300 กรัม ใช้อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกผลทุกๆ 10 นาที ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงความเร็วลมและอุณหภูมิมิทธิพลต่อการลดความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิสูงจะทำการอบแห้งได้เร็วกว่าความเร็วและอุณหภูมิต่ำ และพบว่ากรวยที่ทำมุมกับขอบของเทอร์โบที่ 60 องศา ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีที่สุด

สมยศ ภู่วัฒนกิจ และชวลิต จิตรเที่ยง (2549) ได้ทำการศึกษาและออกแบบการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน(หอล่อง) และแบบที่การขยายหลายช่วง ที่ความชื้นเริ่มต้น 75% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 80 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67-70% มวลเมล็ดพริกไทยที่ใช้ในการอบแห้ง 200 กรัม สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ การอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซชัน(หอล่อง)ความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งเพราะที่ความเร็ว $1.2U_{mf}$ สังเกตในขณะที่ทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอททดลองจะไม่มีการยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่กับที่ ส่วนที่ความเร็ว $2.0U_{mf}$ จะมีการยับของเมล็ดบ้างแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ไม่ยับอยู่ ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจากหอททดลองอย่างรวดเร็ว โดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูปแบบอื่น ๆ การอบแห้งเมล็ดพริกไทยฟลูอิดไคเซชันแบบที่มีการขยายหลายช่วงที่อุณหภูมิเดียวกัน ความเร็วลมในหอททดลองมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คือ เมื่อเพิ่มความเร็วลมในหอททดลองจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น และการเปลี่ยนแผ่นขยายมุมของหอททดลองมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยจากการทดลองที่มุมของแผ่นขยายมุมของหอททดลอง 30 จะพบว่าที่อุณหภูมิและความเร็วในหอททดลองเดียวกัน จะให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งดีกว่าหอล่อง

จากการศึกษาบทความดังกล่าวข้างต้นพอสรุปได้ว่าลักษณะการไหลของอากาศ ความเร็วลม และอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งเมล็ดพืช แต่ยังมีอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการอบแห้ง นั่นก็คือความถี่ของการสั่นของเมล็ดพืช แต่เนื่องจากความเร็วและอุณหภูมิเราสามารถควบคุมได้ว่าให้มากหรือน้อย เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบลักษณะการไหลของอากาศ โดยมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้มีการเปิด-ปิดเป็นจังหวะ ที่ตรงบริเวณทางเข้าหอท เพื่อสังเกตหาความถี่ที่เหมาะสมของการอบเมล็ดพืชนั้นๆ และที่ได้กล่าวมาข้างต้นของงานวิจัยต่างๆ จะใช้หอททดลองแบบทรงกลม ดังนั้นการวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบโดยจะเป็นหอททดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และจะทำการใส่ลิ้นปีกผีเสื้อที่มีการควบคุมการเปิด-ปิดโดยใช้มอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ และจะใช้แผ่นกระจายดิวที่ด้านล่างของหอททดลอง เพื่อให้อากาศร้อนได้กระจายเต็มทั่วทั้งหอททดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีฟลูอิดไลเซชัน

ฟลูอิดไลเซชัน เป็นกระบวนการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดเล็ก หรือชิ้นสัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และมีพฤติกรรมคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับ แล้วทำให้ของไหลไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยขึ้นอย่างเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไลซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไลเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.1 ประเภทของฟลูอิดไลเซชัน

ฟลูอิดไลเซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ฟลูอิดไลเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่า ในหอตกลงหรือในเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไลเซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ ก๊าซฟลูอิดไลเซชัน (Gas Fluidization) และฟลูอิดไลเซชันเหลว (Liquid Fluidization)

2. ฟลูอิดไลเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่า ภายในหอตกลงหรือในเบดจะประกอบด้วยสามสถานะรวมอยู่ร่วมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับฟลูอิดไลเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไลเซชันสองสถานะ

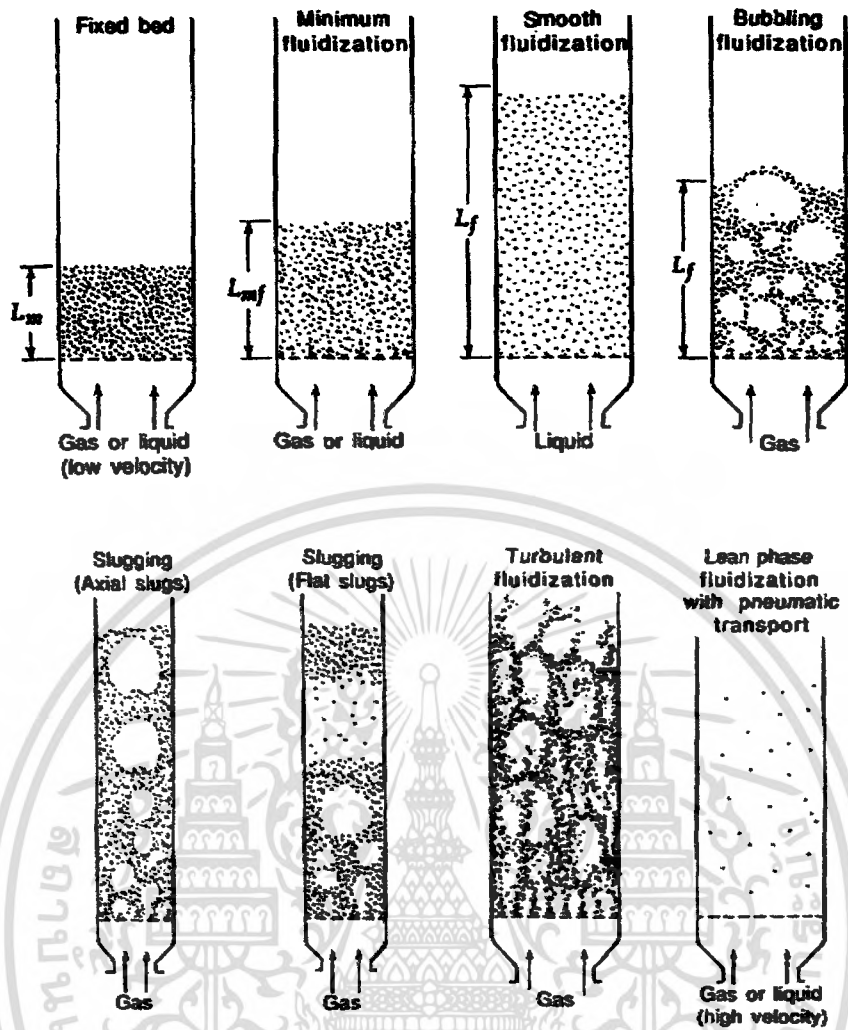
2.1.2 ลักษณะของฟลูอิดไลซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตกลงที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหว ด้วยของไหลในหอตกลงจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะ ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอตกลง

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตกลงเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตกลงอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงระดับความเร็วหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุด

เริ่มฟลูอิดไลเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบคให้เบคขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบคลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์เบคแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว ลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์เบคเจือจาง (Diluted-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอตลอดไป

ฟลูอิดไลซ์เบคที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบค เป็นไปอย่างสม่ำเสมอการลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไป อย่างช้า ๆ เราเรียกเบคนี้ว่าเบคสม่ำเสมอ หรือเบคที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูป 2.1 (b) ฟลูอิดไลซ์เบคที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบคจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไลซ์เบคแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบคและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตาม ภายในเบคจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มวนวุ่นวายเบคชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิดไลซ์เบควุ่นวาย ดังรูป 2.1 (d)



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิด ไคเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

จากคุณสมบัติที่ของแข็งในเบดทำหน้าที่คล้ายกับของเหลวนี้ จึงมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมอย่างมหาศาล ที่สามารถนำเอาเทคนิคนี้ไปใช้ทำงานในระบบต่อเนื่อง (Continue process) ได้ตั้งในหอคอลงที่มีหลายหลายชั้น เม็ดของแข็งจากชั้นบนจะไหลลงมายังชั้นล่างและไหลออกนอกหอคอลงในที่สุด ในลักษณะเช่นนี้เหมือนในหอกถัน หรือใช้ป้อนของแข็งเข้าทางซ้าย แล้วให้ออกมาทางขวาของหอคอลง ในขณะที่ผ่านเบดออกมามีข้อมดิ่งมีการเปลี่ยนแปลงบางส่วนอย่างแน่นอน ดังอย่างเช่นการตากแห้งเม็ดธัญญาหาร หรือเม็ดผลไม้ต่าง ๆ เช่น ถั่ว งา เม็ดข้าวโพด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กอศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไอเซนซ์

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไอเซนซ์มักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะก่อนที่เม็ลล์ของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไอเซนซ์ เม็ลล์ของแข็งจะพักอยู่บนระแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบค ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบค ดังรายละเอียดต่อไปนี้

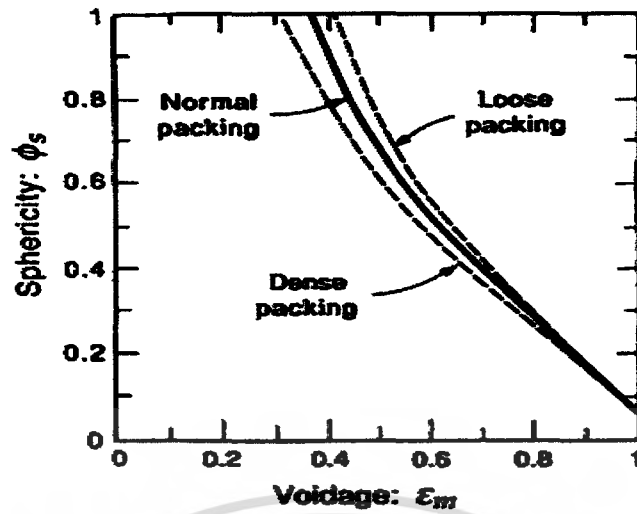
2.2.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ลล์ทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ลล์ของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ลล์ของแข็งใดๆ โดยที่เม็ลล์ของแข็งเป็นทรงกลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\phi_s = 1$) และถ้าเม็ลล์ของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi_s < 1$) เสมอ ซึ่งค่าความเป็นทรงกลมที่ทำการทดลองของเม็ลล์พริกไทยมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากจึงสมมติให้เป็นหนึ่ง

2.2.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ϵ_m)

กรณีที่เม็ลล์ของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่างระหว่างเม็ลล์ทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ลล์ทรงกลมในเบคทำให้เกิดขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ลล์ของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.2

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซนซ์ ช่องว่างในเบคจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่า สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไอเซนซ์เบค (ϵ_{mf})



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง [Kunii, D. Levenspiel, O. 1991]

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบคแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

$$\epsilon_{mf} = \left(\frac{0.071}{\phi_s} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

2.2.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \quad (2.2)$$

โดยการประยุกต์สมการ (3.2) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.3)$$

โดยที่

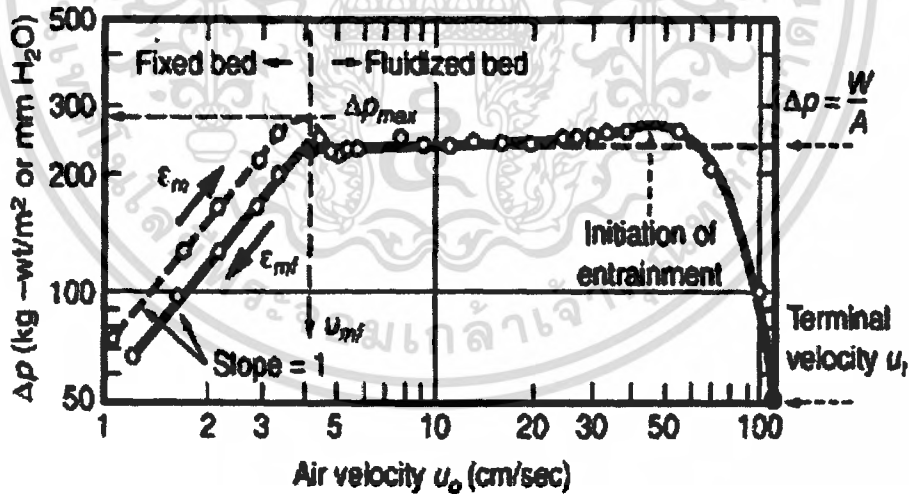
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (2.4)$$

- เมื่อ Re_{mf} คือ เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน
- d_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
- g คือ อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม.²
- L_{mf} คือ ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
- Δp คือ ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร²
- u_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน, เมตร/วินาที
- μ คือ ความหนืดของของไหล, กิโลกรัม-เมตร/วินาที
- ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, กิโลกรัม/เมตร³
- ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัม/เมตร³

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันสามารถหาได้อีกวิธีการหนึ่ง คือจากการทดลอง โดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u ,

ในฟลูอิดโคเซชันนั้นมีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดโคเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอคอย ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็ง Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดังสมการ

$$u_i^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi_s}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

เมื่อ d_p^* คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ โดยที่ $0.5 < \phi_s < 1$ และ

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.6)$$

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

$$u_i = u_i^* \left[\frac{\mu (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.7)$$

เมื่อ u_i^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

2.3 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ

2.3.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate drying Period)

จากรูปที่ 2.4 ในช่วง A ถึง B ศิววิสดุจะมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำที่ผิวต่ำกว่าการแพร่ของความชื้นภายในวัสดุมาซึ่งผิวของวัสดุ จึงส่งผลให้อุณหภูมิของผิววัสดุมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ T_{wb} และความเข้มข้นของน้ำที่ผิววัสดุคงที่ ดังนั้นอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้ง ถ้า p_{wb} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, p คือ ความดันย่อยของไอในอากาศ และ K_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังนั้นค่าอัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุ N_c ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่กำหนดโดยสมการ

$$N_c = K_p (p_{wb} - p) \tag{2.8}$$

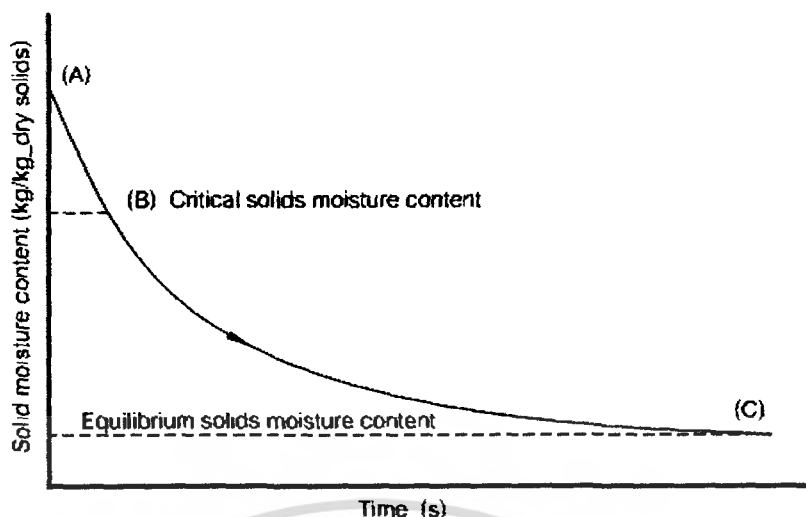
เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.8 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$N_c = \frac{h_p}{\lambda} (T - T_{wb}) \tag{2.9}$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ

λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

T คือ อุณหภูมิอากาศ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง

[Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985]

2.3.2 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 เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัสดุถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุส่วนหนึ่ง จึงมีความร้อนเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ใช้ในการระเหยน้ำ อัตราการอบแห้งจึงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความชื้นค่าหนึ่งแล้วความชื้นก็จะไม่ลดลงอีก เรียกว่า ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ดังรูปที่ 3.4 ที่จุด C โดยทั่วไปการอบแห้งเมล็ดพืชจะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น มีสมการอบแห้งหลายรูปแบบทั้ง สมการทางทฤษฎี สมการกึ่งทฤษฎี และสมการเอมไพริคัลซึ่งได้จากการทดลอง ที่พยายามทำนายในช่วงความชื้นลดลง

2.4 นิยามความชื้นในวัสดุ สมชาติ โสภณธฤทธิ์ (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (2.10)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมนำใช้ในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

$$M_d = \frac{w-d}{d} \quad (2.11)$$

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, กิโลกรัม

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), กิโลกรัม

ความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลง ส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

2.5 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

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

2.6 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุที่มีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับ ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.7 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบ

การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ ความชื้นและการหดตัวของเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้งซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าวหรือแตกหักในเมล็ดพืช คุณภาพทางเคมีในเมล็ดพืชบางชนิด ได้แก่ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ความสามารถในการแยกแป้ง และคุณค่าทางอาหารเป็นต้น ส่วนคุณภาพทางชีวภาพได้แก่ความสามารถในการงอกของเมล็ดพืช

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ

การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัวเมื่อโชนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด ซึ่งขั้นตอนต่อไปหลังการอบแห้งของเมล็ดพืชคือการสีเพื่อเอาเปลือกออก และผลกระทบอีกอย่างคือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเมล็ดค้ำในเปลือกจะแห้งติดกับเปลือกทำให้ขั้นตอนการสีนั้นยาก

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดพืชจะพิจารณาถึงสีของเมล็ดค้ำด้านในเปลือกว่าจะต้องไม่เป็นสีดำ และเมล็ดค้ำในไม่เกาะติดกับเปลือก ซึ่งเป็นคุณภาพสำคัญในขั้นตอนการสี ซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยเมล็ดค้ำด้านในเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งเริ่มจะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม และเมล็ดค้ำในยังไม่เกาะติดกับเปลือก

2.8 ก๊าซฟลูอิดไคเซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิด ไคเซชันที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบค ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบค ในขณะที่เบคเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิด ไคเซชันใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบคที่เกิดในฟลูอิด ไคเซชันของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนดุงอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 Channelling คือ เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

2.8.2 Bubbling คือ อนุภาคของแข็งในฟลูอิด ไคซ์เบคจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบค แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือ ไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนี้ว่า Bubbling

2.8.3 Slugging คือ การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอทดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

2.8.4 Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

2.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอทดลองฟลูอิด ไคซ์เบค, u_0

การหาความเร็วของอากาศในหอทดลองฟลูอิด ไคซ์เบค ที่ทำให้อนุภาคภายในหอทดลองสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอทดลอง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคซ์เบค แต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคซ์เบค (Soponronnarit และ คณะ, 1995)

$$u_0 = 1.3u_{mf} \quad (2.12)$$

2.10 ฟลูอิด ไคซ์เบค ความเร็วของไหลต่ำสุด

หมายถึง ฟลูอิด ไคซ์เบค ในช่วงความเร็วของไหลแคบมาก ๆ คือ ช่วงระหว่างความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด ไคซ์เบค และความเร็วที่สูงกว่าเล็กน้อย ลักษณะของเบคที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบค (Uniform and Homogeneous) ผิวหน้าของเบคราบเรียบไม่ขรุขระของไหลนั้นจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ เม็ดของแข็งเริ่มลอยอยู่ในกระแสน้ำของไหลระยะห่างระหว่างเม็ดน้อยมาก เม็ดค่อมืดเกือบติดกัน การเคลื่อนไหวก็น้อยมาก เพราะอยู่ในวงจำกัด ในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลอง มักใช้ความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดอย่างน้อย 1.5 เท่า

2.11 การหาความเร็วลมโดยใช้ออริฟิซ (Orifice)

จากสมการ Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.11)$$

ในกรณีนี้ของไหลที่ต้องการวัดคืออากาศ ซึ่งสามารถอัดตัวได้ ทำให้ $P_1 \neq P_2$ จึงต้องกำหนดตัวประกอบอีกตัวหนึ่งคือ ตัวประกอบการขยาย (Expansion factor, Y) เข้ามาแก้ด้วย

สำหรับออริฟิสมุมฉากที่ใช้ในการทดลอง ค่า Y หาได้จาก

$$Y = 1 - \left[0.41 + 0.35 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \left[\frac{(P_2 - P_1)}{kP_1} \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ k = ความจุความร้อนจำเพาะเมื่อความดันคงที่ / ความจุความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่

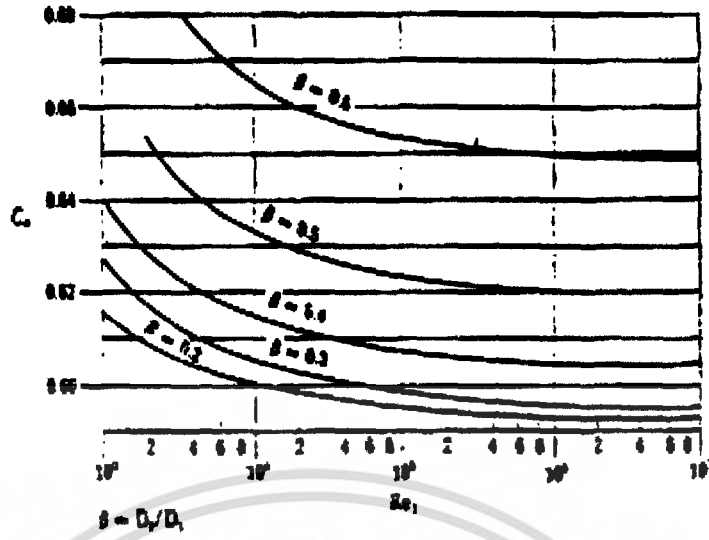
จากสมการ Conservation Of Mass

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2.13)$$

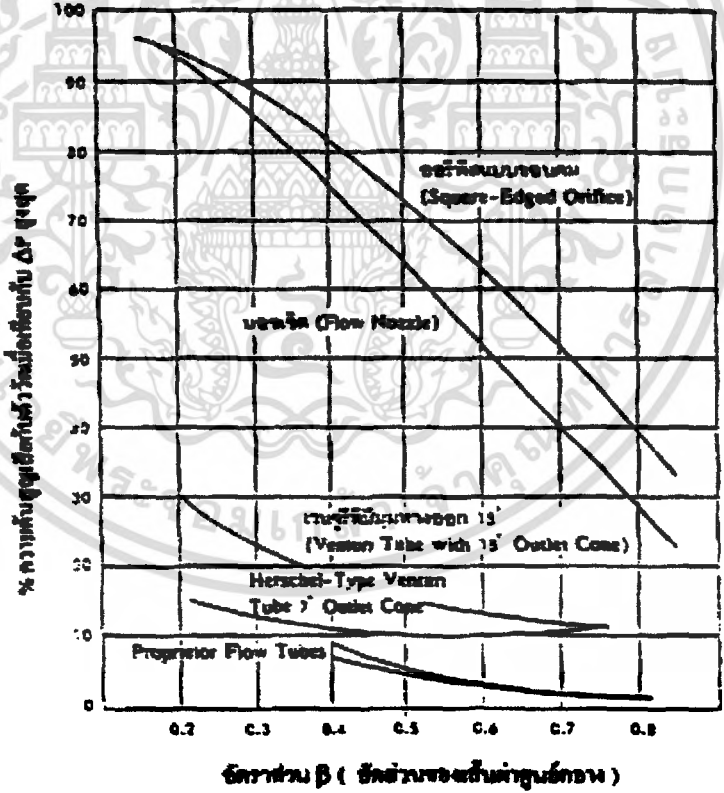
เนื่องจาก $A_1 / A_2 = D_2^2 / D_1^2$ และ $Z_1 = Z_2$ ดังนั้น

$$Q = A_2 \cdot Y \sqrt{\frac{2[(P_2 - P_1)/\rho]}{1 - (D_2^4/D_1^4)}} \quad (2.14)$$

ผลที่ได้จากสมการ (2.14) เป็นค่า Q ที่ได้จากทฤษฎีเท่านั้นในทางปฏิบัติแล้วค่า Q ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า Q ในทางทฤษฎี ดังนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่งมาคูณเพื่อให้ได้ค่า Q ที่แท้จริง สัมประสิทธิ์ตัวนี้ได้จากการทดลองเรียกว่า Coefficient of Discharge (C_d) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Reynolde Number (R_v) และค่า β โดยแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งค่า β กำหนดจากผลต่างของความดันสูงสุด (ΔP) ที่ต้องการ เมื่ออัตราการไหลในระบบสูงสุด 100 inH₂O แล้วคำนวณย้อนกลับมาหาค่า β โดยแสดงดังรูป 2.6



รูป 2.5 ความสัมพันธ์ของ C และ Re ที่ค่า β ต่างๆกัน



รูป 2.6 การสูญเสียความดันของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่า } Re = \frac{V_1 D_1}{\nu} = \frac{4Q_{th}}{\pi D_1 \nu} \quad (2.15)$$

เมื่อ ν คือ ค่าความหนืดของอากาศ m^2/s
 จะได้อัตราไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจริง (Q_{ac})

$$Q_{ac} = A_2 \cdot C_0 \cdot Y \sqrt{\frac{2[(P_1 - P_2)/\rho]}{1 - (D_2^4/D_1^4)}} \quad (2.16)$$

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

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

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

A_2 = พื้นที่ตัดของออริฟิส, m^2

A_1 = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

D_2 = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของออริฟิส, m

D_1 = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, m

เพราะฉะนั้น ความเร็วลมในท่อที่เกิดขึ้นจริง (V_{ac})

$$V_{ac} = Q_{ac}/A \quad (2.17)$$

2.12 การคำนวณหากำลังและขนาดของพัดลมอัดอากาศ

กำลังของพัดลมอัดอากาศมีความสำคัญต่อสะเป้าเตี๊ยะเบค เนื่องจากเม็คของแข็งที่อยู่ในเบค จะไม่สามารถลอยตัวในลักษณะ หรือสถานะของฟลูอิดโคเซชัน ได้ถ้ากำลังของพัดลมอัดอากาศมีขนาดกำลังน้อยกว่าความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน กำลังของพัดลมอัดอากาศคำนวณได้จากความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน จากหัวข้อ 2.2 และเทอมความดันลด (ΔP) ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆใน สะเป้าเตี๊ยะเบค ดังแสดงในไว้ภาพที่ 2.3

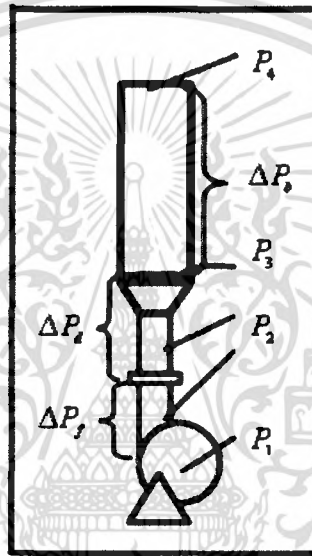
แนวความคิดของสมการสำหรับหาความดันตกคร่อมเบค มาจากการวิเคราะห์เม็คของแข็งที่ลอยตัวเป็นอิสระในเบค หรืออาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าเม็คของแข็งเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่กระทำต่อเม็คของแข็ง โดยมาจากเทอมของแรงยกตัวของของไหลที่พยายามให้เม็คของแข็งเคลื่อนที่ขึ้น และเทอมของน้ำหนักของเม็คของแข็ง[4] ดังนี้

$$(\text{drag force by upward moving gas}) = (\text{weight of particles}) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปลี่ยนเทอมแรกทางด้านขวามือ เป็นความดันลดในพื้นที่ตัดขวางของเบดและเทอมที่สองเป็นพื้นที่ตัดขวางของเบด ส่วนเทอมแรกทางด้านซ้ายมือ สามารถเปลี่ยนสมการเป็นเทอมของปริมาตร เทอมของตัวประกอบของเม็ดของแข็งและค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดของแข็งตามลำดับดังนี้[4]

$$\begin{aligned} (\text{pressure drop} * (\text{cross-sectional} = (\text{volume} * (\text{fraction} * (\text{specific} & (2.19) \\ \text{across bed) area of tube) of bed) consisting weight} & \\ \text{of solids) of solid) & \end{aligned}$$



รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งความดันของชุดทดลอง[12]

แทนค่าของตัวแปรของสัดส่วนช่องว่างต่ำสุด และค่าความหนาแน่นของของแข็งและของอากาศในสมการ (2-8) [4] จะได้

$$\Delta P_b A_t = A_t L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \left[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (2.20)$$

สามารถตัดตัวแปรของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด (A_t) ออกจากสมการ(2.20) ทั้งสองข้าง เนื่องจากมีขนาดทางเข้าและทางออกเท่ากันจะได้ $\Delta P_b = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \left[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right]$ และเมื่อพิจารณาความดัน P_3 และ P_4 ดังภาพที่ 2.7 จะได้

$$P_3 - P_4 = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad \text{เมื่อ } g = g_c \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสมการที่ (2.21) เป็นสมการสำหรับใช้หาความดัน P_3 โดยมีความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (L_{mf}) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความดันที่ตำแหน่งทางเข้าเบค (P_3) สามารถคำนวณได้จาก

$$L_{mf} = \frac{(1-\varepsilon)L_0}{(1-\varepsilon_{mf})} \quad (2.22)$$

เมื่อคำนวณความดันที่ทางออกตะแกรงหรือทางเข้าของเบค ณ ตำแหน่ง (P_3) จากสมการ

(2-21) สามารถหาความดันที่ตำแหน่งของท่ออากาศอัด (P_2) โดย AGARWAL และคณะ [4] ได้ให้ความเห็นว่าความดันที่ตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ (ΔP_d) ที่ดีไม่ควรมีความเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ของความดันทั้งหมดที่ตกคร่อมเบค (ΔP_b) จึงเขียนสมการเพื่อหา (P_2) ได้ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b = P_2 - P_3 \quad (2.23)$$

ความดัน P_2 สามารถเขียนรูปใหม่ดังนี้

$$P_2 = 0.1 \Delta P_b + P_3 \quad (2.24)$$

การหาค่ากำลังสำหรับเลือกพัดลมอัดอากาศที่ใช้กับสะเป้าเตี๊ยะเบค [10] ได้จากความดันตกคร่อมพัดลมอัดอากาศ $\Delta P_f = P_2 - P_1$ โดยที่ความดัน $P_1 = P_{atm}$ และอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าเบค $Q_2 = U_{mf} A_f$ จะได้

$$W_f = Q_2 \Delta P_f \quad (2.25)$$

บทที่ 3

ทฤษฎีการออกแบบเครื่องอบแห้งผิวดินที่มีการไหลเป็นจังหวะ

3.1 การออกแบบเครื่องมือทดลอง

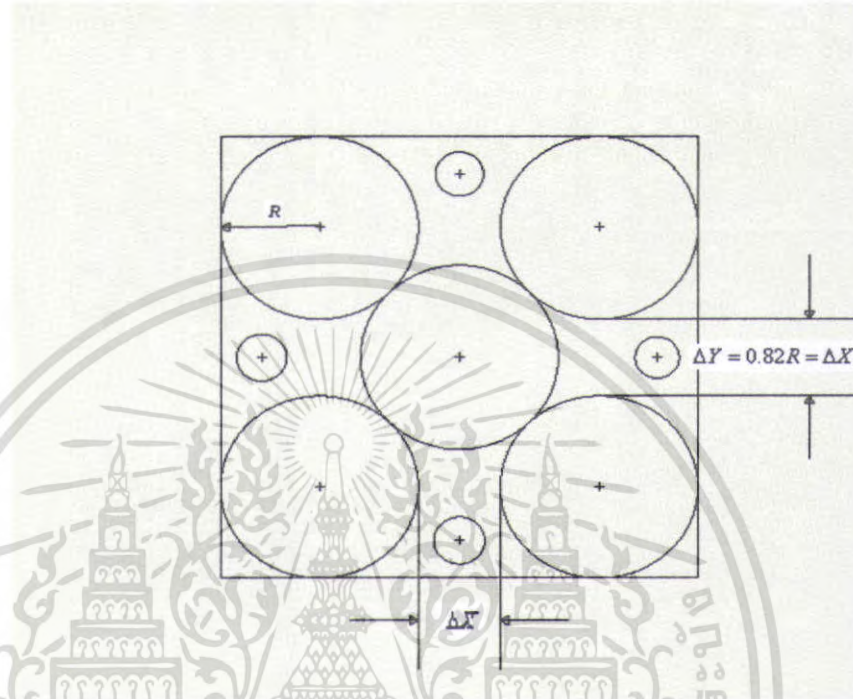
อุปกรณ์ทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบคแบบลมหมุนเปิด-ปิดเป็นจังหวะด้วย ลีนปีกผีเสื้อ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 80×200 มิลลิเมตร ลีนปีกผีเสื้อขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว มอเตอร์ควบคุมความเร็วรอบของลีนปีกผีเสื้อ ใช้คลาวด์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้ง พัดลมที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งมี รายละเอียดในการคำนวณดังนี้

3.1.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

- ความสูงของชั้นเมล็ดพริกไทย (L_p) 0.115 cm
- เส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ดพริกไทย (d_p) 4 mm
- ค่าแฟกเตอร์รูปร่าง (ϕ_p) 1.0
- อุณหภูมิอากาศร้อน 80°C
- ความหนืดของอากาศ (μ_A) = 2.24×10^{-5} kg/m.s
- ความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทยขึ้นก่อนอบแห้ง (ρ_p) 1400 kg/m³
- ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_A) 0.91 kg/m³
- อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม 30°C
- อัตราการไหลของอากาศ 0.0785 m³/s
- ขนาดของหอตทดลอง 8×20 cm

3.2 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของเมล็ดพริกไทย (ε)

สมมติให้เมล็ดพริกไทยเป็นทรงกลม ($\phi_p = 1$) คำนวณลักษณะการจัดเรียงตัวของเมล็ดพริกไทยในภาชนะบรรจุเป็นดังรูป 3.1



รูป 3.1 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของเมล็ดพริกไทย

สำหรับรูปที่แสดงนั้นเป็นระนาบ XY จากรูปจะได้ $X = 4R + 0.82R = Y$ ส่วนระนาบ XZ และ YZ ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน นั่นก็คือ $\Delta Z = 0.82R$ และ $Z = 4R + 0.82R$

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

$$\text{ปริมาตรทั้งหมดของเมล็ดพริกไทย} = 14 \times \frac{4}{3} \times \pi \times R^3$$

$$= 14 \times \frac{4}{3} \times \pi \times (2)^3$$

$$= 469.1445 \text{ mm}^3$$

ปริมาตรของภาชนะบรรจุ

$$= X \times Y \times Z$$

$$= (4R + 0.82R)^3$$

$$= (4.82R)^3 = (4.82 \times 2)^3$$

$$= 895.8413 \text{ mm}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\text{สัดส่วนช่องว่างเมล็ดพริกไทย } (\varepsilon_0) &= (\text{ปริมาตรภาชนะ}-\text{ปริมาตรเมล็ดพริกไทย})/\text{ปริมาตรภาชนะ} \\ &= (895.8413-469.1445)/895.8413 \\ &= 0.476\end{aligned}$$

3.3 การคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเมล็ดพริกไทย (ε_{mf})

จากการทดลองของ WEN และ YU โดยใช้วัตถุดิบต่าง ๆ ทดสอบสรุปได้ว่า จากสมการ (3.1)

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

และรูปร่างของเมล็ดพริกไทย ($\phi_s = 1$)
ดังนั้นจึงได้

$$\varepsilon_{mf} = 0.414 \approx 0.5$$

3.4 ความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย (ρ_p)

ความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย ρ_p คืออีกปัจจัยที่มีความสำคัญและมีผลต่อการคำนวณความเร็วของอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิด ฟลูอิดไลเซชัน โดยที่ความหนาแน่นหาได้จากการนับจำนวนตัวของเมล็ดพริกไทยน้ำหนัก 1 kg. แล้วคิดค่าเฉลี่ยของเมล็ดพริกไทยจำนวน 1 เมล็ด เพื่อหาความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย จากปริมาตรเฉลี่ย V จากการทดลองนับจำนวนของเมล็ดพริกไทยต่อน้ำหนัก 1 kg. ได้ 10900 เมล็ด ดังนั้นน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยเฉลี่ย m_p เท่ากับ 9.1743×10^{-5} kg. แทนค่าในสมการหาความหนาแน่นดังนี้

$$\begin{aligned}\rho_p &= \frac{m_p}{V} \\ &= \frac{9.1743 \times 10^{-5}}{6.545 \times 10^{-8}} \\ &= 1400 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

ดังนั้นเมล็ดพริกไทยมีความหนาแน่น เท่ากับ 1400 kg/m^3

3.5 ความสูงที่เกิดฟลูอิดโคเซชัน (L_{mf})

คือ การคำนวณหาความสูงที่เมล็ดพริกไทยลอยในเบคที่เป็นฟลูอิดโคเซชันเพื่อกำหนดความสูงของเบค H ต้องมีค่ามากกว่าความสูงที่เกิดฟลูอิดโคเซชันสองเท่าเป็นอย่างน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดพริกไทยกระเด็นออกจากเบค การคำนวณขั้นต้นได้มีการหาตัวแปรของความสูงที่ต้องการใส่เมล็ดพริกไทย (L_0) เสียก่อน โดยกำหนดขนาดของเบคเท่ากับ $(0.08 \times 0.20) \text{m}$ แล้วคำนวณหาความสูงของเมล็ดพริกไทย จากปริมาตรเบคได้จากความหนาแน่น

$$\begin{aligned} L_{mf} &= \frac{(1-\varepsilon)L_0}{(1-\varepsilon_{mf})} \\ &= \frac{(1-0.476)0.115}{(1-0.5)} \\ &= 0.12052 \text{m} \end{aligned}$$

ผลการคำนวณ ความสูงต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชันเบคเท่ากับ 0.12052 m การเกิดฟลูอิดโคเซชันในขณะที่เริ่มต้นอบแห้งและออกแบบให้ความสูงเป็นสองเท่า ซึ่งเราเลือกที่ $H = 1 \text{m}$ เพื่อที่จะสร้างแผ่นขยายในการที่จะทำให้เมล็ดพริกไทยสัมผัสกับลมร้อนมากขึ้น และเพื่อป้องกันเมล็ดพริกไทยกระเด็นออกจากเบคขณะอบแห้ง เนื่องจากเมล็ดพริกไทยจะลอยตัวสูงขึ้นเมื่อมวลของพริกไทยลดลงในขณะอบแห้ง

3.6 ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน (U_{mf})

ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน มีผลต่อขนาดของพัดลมอัดอากาศ ความดันและความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเบค การคำนวณใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 2.1.1-2.1.5 สรุปผลการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวเบื้องต้นที่ใช้คำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (U_{mf})

ตัวแปร	ผลลัพธ์	หน่วย
1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของเม็ดศปรักไทย (d_p)	0.004	m
2. แฟคเตอร์รูปร่าง (ϕ_s)	1	-
3. สัดส่วนช่องว่างต่ำสุดของเม็ดศปรักไทย (ε_{mf})	0.5	-
4. สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ย (ε)	0.476	-
5. ความหนาแน่นของเม็ดศปรักไทย (ρ_p) ที่ 30°C	1400	kg/m ³
6. ความสูงที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (L_{mf})	0.12052	m
7. ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_g) ที่ 30°C	0.91	kg/m ³
8. ความหนืดของอากาศ (μ) ที่ 30°C	2.24×10^{-5}	N.s/m ²

นำค่าของตัวแปรต่างๆจากตารางที่ 3.1 แทนค่าในสมการของ Ergun ดังนี้

โดยที่

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

จัดรูปใหม่ได้

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g}$$

$$\frac{1.75 (d_p U_{mf} \rho_g)^2}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3 \mu} + \frac{150(1-\varepsilon_{mf}) (d_p U_{mf} \rho_g)}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3 \mu} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g_c}{\mu^2}$$

$$\frac{1.75 (0.005 \times U_{mf} \times 0.91)^2}{1(0.5)^3} + \frac{150(1-0.5) (0.005 \times U_{mf} \times 0.91)}{2.24 \times 10^{-5} (1)^2 \times 0.5^3} = \frac{(0.005)^3 \times 0.91 \times (1400 - 0.91) \times 9.81}{(2.24 \times 10^{-5})^2}$$

ดังนั้นจะได้ว่า จัดรูปสมการใหม่

$$369687.5 [U_{mf}]^2 + 97500 [U_{mf}] - 1537167.829 = 0$$

$$U_{mf} = 2.2, -1.6 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการแยกแฟกเตอร์ $U_{mf} = 2.2, -1.6 \text{ m/s}$ ดังนั้นจึงเลือกค่าที่เป็นบวกเพื่อนำไปใช้คำนวณ คือ 2.2 m/s

3.7 การคำนวณหาความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ

ความดันตกคร่อมและความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังภาพที่ 2.7 มีผลต่อการหาค่ากำลังของพัดลมอัดอากาศ เนื่องจากกำลังของพัดลมอัดอากาศ หาได้จาก $Power = Q_2 \Delta P_f$ โดยคำนวณความดันตกคร่อมและความดัน ณ จุดต่างๆ ได้ดังนี้

3.7.1 ความดันตกคร่อมเบค (ΔP_b) ความดันตกคร่อมเบคมีผลต่อการหาความดัน P_2 ซึ่งมีอิทธิพลต่อการออกแบบสัดส่วนตัวรับของตะแกรงกระจายอากาศ คำนวณจากสมการ (2.20) ดังนี้

$$\Delta P_b = P_3 - P_4 = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.20)$$

จากสมการ(2.20) สามารถหาค่าของความดันที่ทางเข้าเบค (P_3) ได้จาก $P_3 = \Delta P_b + P_4$ เพื่อนำไปใช้คำนวณความดันที่ทางออกของตะแกรงและความดันที่ทางออกของเบค (P_4) มีความดันเท่ากับบรรยากาศ 101.325 kPa และหาความดันตกคร่อมเบคโดยนำค่าตัวแปรต่างๆ จากตารางที่ 3.1 แทนลงในสมการ (2-20) ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta P_b &= 0.12052(1 - 0.5)(1,400 - 0.91)1 \\ &= 84.309 = 0.827 \text{ kPa} \\ P_3 &= 0.827 + 101.325 \\ &= 102.152 \text{ kPa} \end{aligned}$$

3.7.2 ความดันตกคร่อมตะแกรงกระจายอากาศ (ΔP_d) จากสมการ (2.23) สามารถใช้คำนวณความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) ซึ่งไม่ควรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของความดันตกคร่อมเบค ดังนี้

$$\Delta P_d = 0.1 \Delta P_b = P_2 - P_3 \quad (2.23)$$

สามารถหาความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าตะแกรงกระจายอากาศ (P_2) จากสมการ(2.23) โดย $P_2 = 0.1 \Delta P_b + P_3$ แทนค่าได้ดังนี้

$$P_2 = 0.1(0.827) + 102.152$$

$$P_2 = 102.234 \text{ kPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 ความดันคร่อมพัคลมอัดอากาศ (ΔP_f) เป็นผลต่างของความดันที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของพัคลมอัดอากาศ P_1 และ P_2 ตามลำดับ หาได้จาก $\Delta P_f = P_2 - P_1$ โดยที่ $P_1 = 101.325 kPa$ จำนวนค่าของ $\Delta P_f = 0.91 kPa$

3.7.4 ขนาดของพัคลมอัดอากาศ ขนาดของพัคลมอัดอากาศที่ใช้สำหรับสะเป้าเต็คเบคหาได้จาก $Power = Q_2 \Delta P_f$ โดยอัตราการไหลของอากาศ ณ ตำแหน่งทางเข้าของตะแกรงซึ่งเป็นอัตราการไหล ณ ตำแหน่งทางออกพัคลมอัดอากาศ Q_2 จำนวนได้จากสมการ(2.25)

$$\begin{aligned} Q_2 &= U_{mf} A_t \\ &= 2.2 \times 0.08 \times 0.2 \times \left(\frac{102.152}{102.234} \right) \\ &= 0.0352 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

จำนวนกำลังงานของพัคลมอัดอากาศดังนี้

$$\begin{aligned} W_f &= Q_2 \Delta P_f \\ &= 0.0352 \times 910 \\ &= 32.032 \text{ Watt} \end{aligned} \tag{2.25}$$

ควรเลือกขนาดของพัคลมอัดอากาศให้มีขนาดใหญ่กว่า ที่คำนวณได้ ถ้าเลือกขนาดเล็กกว่าอาจทำให้เม็คทริกไทยที่อยู่ในเบคไม่สามารถยกตัวขึ้นและไม่เกิดปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชัน ดังนั้นขนาดของพัคลมอัดอากาศที่ใกล้เคียงที่สุดคือ 1.5 Hp

3.8 การออกแบบตะแกรงกระจายอากาศ

การคำนวณตะแกรงกระจายอากาศ เพื่อต้องการหาสัดส่วนของรูเจาะต่อพื้นที่ของตะแกรงทั้งหมด สำหรับเลือกตะแกรงกระจายอากาศ เพื่อให้การทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าเลือกตะแกรงกระจายอากาศ ที่มีจำนวนรูเจาะน้อยเกินไป จะทำให้เกิด Pressure drop ในสะเป้าเต็คเบคสูง ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าเบคจะมีความเร็วลดลงมากทำให้เม็คทริกไทยไม่สามารถยกตัวลอยขึ้นได้ ในการคำนวณมีลำดับขั้นตอนดังนี้

3.8.1 จำนวนหาค่าความเร็วอากาศในเบคว่างเปล่า U_0 ใช้หาค่าของความเร็วอากาศในเบคขณะที่ไม่มีเม็คทริกไทย เพื่อนำไปใช้คำนวณหาสัดส่วนพื้นที่รูเจาะต่อตะแกรงของสมการ (2-24) โดยที่ความเร็วอากาศในเบคว่างเปล่า U_0 หาได้จากสมการ (3.1) ดังนี้

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} g_c = \frac{150(1-\varepsilon_{mf})^2 \mu U_0}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon_{mf}) \rho_g U_0^2}{\varepsilon_{mf}^3 (\phi_s \cdot D_p)} \quad (3.1)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆจากตารางที่ 3.1 และความสูงที่ทำให้เกิดฟลูอิดโคเซชัน $L_{mf} = 0.12052m$ เพื่อหาความเร็วของเบดว่างเปล่า U_0 ดังนี้

$$\frac{(84.309)(9.81)}{0.51} = \frac{150(1-0.5)^2 (2.24 \times 10^{-5}) U_0}{(0.5)^3 (1 \times 0.004)^2} + \frac{1.75(1-0.5)(0.91) U_0^2}{(0.5)^3 (1 \times 0.004)}$$

$$1621.708 = 420 U_0 + 1592.5 U_0^2$$

$$U_0 = 3.623 \text{ m/s.}$$

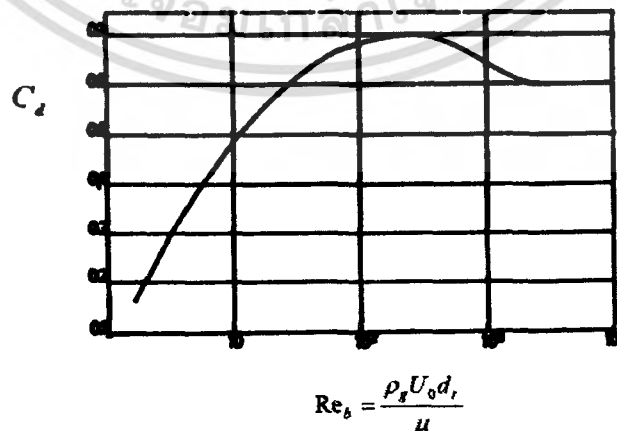
นำค่าของ U_0 เพื่อตรวจสอบ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ จากสมการข้างล่างโดยกำหนดขนาดของเบด $d_p = 0.114m$ แล้วแทนค่าตัวแปรดังนี้

$$Re_b = \frac{d_p \rho_g U_0}{\mu}$$

$$Re_b = \frac{0.114 \times 0.91 \times 3.623}{2.24 \times 10^{-3}}$$

$$= 16779.02$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient; C_d) สามารถหาได้จาก รูปที่ 3.2 โดยใช้ค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์จากสมการที่ผ่านมา



รูปที่ 3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตะแกรงกระจายอากาศ (Orifice Coefficient; C_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากภาพที่ 3.2 $C_d = 0.6$ ใช้แทนค่าในสมการต่อไปนี้ เพื่อหาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} ดังนี้

$$\begin{aligned} U_{or} &= C_{d,or} \left(2g_c \frac{\Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \\ &= 0.6 \left[\frac{2(9.81)(84.309)}{0.91} \right]^{1/2} \\ &= 25.581 \text{ m/s} \end{aligned}$$

นำค่าของความเร็วอากาศในเบคว่างเปล่า U_0 และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตะแกรง U_{or} แล้วแทนค่าในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} N_{or} &= \frac{4U_0}{\pi d_{or}^2 U_{or}} \\ N_{or} &= \frac{4(3.623)}{\pi d_{or}^2 (25.581)} \end{aligned}$$

เนื่องจากมีตัวแปรไม่ทราบค่าถึงสองตัวแปรจึงใช้วิธี Trial and Error โดยสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ผลของวิธี Trial and Error เพื่อหาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศต่อพื้นที่

$d_{or} (m)$	$N_{or} (holes/m^2)$
0.002	45081.77
0.0025	28852.33
0.003	20036.34

จากการใช้วิธี Trial and Error ค่าของ $d_{or} = 0.0025 m$ และ $N_{or} = 28852.33 holes/m^2$ เพื่อนำมาใช้หาจำนวนรูเจาะของตะแกรงกระจายอากาศที่ใช้ในหอตลอดแบบสี่เหลี่ยม ได้จากขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง

เส้นผ่านศูนย์กลางของเบด $d_b = 0.114 m$ ดังนั้นจำนวนรูเจาะตะแกรงในเบดทั้งหมดหาได้จาก $28852.33 \times 0.016 = 461.64$ รูเจาะ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ $0.0025 m$ และ สัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ

$$\frac{U_0}{U_{or}} = \frac{3.623}{25.581} \times 100 = 14.16\%$$

3.9 การหาขนาดของฮีตเตอร์

มีผลต่อการพาความร้อนแบบบังคับในเบด ดังนั้นควรเลือกขนาดของฮีตเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเบดแบบสี่เหลี่ยม โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

3.9.1 การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_w

โดยคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเบดและผนังของเบดจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและคำนวณ คือ สัดส่วนช่องว่างตัวสุด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย โดยใช้คุณสมบัติของอากาศแวดล้อมที่ $35^\circ C$ เพื่อแทนค่าในสมการของ Toomey & Johnstone ดังนี้

$$\left(\frac{h_w d_p}{k_g} \right) = 3.75 \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \cdot \log \frac{U_0}{U_{mf}} \right)^{0.17}$$

ทำการแทนค่าเพื่อทำการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$\frac{h_w d_p}{k_g} = 3.75 \left(\frac{(0.004)(2.2)(0.91)}{2.24 \times 10^{-5}} \times \log \left(\frac{3.623}{2.2} \right) \right)^{0.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{h_w d_p}{k_s} = 7.86$$

ดังนั้น

$$h_w = \frac{(7.86)(2.6892 \times 10^{-2})}{0.004}$$

$$h_w = 52.843 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3.9.2 การหาขนาดความต้านทานของขดลวดของฮีตเตอร์ (R)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากขดลวดฮีตเตอร์ จะมีค่าเทียบเท่ากับกำลังไฟฟ้า $P = I^2 R$ โดยความต้านทานสามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานดังนี้

$$P = I^2 R = h_w A_w \Delta T_b$$

เนื่องจากไม่ทราบค่าของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่ทราบตัวแปรของแรงเคลื่อนไฟฟ้า $E = 380 \text{ V}$ แทนค่า และจัดรูปสมการเพื่อหาค่าของ R ดังนี้

$$R = \frac{E^2}{h_w A_w \Delta T_b}$$

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวแปรสำหรับหาขนาดความต้านของขดลวดฮีตเตอร์

ตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบ	ค่าที่ใช้ออกแบบ
1. อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการอบแห้ง	80°C
2. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	30°C
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_w	$52.843 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
4. พื้นที่ผิวของผนังเบด A_w	0.56 m^2
5. แรงเคลื่อนไฟฟ้า E	380 Volt

$$\text{แทนค่า} \quad R = \frac{380^2}{52.83 \times 0.56 (80 - 30)}$$

$$= 97.62 \Omega$$

โดยที่ปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ที่ต้องการเพื่อให้เบดมีอุณหภูมิ 80°C $Q = h_w A_w \Delta T_b$ เท่ากับ 1.479 kW ส่วนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดหาได้จาก $I = E/R$ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ 380 Volt มีค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเท่ากับ 3.9 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 ผลที่ได้รับจากการออกแบบและการคำนวณ

ได้ผลสรุปเพื่อใช้สร้างชุดทดลองเครื่องอบแห้งฟลูอิด ไคซ์เบคแบบห่อสี่เหลี่ยมสำหรับอบเมล็ดพริกไทยคังนี้

ตารางที่ 3.4 ผลสรุปของค่าที่ได้จากการคำนวณอุปกรณ์จากทฤษฎี

ชนิดของอุปกรณ์ที่คำนวณหาขนาด	ผลการคำนวณ	ค่าที่เลือกใช้
1. พัดลมอัดอากาศ	1.5 Hp	2 Hp
2. ความสูงของเบค	1 m	1 m
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบค	0.144 m	0.144 m
4. สัดส่วนรูเจาะต่อพื้นที่ตะแกรงกระจายอากาศ	14.16%	รูเจาะขนาด 0.0025 m จำนวน 240 รูเจาะ
5. ความต้านทานของฮีตเตอร์	97.62 Ω	85 Ω



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองและมีผลต่อระยะเวลาของการอบแห้งเมล็ดพริกไทย

4.1.1 การคัดเลือกเมล็ดพริกไทย โดยทั่วไปแล้วเมล็ดพริกไทยที่ขายอยู่ตามท้องตลาดจะมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ เล็กบ้าง ใหญ่บ้าง เราจึงต้องนำมาคัดแยกเพื่อให้ได้ขนาดที่ใกล้เคียงกัน ก่อนนำไปอบแห้ง

4.1.2 การหาความชื้นเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้นก่อนอบแห้ง มี 2 ชนิด คือ ความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

4.1.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น หาได้จากมวลแห้ง m_d โดยการสุ่มตัวอย่างของเมล็ดพริกไทยที่มีน้ำหนัก 100 g ใส่ตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งมาชั่งบนตาชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง เป็นมวลแห้งที่ผ่านการชดเชยความชื้นที่สถานะสมดุล $m_d=17.5$ g จากนั้นสามารถหาความชื้นมาตรฐานเปียกจากสมการ (2.10) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชื้นมาตรฐานเปียก} \quad M_w &= \frac{m_w - m_d}{m_w} & (2.10) \\ &= \frac{100 - 17.5}{100} \\ &= 82.5 \text{ \% มาตรฐานเปียก} \end{aligned}$$

4.1.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้งเริ่มต้น (Moisture Content Dry-basis) สามารถหาความชื้นมาตรฐานแห้งเริ่มต้น ได้จากสมการ (2.11) ได้ดังนี้

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{m_w - m_d}{m_d} \quad (2.11)$$

$$= \frac{100 - 17.5}{17.5}$$

$$= 471.43 \text{ \% มาตรฐานแห้ง}$$

4.1.3 การควบคุมความเร็วอากาศที่ทางเข้าเบค ความเร็วอากาศที่ทางเข้าเบคมีผลต่อการพาความร้อนจากฮีตเตอร์ให้ไหลเข้าเบคและมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยมีการควบคุมความเร็วอากาศดังนี้

4.1.3.1 การไหลแบบคงตัว สามารถควบคุมความเร็วอากาศที่ไหลได้โดยปรับการเปิด

ลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงของความเร็วให้อยู่หนึ่งกับที่ โดยความเร็วอากาศจะแปรผันตามการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ เนื่องจากความเร็วอากาศเป็นความเร็วเฉลี่ยในหน้าตัดท่อที่ได้จากวิธี Triple Grid และทำการทดลองเพื่อหาความเร็วอากาศที่สามารถลดเวลาในการอบแห้งเหลือ น้อยสุด

4.1.3.2 การไหลแบบไม่คงตัว โดยควบคุมความเร็วรอบของลิ้นปีกผีเสื้อให้หมุนโดยใช้ความเร็วรอบคงที่ระดับต่างๆ เนื่องจากการไหลชนิดนี้มีผลทำให้เมล็ดพริกไทยกระแทกตัวขึ้น-ลงในเบคและความเร็วของอากาศที่แปรผันตามองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ

4.2 องค์ประกอบของการทดลอง

องค์ประกอบของการทดลองประกอบด้วยปัจจัยหลัก คือ การคัดเมล็ดพริกไทยสำหรับทดลอง การเตรียมชุดทดลองและอุปกรณ์ในการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้ดังนี้

4.2.1 การเตรียมเมล็ดพริกไทยสำหรับทดลอง โดยนำเมล็ดพริกไทยที่แกะเรียบร้อยแล้ว ไปใส่ตะแกรงร่อน ที่มีขนาดของตาตะแกรง 3 mm เพื่อให้ได้เมล็ดพริกไทยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.1 เมล็ดพริกไทยที่คัดแยกแล้ว พร้อมทั้งจะทดลอง

4.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้ผ่านการสอบเทียบกับมาตรฐาน โดยมีเครื่องมือวัดดังนี้

4.2.2.1 เป็นเครื่องมือวัดแบบ ฮอตไวร์ (Hot-Wire) ชื่อ Testo รุ่น Testo 445 มีคุณสมบัติที่สามารถวัดของไหลที่เป็นอากาศเท่านั้น ใช้วัดได้ทั้ง ความเร็วอากาศ อัตราการไหล และอุณหภูมิ สามารถบันทึกค่าได้แบบ Data Locker พร้อมทั้งใบสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.2 เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศ (Hot-Wire)

4.2.2.2 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ Techo -Meter สำหรับวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ขับ
ลิ้นปึกสี่เสื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 เครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์

4.2.3 ชุดป้อนอากาศ (Blower)

ชุดป้อนอากาศที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็น Blower ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต และมีกระแส 11 แอมป์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของอากาศที่ไหลเข้าหอดทดลอง



รูปที่ 4.4 ชุดป้อนอากาศ (Blower)

4.2.4 ชุดควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศ (Inverter)

ชุดควบคุมความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองจะเป็นยี่ห้อ FUJI รุ่น FVR-E11 ซึ่งจะใช้ควบคุมความเร็วรอบของชุดป้อนอากาศเพื่อที่จะทำการทดลองในค่าความเร็วที่แตกต่างกัน ในการทดลองจะใช้ความเร็ว 5 ค่าด้วยกัน คือ 1.1 Umf , 1.3 Umf , 1.5 Umf , 1.8 Umf และ 2.0 Umf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ชุดควบคุมความเร็วรอบ (Inverter)

4.2.5 ชุดให้ความร้อน (Heater)

ระบบให้ความร้อนนั้นได้เลือกใช้ Heater ขนาด 12 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้ชุดควบคุมให้ความร้อน ชุดที่อยู่ในตัว Heater โดยจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองตามต้องการ



รูปที่ 4.6 ชุดให้ความร้อน (Heater)

4.2.6 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน

ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อนตัวนี้จะใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้ อุณหภูมินั้นคงที่ตลอดเวลาการทดลองเพราะในการนำหอตกลงมายังแต่ละครั้งค่าของอุณหภูมิ จะเปลี่ยนแปลงต้องคอยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิปรับค่าให้ได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมอุณหภูมิชุดให้ความร้อน

4.2.7 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice)

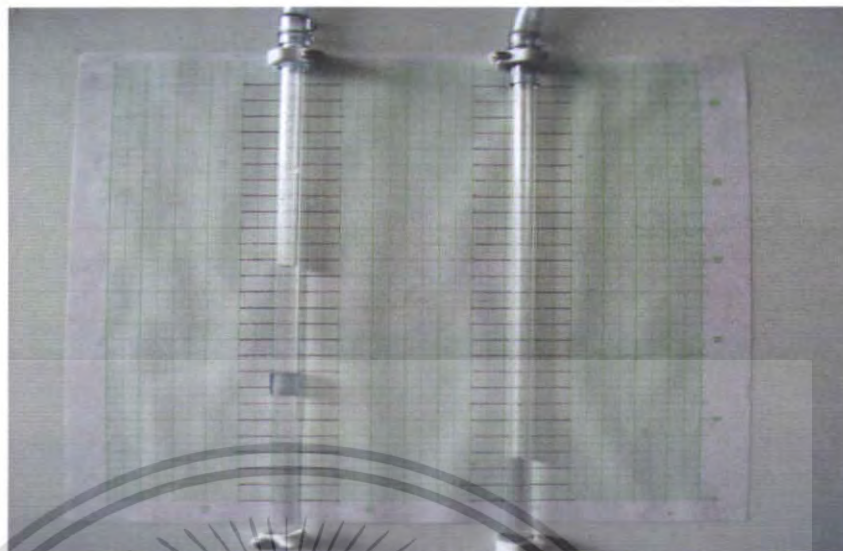
ชุดวัดความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าหอทดลอง ของฟลูอิด ไคซ์เบคที่มีการขยายหลายช่วง อากาศร้อนจากตัวให้ความร้อนจะไหลผ่าน ออร์ฟิส (Orifice) เพื่อทำการวัดความดัน โดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) วัดความดันแตกต่าง ระหว่างทางเข้าและทางออกของ ออร์ฟิส (Orifice)



รูปที่ 4.8 ชุดวัดอัตราการไหลของอากาศ (Orifice)

การสร้างออร์ฟิสมิเตอร์ใช้ตามมาตรฐาน (ANSI/API 2530) และมาโนมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งใช้น้ำเป็นของเหลวจะบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 มาโนมิเตอร์ (Manometer)

4.2.8 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักของเมล็ดพริกไทย

อุปกรณ์ชั่งน้ำหนักที่ใช้จะเป็นตาชั่งดิจิตอลค่าความละเอียด 0.5 กรัม ที่มีการแสดงผลเป็นตัวเลขทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น

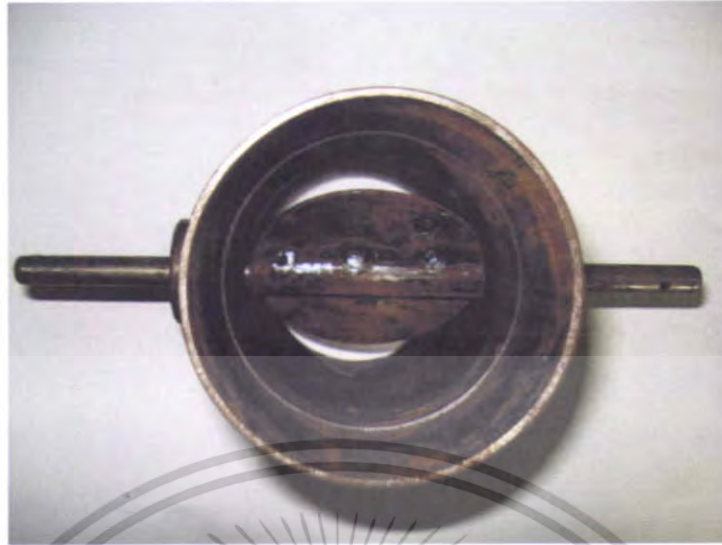


รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก

4.2.9 ชุดลั่นปึกผีเสื้อ

ลั่นปึกผีเสื้อ จะถูกวางไว้ก่อนทางเข้าหอ ควบคุมความเร็วรอบของการเปิด-ปิด ด้วยมอเตอร์ขนาด 0.5 hp ลั่นปึกผีเสื้อที่ใช้สำหรับการทดลองนี้มีลักษณะเป็น 2 ใบ มุม 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ล้อปีกผีเสื้อ

4.2.10 ชุดควบคุมความเร็วรอบของล้อปีกผีเสื้อ

มอเตอร์ขนาด 0.5 hp ที่ถูกควบคุมความเร็วรอบด้วย Inverter จึงสามารถปรับความเร็วรอบของการเปิด-ปิดได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.12 ชุดควบคุมความเร็วรอบของล้อปีกผีเสื้อ

4.2.11 หอทดลอง

ในการทดลอง หอที่ใช้ในการทดลองจะเป็นหอสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $0.08 \times 0.2 \times 1$ เมตร ที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ หอปกติ หอผิวคลื่นมุม 30° 45° และ 60° ที่เห็นในรูป เป็นหอมุม 45° ลดขนาด และมีระยะห่างระหว่างมุม 2.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 หอททดลอง

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซน

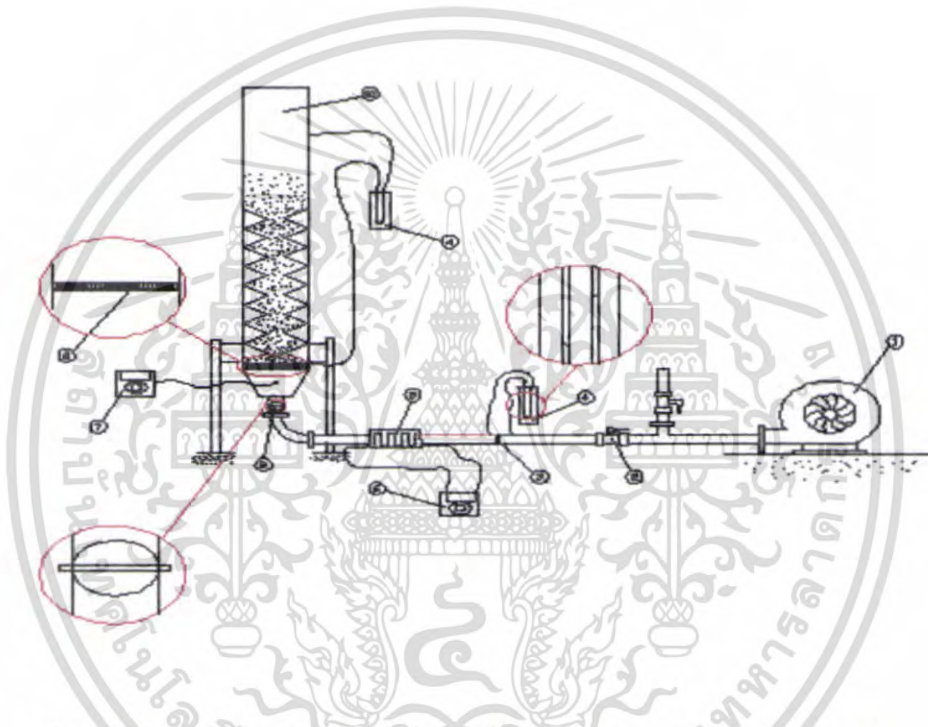
1. ติดตั้งชุดமானอมิเตอร์ ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกเพื่อหาความดันตกคร่อมเบด
2. ใส่เม็ดสฟริกไทยลงไป ในหอททดลองจำนวน 200 กรัม
3. เพิ่มความเร็วของอากาศ ครั้งละ 0.5 m/s
4. บันทึกค่าความดันตกคร่อมภายในหอททดลอง
5. ปรับความเร็วไปจนกว่าสังเกตเห็นเม็ดสฟริกไทยเริ่มขยับและความดันในหอททดลองเริ่มคงที่ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว
6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
7. เขียนกราฟจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

4.3.2 ขั้นตอนการอบแห้งเม็ดสฟริกไทยแบบผิวดินที่มีการไหลเป็นจังหวะ

1. ประกอบชุดหอททดลอง โลงเข้ากับเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด
2. เปิดโบล์เวอร์ อุ่นอากาศประมาณ 15 นาที ให้ได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. ปรับการเปิด - ปิดของลินปีกผีเสื้อ ที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที
3. ใส่เม็ดสฟริกไทยลงในหอททดลอง 200 กรัม
4. ตั้งความเร็วให้ได้ 1.1 U_{mf}
5. นำฟริกไทยออกมาชั่งทุก ๆ 5 นาที ในการนำมาชั่งแต่ละครั้งไม่ควรเกิน 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 โดยปรับการเปิด-ปิดของลื่นปีกผีเสื้อ ที่ความเร็ว 70,80,90, และ 100 รอบต่อนาที
6. ทำตามขั้นตอน 2 ถึง 6 โดยเปลี่ยนความเร็วเป็น 1.3 *Umf* ,1.5 *Umf* ,1.8 *Umf* และ 2.0 *Umf*
7. ทำการทดลองตามขั้นตอน 2 ถึง 6 โดยเปลี่ยนหอททดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศา
8. ในการทดลองของหอททดลองที่ติดแผ่นทำมุม 30 องศา มีการเปลี่ยนระยะห่างของมุม โดยมีด้วยกัน 2 ขนาดด้วยกัน คือ 3 และ 2 เซนติเมตร



รูปที่ 5.14 ผังแสดงชุดอุปกรณ์การทดลองเครื่องอบแห้งผิวกลืนที่มีการไหลเป็นจังหวะ

1. โบลเวอร์ 2. วาล์วจ่ายลม 3. ออร์ฟิส 4. ออร์ฟิสมิเตอร์ 5. ชุดลดความเร็วร้อน
6. ชุดควบคุมชุดลดความเร็วร้อน 7. ชุดวัดอุณหภูมิ 8. แผ่นกระจายลม 9. หอททดลอง 10. ลื่นปีกผีเสื้อ

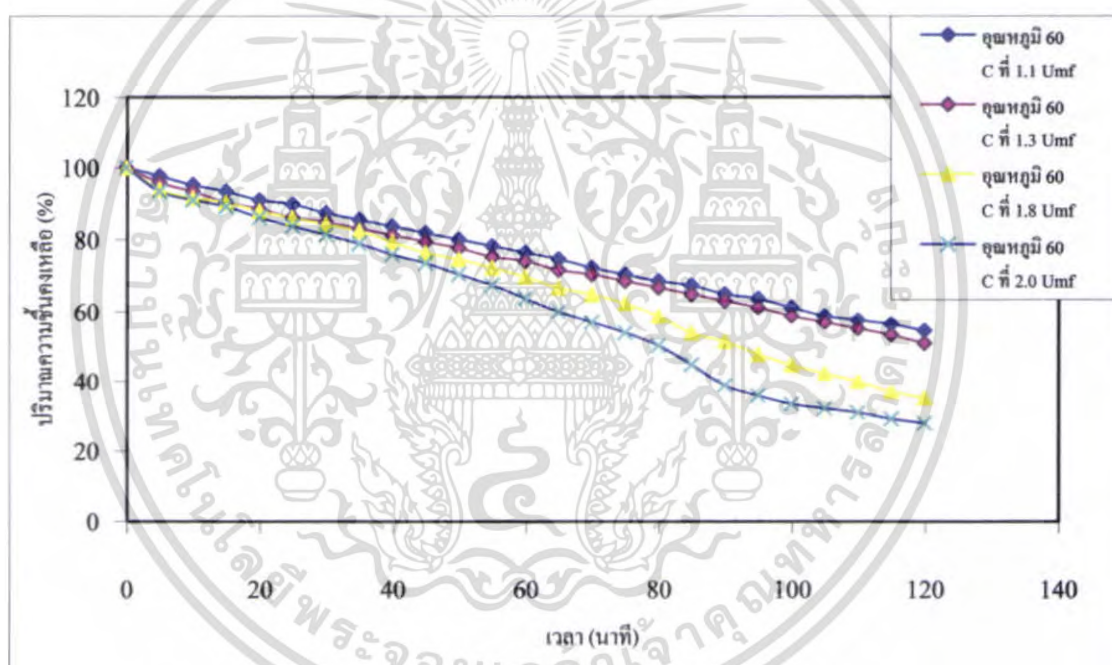
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

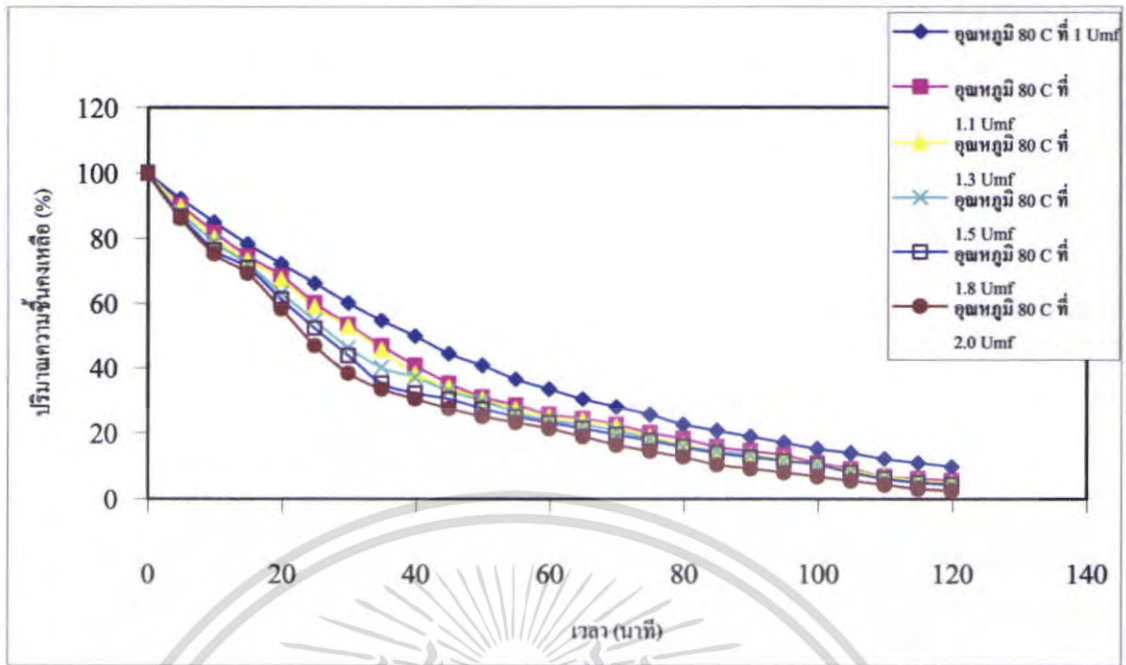
5.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทดลองแบบต่าง ๆ ที่ยังไม่ใส่ดินปีกผีเสื้อ

จากการทดลองครั้งนี้ ได้บันทึกน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยจากการนำมาซังทุก ๆ 5 นาที แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือที่เวลานำมาซังแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความชื้นในแต่ละกรณี

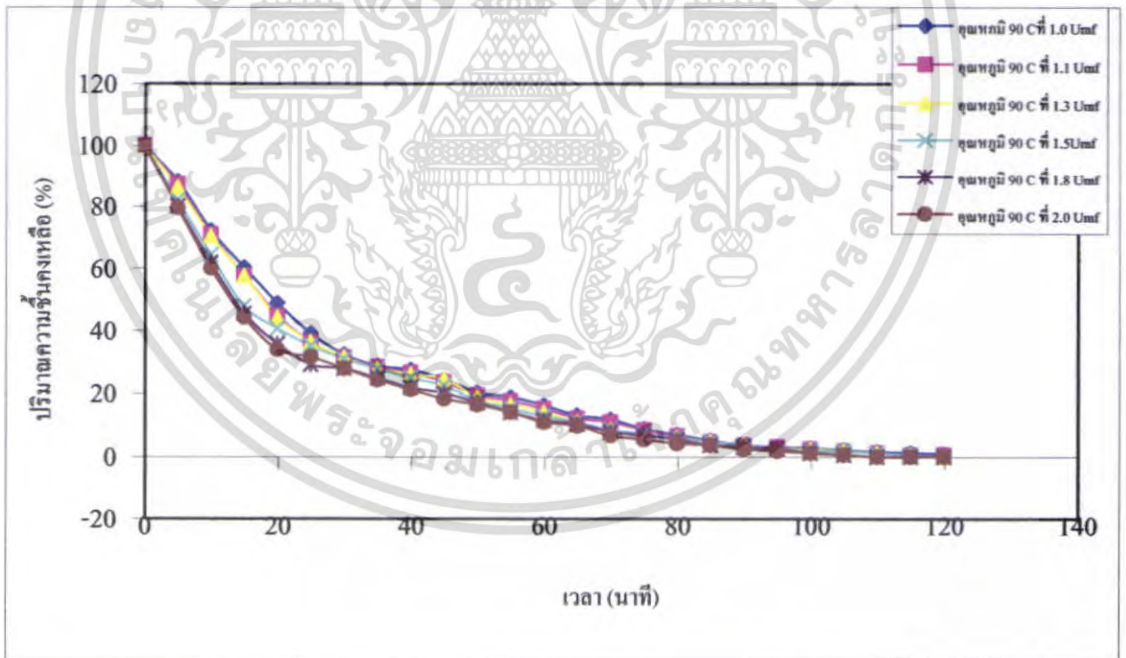


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอยฟลูอิด ไคซ์เบคของหอยธรรมดา ที่ความเร็วต่าง ๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 60°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



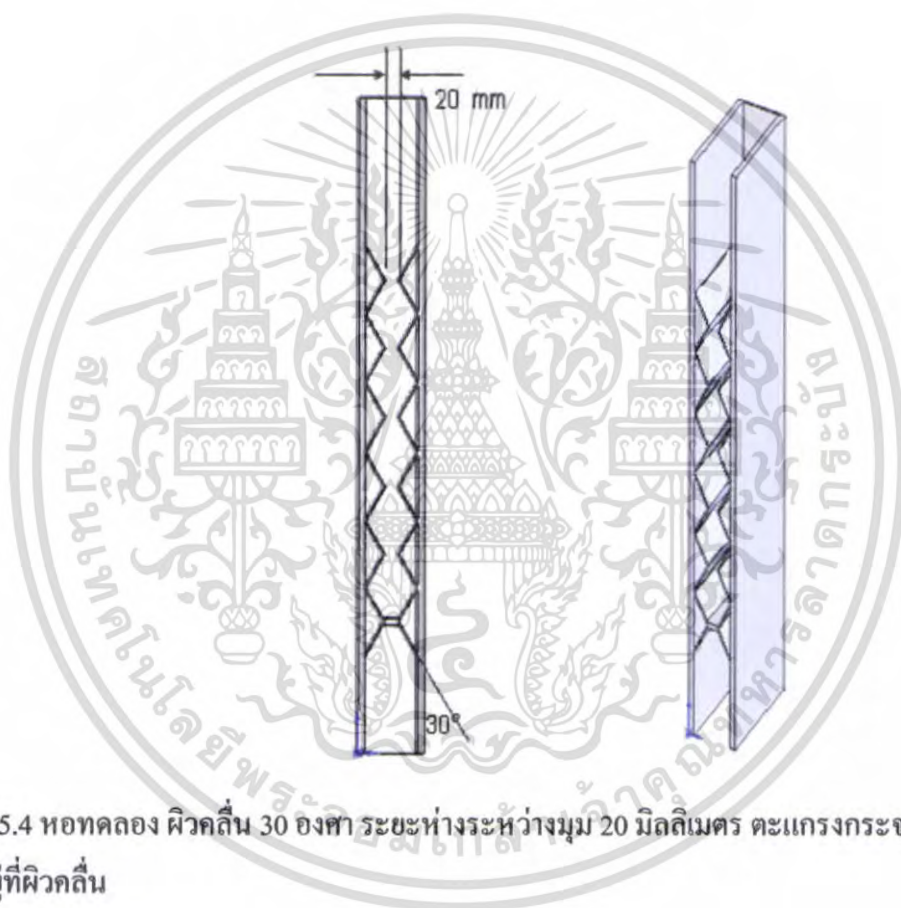
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอฟลูอิดไคซ์เบคของหอธรรมคาที่ความเร็วต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของหอฟลูอิดไคซ์เบคธรรมคาที่ความเร็วต่างๆ ทดลองที่อุณหภูมิ 90°C

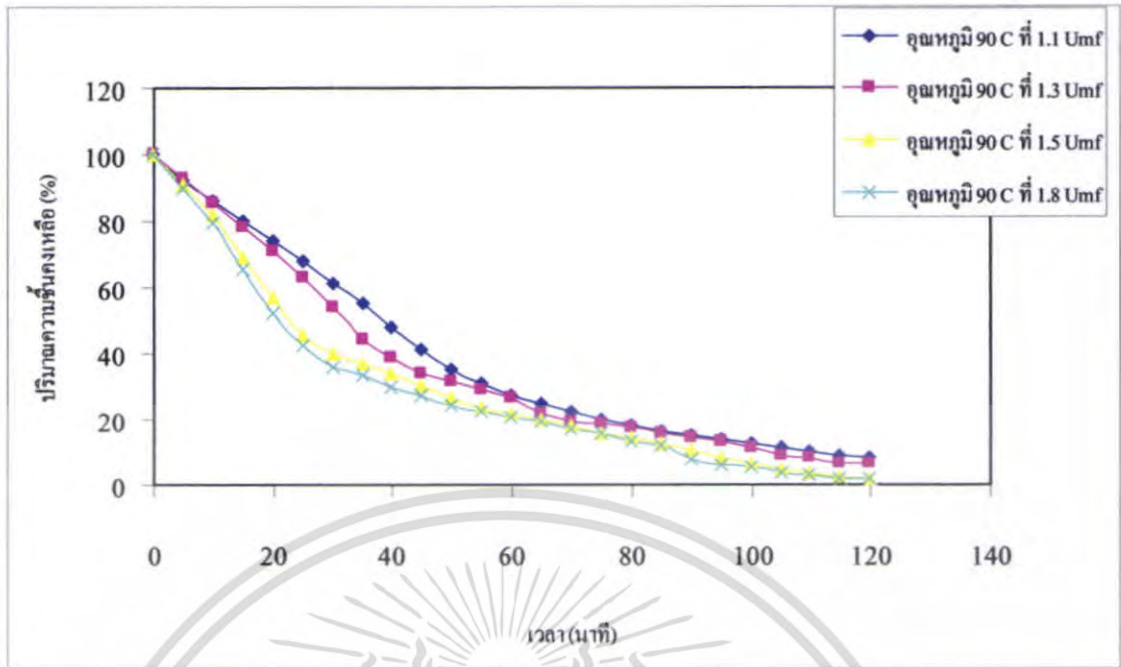
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 จะพบว่า การทดลอง โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบเบดแบบหอตลอดฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดา การลดลงของความชื้นจะล่าช้ากว่า กราฟที่ 5.2 และกราฟที่ 5.3 เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ปริมาณความชื้นคงเหลือจึงเหลือมาก เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบที่เท่ากัน คือ 120 นาที และทำให้เกิดเชื้อราขึ้น เมื่อต้องการนำไปเก็บรักษา เราจึงอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิ 80°C และ 90°C ใช้ในการอบแห้งแบบผิวก้อนที่มุม 30, 45 และ 60 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุม 2 และ 3 เซนติเมตร อุณหภูมิ 80°C และ 90°C ดังกราฟแสดงผลการทดลอง ดังนี้

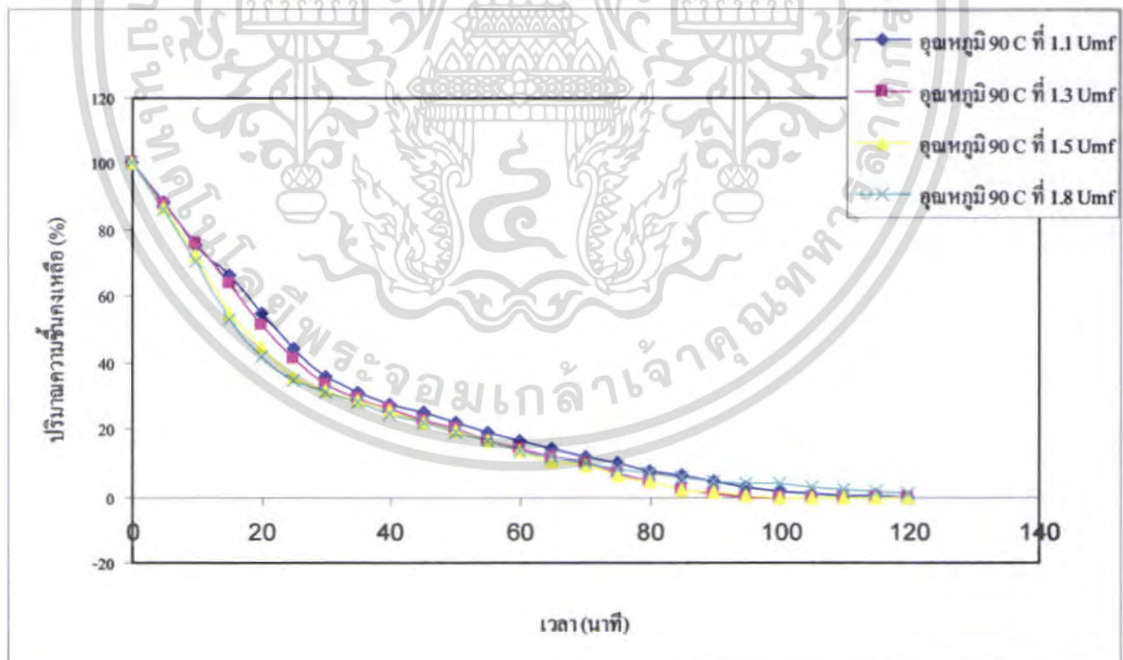


รูปที่ 5.4 หอตลอด ผิวก้อน 30 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดัน ติดอยู่ที่ผิวก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

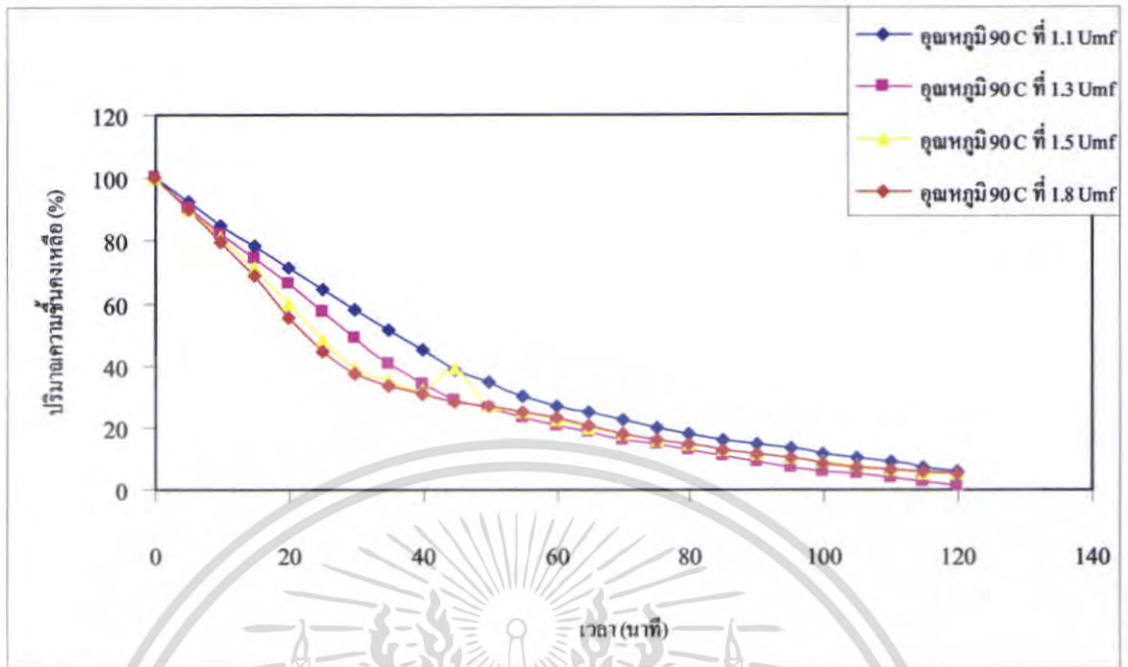


รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

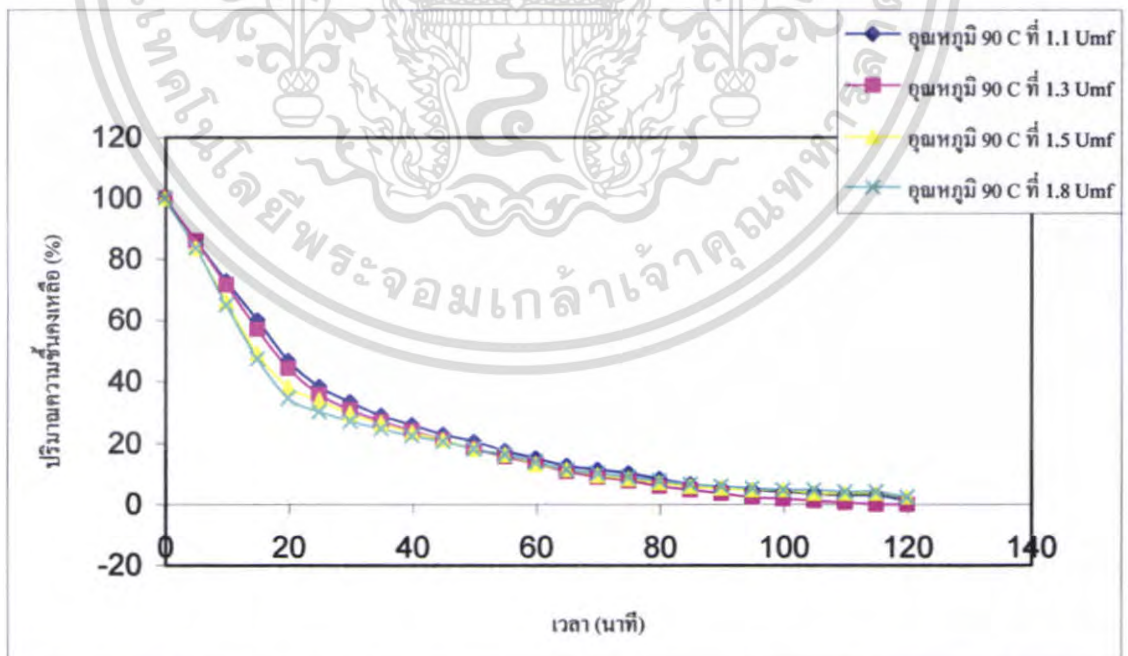


รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

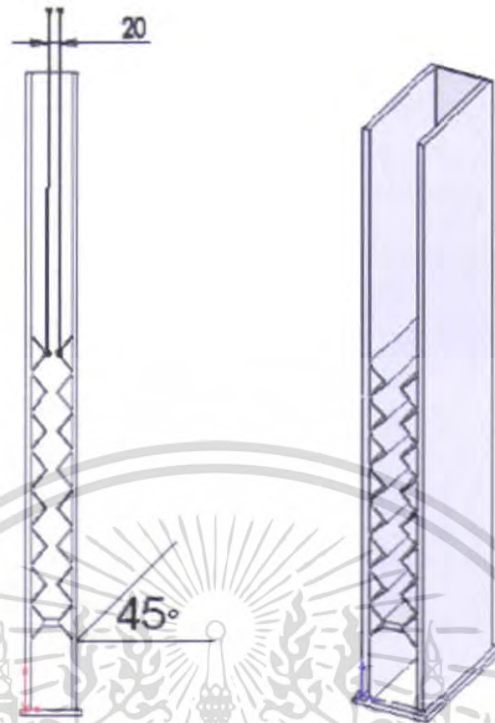


รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทคลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอทคลอง 3 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

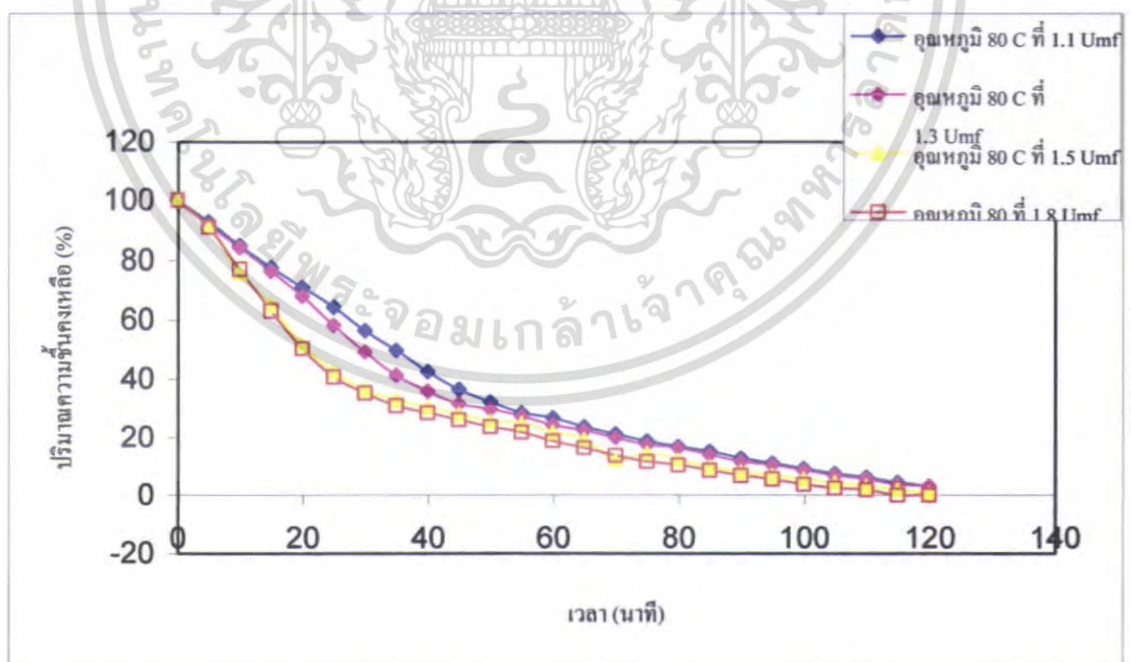


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทคลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 30 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอทคลอง 3 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

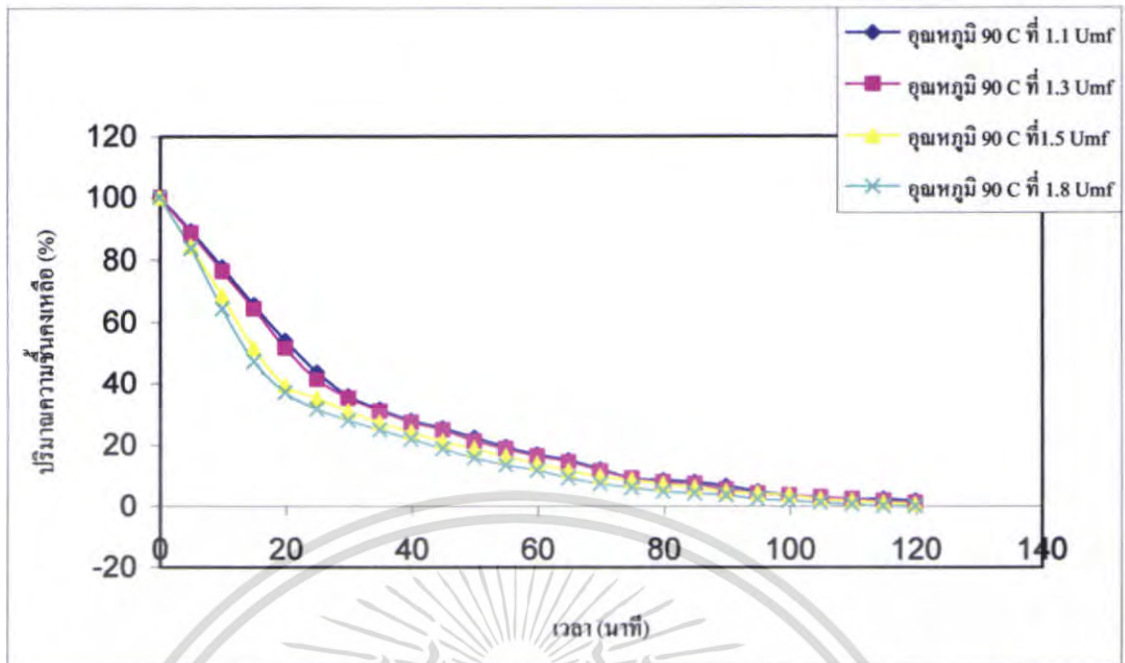


รูปที่ 5.9 หอทดลอง ผิวคลื่น 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดัน ติดอยู่ที่ผิวคลื่น

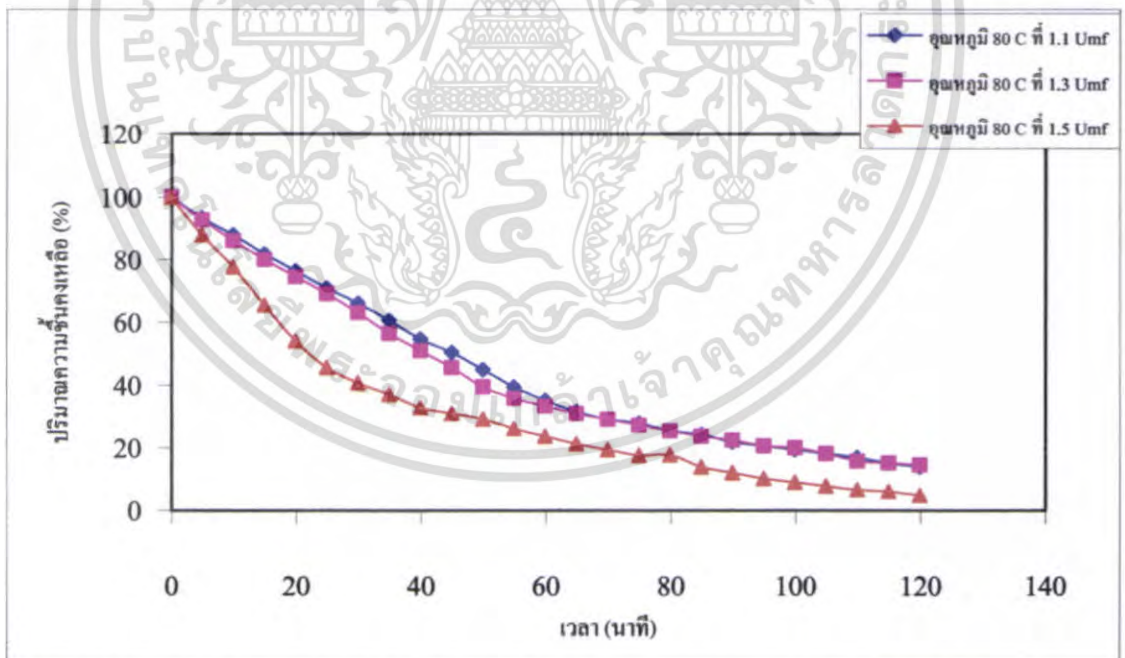


รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอทดลอง 20 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

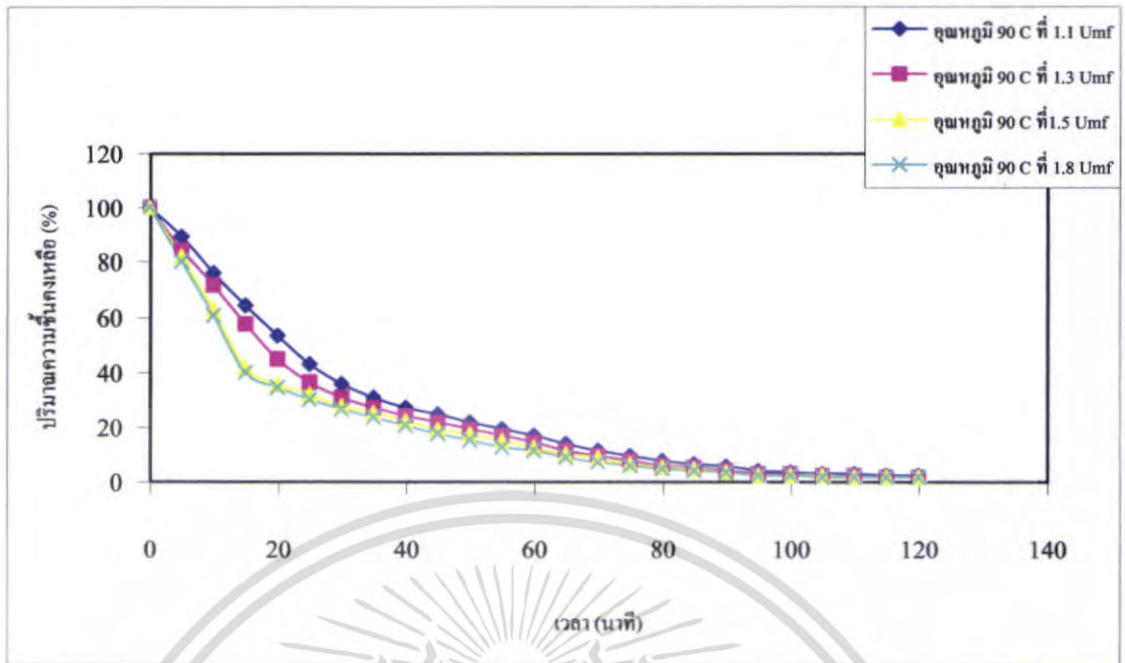


รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตคองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตคอง 20 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C

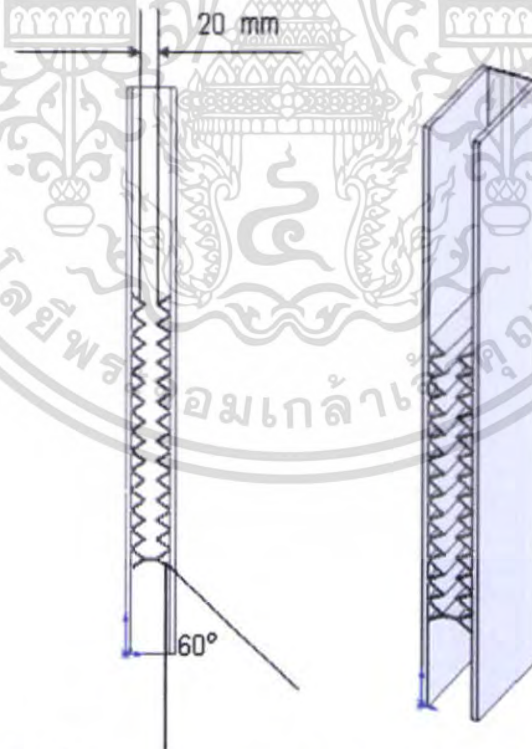


รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตคองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตคอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

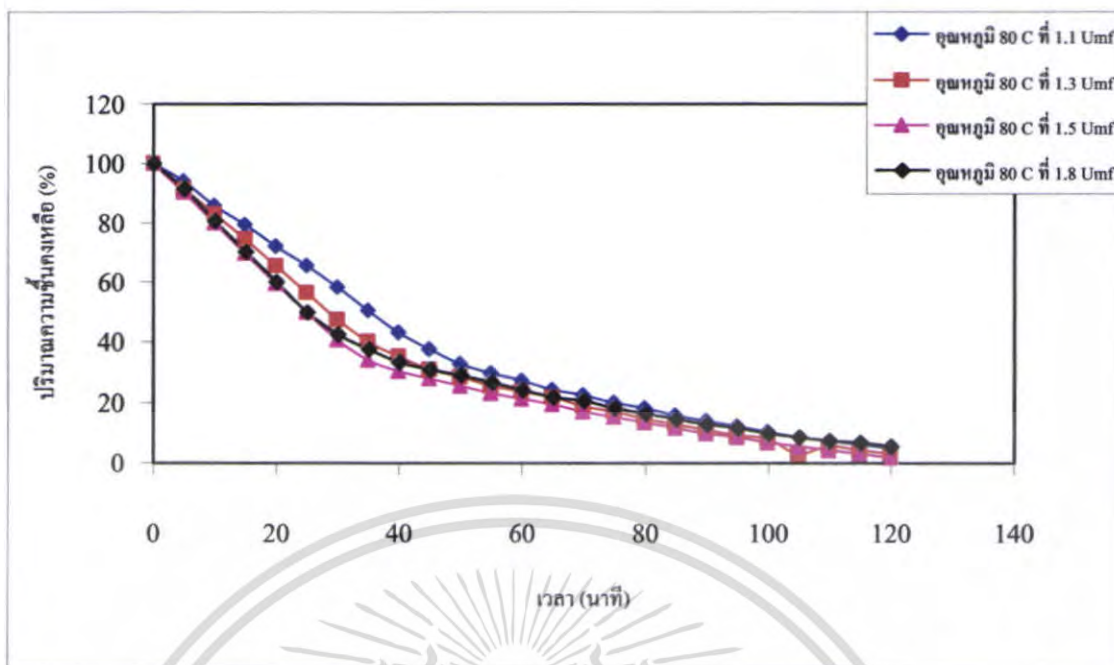


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทคลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอทคลอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C

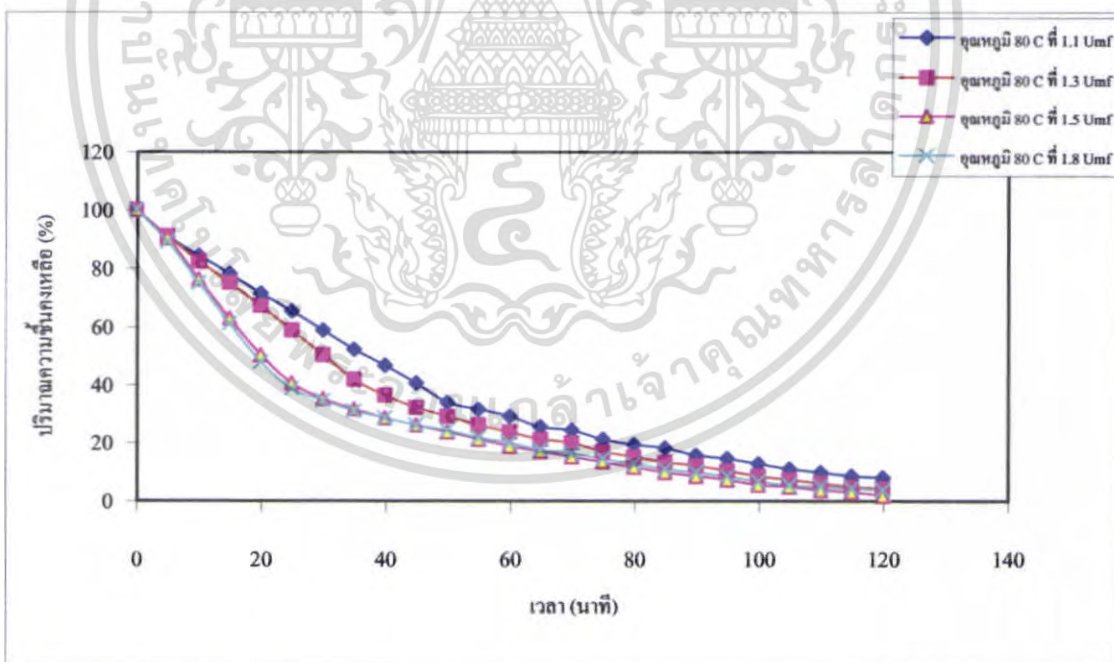


รูปที่ 5.14 หอทคลองผิวคลื่น 60 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ตะแกรงกระจายความดัน ติดอยู่ที่ผิวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

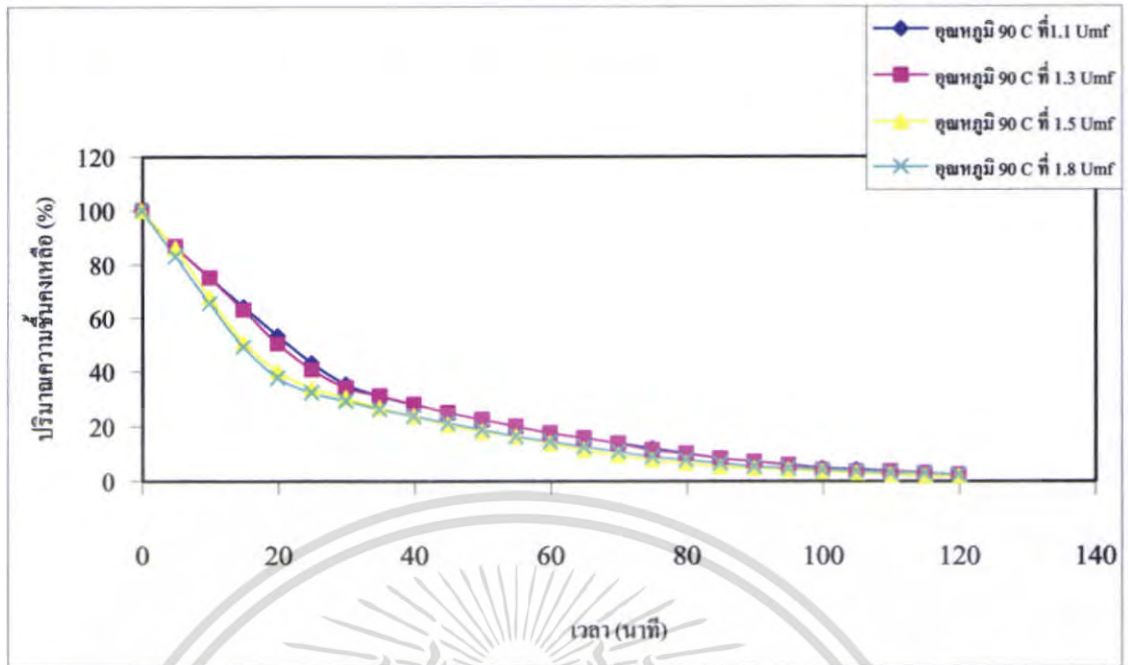


รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 2 เซนติเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

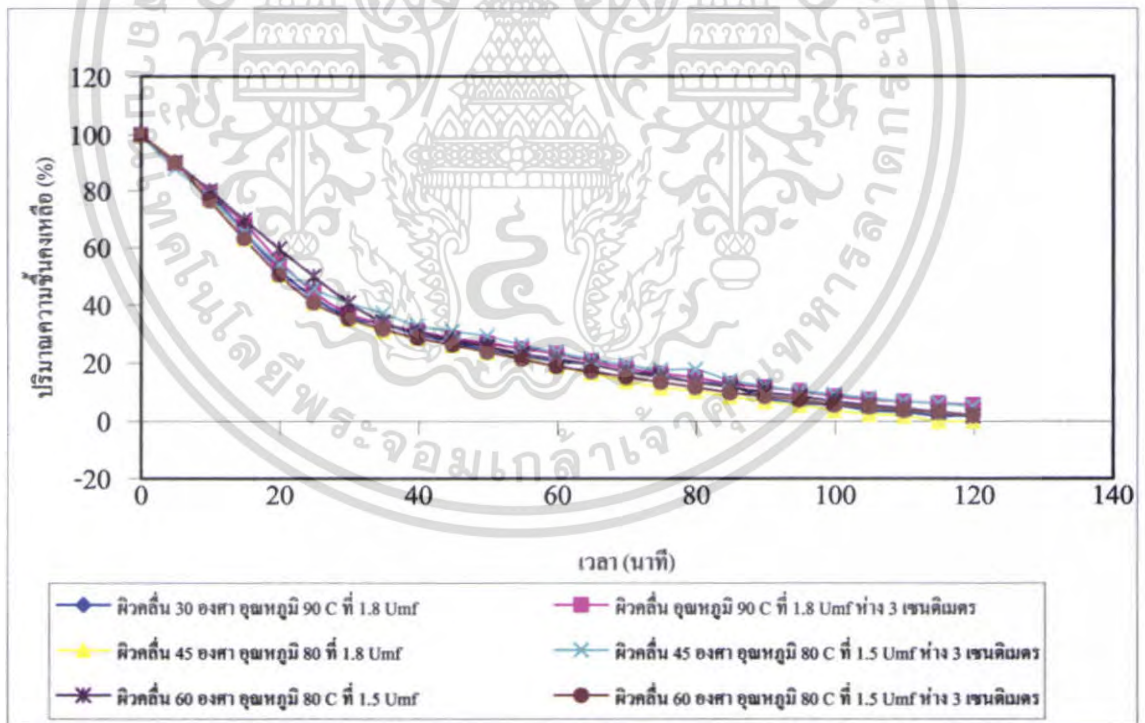


รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตดลองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตดลอง 30 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



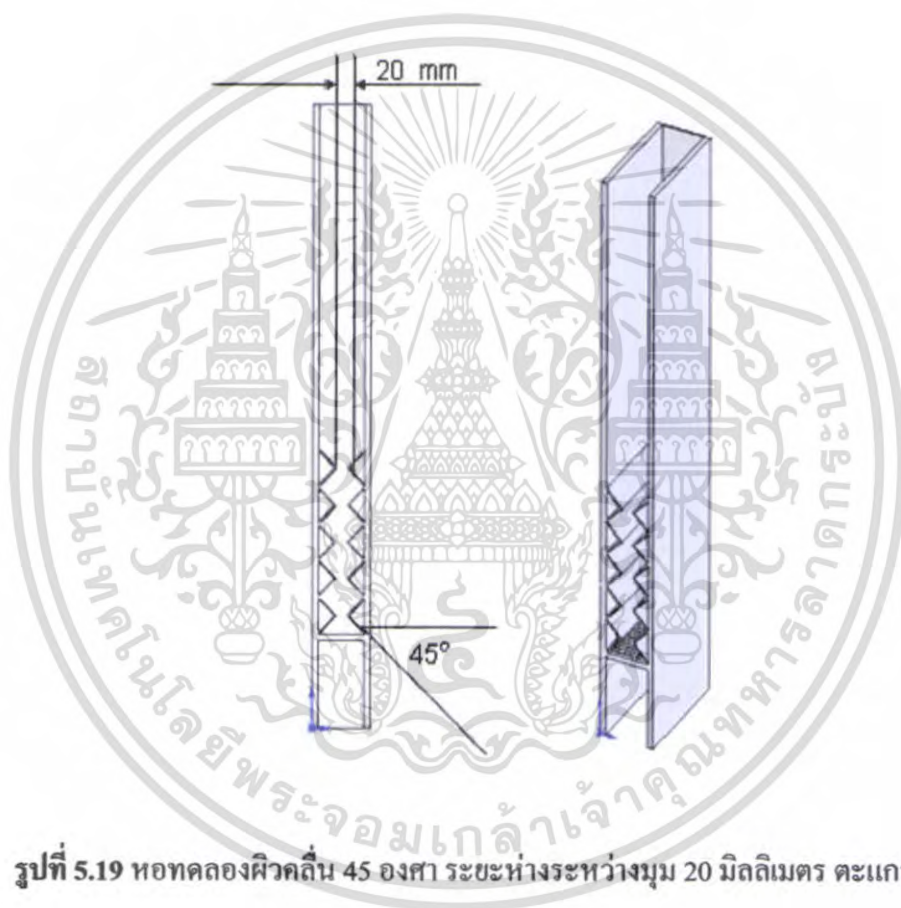
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทากดองที่ติดแผ่นขยายทำมุม 60 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอยทากดอง 30 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90°C



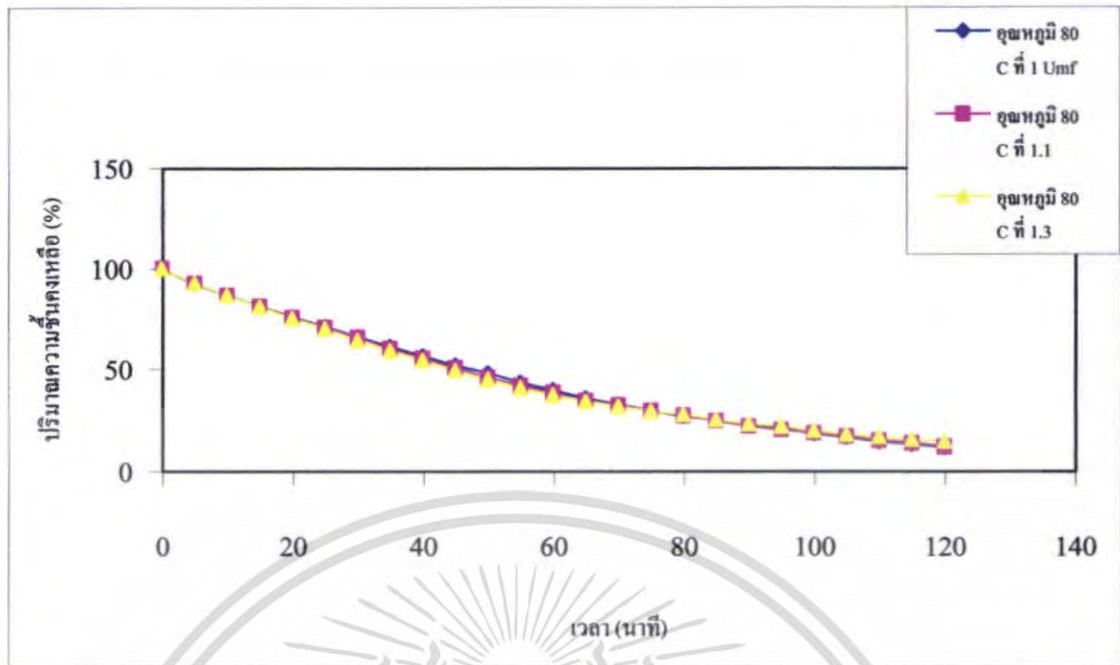
กราฟที่ 5.18 กราฟแสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบผิวคลื่นระหว่างมุม 30,45 และ 60 องศา ตะแกรงติดอยู่ที่ผิวคลื่น โดยนำผลการทดลองที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

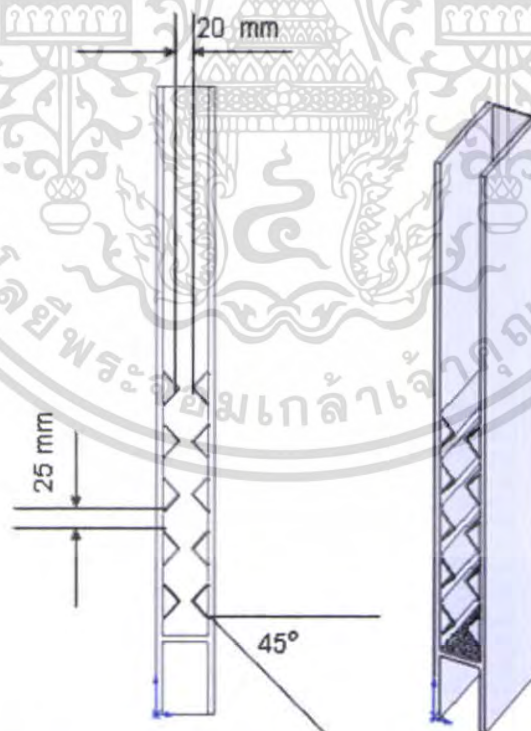
จากกราฟแสดงผลการทดลองของผิวคลื่นในลักษณะต่าง ๆ แล้วนำมาเมล็ดพริกไทยที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาวิเคราะห์ เราพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 90°C ผิวของเมล็ดพริกไทยจะแข็งกรอบ มีสีขาว เป็นลักษณะของการไหม้ ในการอบครั้งต่อไป เราจึงเลือกอบเฉพาะที่อุณหภูมิ 80°C และเนื่องจากอัตราการผลิตของความชื้นจะใกล้เคียงกันในผิวคลื่นทั้ง 3 ลักษณะ เราจึงเลือกใช้ผิวคลื่นมุม 45 องศา ในการอบแห้งเมล็ดพริกไทยเพื่อเปรียบเทียบระหว่างตะแกรงที่ติดอยู่ที่มุมของผิวคลื่น และตะแกรงเต็ม ที่ติดอยู่ใต้ผิวคลื่น ดังกราฟที่แสดงผลการทดลองต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

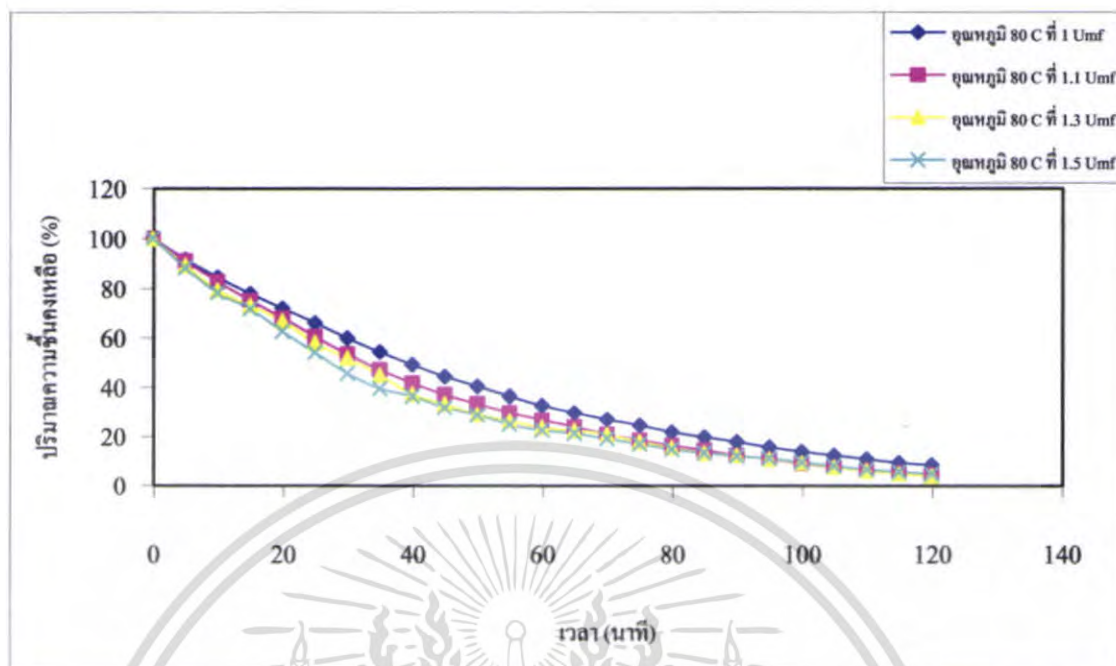


รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทคลองที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอทคลอง 20 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม

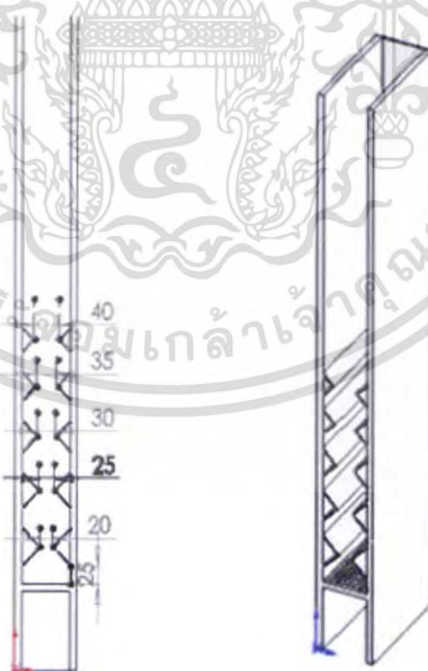


รูปที่ 5.21 หอทคลองผิวคลื่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุม 20 มิลลิเมตร ผิวคลื่นเว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ตะแกรงเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

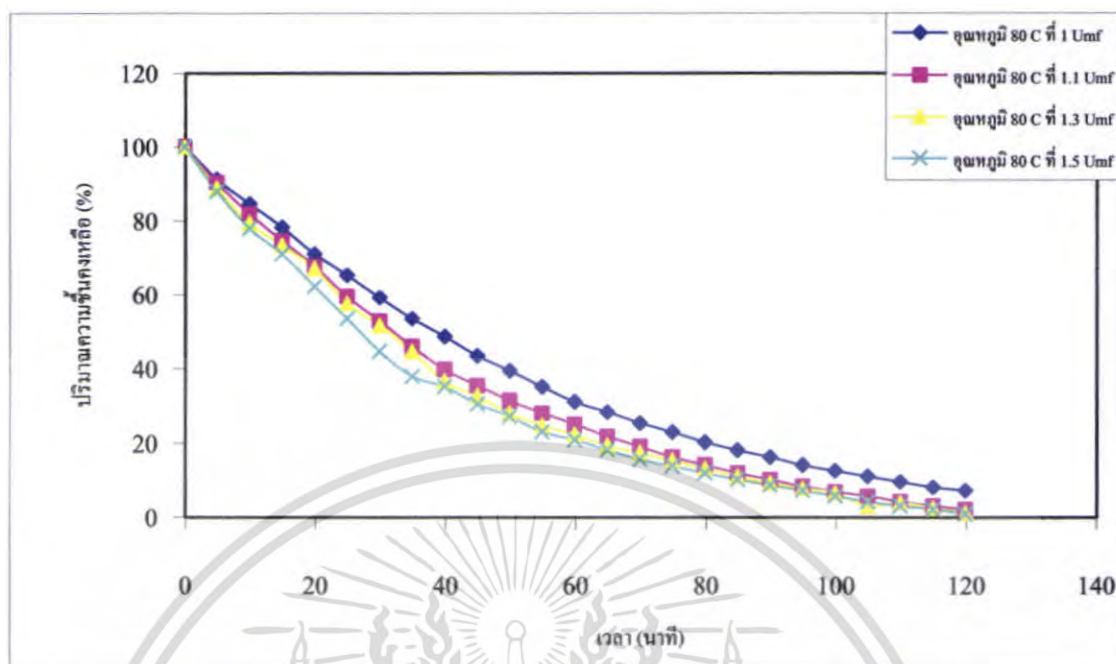


รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดที่คิดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมของหอตลอด 20 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม



รูปที่ 5.22 หอตลอดผิวคลื่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดลง กว้าง 5 มิลลิเมตร ผิวคลื่นเว้น ระยะ 25 มิลลิเมตร ตะแกรงเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

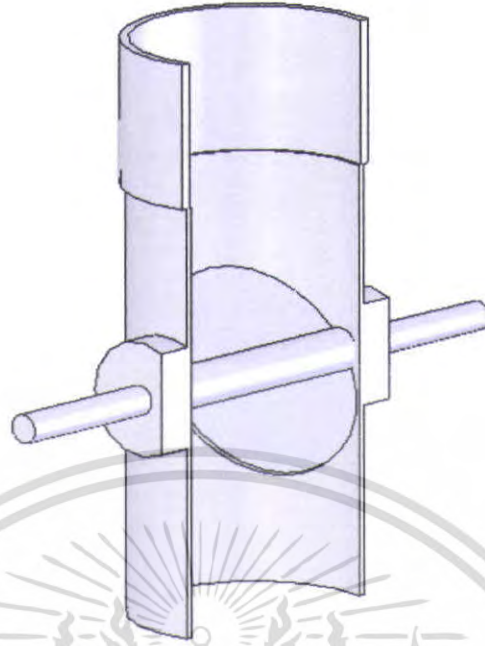


รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองลดขนาดที่ติดแผ่นขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็วต่างๆ ที่อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเดิม

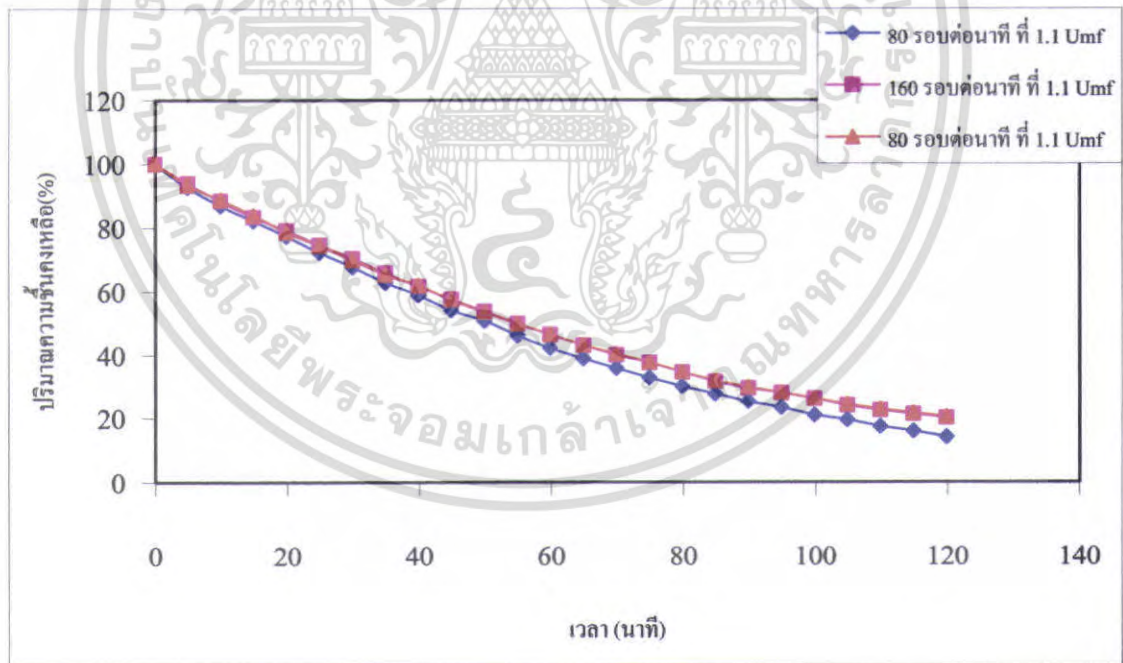
จากกราฟแสดงผลการทดลอง จะเห็นว่า หอทดลองแบบผิวคลื่น มุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ตะแกรงเดิม ดังรูปที่ 5.5 อัตราการลดลงของความชื้นจะเร็วกว่าหอทดลองแบบอื่น ที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นในการทดลองโดยใช้เส้นปีกผีเสื้อที่ตรงบริเวณทางเข้าหอทดลอง เราจึงเลือกใช้หอทดลองแบบนี้ คือดังรูป 5.5

5.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองผิวคลื่นมุม 45 องศา ระยะห่างระหว่างมุมลดขนาดทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร โดยใช้เส้นปีกผีเสื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

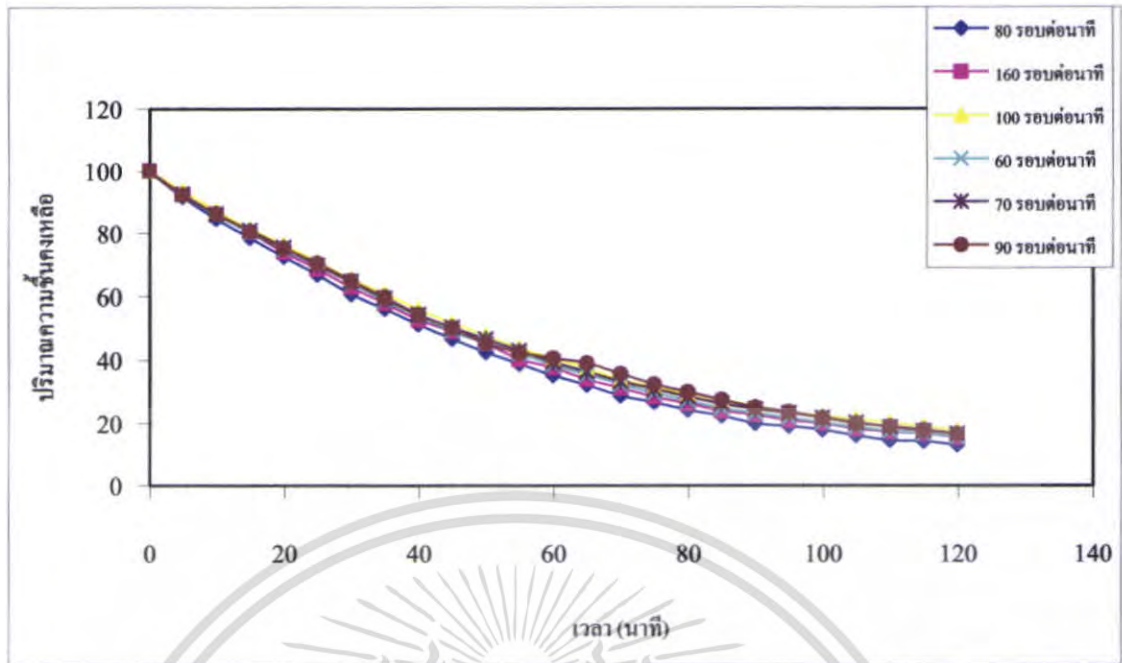


รูปที่ 5.24 แสดงชุดลิ้นปี่คั้นเนื้อ ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของลมโดยเป็นจังหวะ

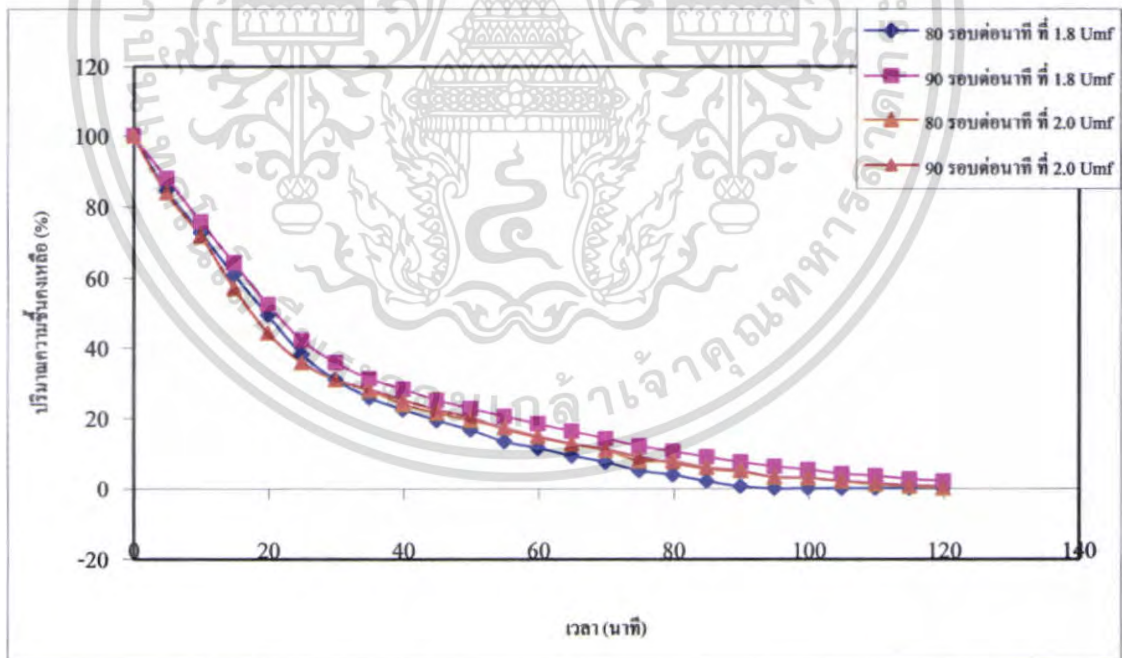


รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาลองลดขนาดที่คิดแผ่น ขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.1 Umf อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ใส่ลิ้นปี่คั้นเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาลองลดขนาดที่คิดแผ่น ขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.3 U_{mf} อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ใส่ล้นปีกผีเสื้อ



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาลองลดขนาดที่คิดแผ่น ขยายทำมุม 45 องศาที่ระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ความเร็ว 1.8 U_{mf} อุณหภูมิ 80°C ตะแกรงเต็ม ใส่ล้นปีกผีเสื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงผลการทดลองที่ใส่ลีนปีกผีเสื้อของหอยทากแบบผิวกลื่น มุม 45 องศา ที่ระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร เว้นระยะ 25 มิลลิเมตร ที่ความเร็วต่างๆ จากรูปที่ 5.25, 5.26 และ 5.27 จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วลม 1.8 *Umf* ลีนปีกผีเสื้อหมุนที่ 80 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทดลอง 80° องศาเซลเซียส อัตราการลดลงของความชื้นจะรวดเร็วมากกว่าแบบอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบเบบธรรมดาหรือแบบหอโล่ง จะพบว่าความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง เพราะที่ความเร็วต่ำ (1.1 *Umf*) สังเกตเห็นในขณะที่ทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก โดยในช่วงแรก ๆ ของปริมาณความชื้นคงเหลือจะลดน้อยกว่าความเร็วสูง (2.0 *Umf*) จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและเมล็ดที่ติดกับขอบข้างของหอตกลงจะ ไม่มีการขยับเมล็ดพริกไทยซึ่งจะอยู่กับที่พอที่เวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมงเมล็ดพริกไทยจะกระจายตัวดีกว่าความเร็วลมสูง (2.0 *Umf*) ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียออกไปจากหอตกลงอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าได้ดี

จากการทดลองโดยติดแผ่นขยายที่ทำมุม 30 45 และ 60 องศา เข้าไปในหอตกลงความเร็วเริ่มมีผลต่อการอบแห้ง โดยจะเห็นว่าความชื้นจะลดลงเร็วขึ้น และความกว้างของหอตกลงก็มีผลเช่นกัน เพราะที่ระยะห่างระหว่างมุม 2 มิลลิเมตรจะลดความชื้นได้มากกว่า 3 มิลลิเมตร และแผ่นขยายทำมุม 45 องศา ยังจะช่วยให้เมล็ดพริกไทยกระจายตัวทั่วทั้งหอตกลง เป็นผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนเพิ่มขึ้น

จากการทดลอง โดยติดแผ่นขยายที่ทำมุมทั้ง 3 แบบ จะเกิดความดันตกคร่อมในเบดสูง เนื่องจากแผ่นตะแกรงกระจายความดันคึดอยู่ที่ผิวคลื่น ภายหลังจึงได้เปลี่ยนตำแหน่งที่คึดคั้งตะแกรง ให้มาอยู่ที่ผิวคลื่น และเปลี่ยนเป็นตะแกรงเต็มหอย จากผลการทดลอง โดยใช้แผ่นขยายทำมุม 45 องศา จะได้ว่า การเว้นระยะของแผ่นขยายให้มีระยะห่าง 25 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างมุมลดลงทีละ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.22 ทำให้การลดลงของความชื้นรวดเร็วมากขึ้น ความดันตกคร่อมในหอก็ลดลงตามไปด้วย

เมื่อนำหอตกลง ดังรูปที่ 5.22 มาทดลองโดยใส่ลินปึกผิเสื่อ จะพบว่า ในกระบวนการอบแห้ง เราทราบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งก็คือ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความดัน แต่จากการทดลองนี้เราจะได้ตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งขึ้นมาอีกหนึ่งตัว ก็คือ ความถี่ ซึ่งจากกราฟแสดงผลการทดลอง ดังรูปที่ 5.27 การลดลงของความชื้นจะลดลงได้อย่างรวดเร็วมาก เมื่อเทียบกับการทดลองในลักษณะที่ผ่านมา และจากการทดลองโดยการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วลม 1.8 *Umf* ความเร็วรอบของลินปึกผิเสื่อ 80 รอบต่อนาที การลดลงของความชื้นจะดีที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการทดลองค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ จะมีผลต่ออัตราการทดลองของปริมาณความชื้นในเมล็ดพืชไทย ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือทำการทดลองที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ปกติ

7.2.2 ในการออกแบบเครื่องทดลองไม่ควรออกแบบให้ระยะห่างของหอททดลองกับแหล่งความร้อน(ฮีตเตอร์)มากเกินไปเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียเนื่องจากเกิดการถ่ายเทกับอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ. 2546. **คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน...?.** กรุงเทพฯ : ดอกหญ้ากรุ๊ป.
2. กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สติธิประภาพร. 2545. “การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง” หน้า 592-595 ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
3. กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. **การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ.** งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท บพิตรการพิมพ์ จำกัด.
4. ัญชุต ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอด โยธิน. 2542. “แบบจำลองการแพร่ความร้อนของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน.” หน้า 268-273. ใน การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
5. วิวัฒน์ วุฒิวิวัฒน์ชัย. 2540. “แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
6. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : หนังสือในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. อนันต์ พงษ์รฤกลพานิช. 2539. “การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไคเซชัน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
8. วรเมธ ทัดทอง. “การศึกษาเชิงทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2546.
9. การุณ เลาะมาน. “การศึกษาการอบแห้งเทคนิคลมหมุนควงแบบมีแผ่นขวาง” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.
10. กิตติชัย พาวขุนทด และคณะ. “การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชันแบบผิวคลื่น” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.
11. สมยศ ภูักกิตพันธ์ และชวลิตศ์ จิตรเที่ยง ‘การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไคเซชัน.’ วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2549.
12. นายจิรเมธา สังข์เกษม ‘การลดพลังงานอบแห้งปลาหมึกด้วยในสเปป้าเค็ดเบคโดยการควบคุมความเร็วอากาศทางเข้าด้วยอินฟิรเรด’ วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
13. Brooker, D.B. Bakker-Arkema, F.D. and Hall, C.W. 1981. **Drying Cereals Grains.** The AVI Publish Company, Inc, Westport, Connecticut.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. Crank, J. 1975. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press.
15. Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985. **Fluidization**. 2nd ed. London : Academic Press
16. 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.
17. 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.
18. Kunii, D. Levenspiel, O. 1991. **Fluidization Engineering**. 2nd. United States of America : Butterworth-Heinemann.
19. Mawatari, Y. Tatemoto, Y. Noda, K. 2003. "Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed." **Power Technology**. 131 : 66-70.
20. Midilli, A. Olgun, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. **Drying Technology**, 20(7), 1503-1513.
21. Montgomery, D.C. 1997. **DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS**. Fourth edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
22. 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.
23. Sharma, R.R. 1999. "Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato." A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
24. Soponronarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. "Cross-flow fluidized bed paddy dryer." **Drying Technology**. 53(8) : 2207-2216
25. Soponronarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORNDRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." **Agricultural Engineering Journal**. 8(4) : 223-231.
26. Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" **Energy Conversion and management**. 43 : 1689-1708.
27. Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minimum Fluidisation Velocity from Correlations: An Observation." **Asia J. Energy Environ**. 2 : 145-154.
28. Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. "Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles." **Applied Thermal Engineering**. 22 : 1763-1775.
29. Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. "Modeling of drying kinetics of single apricot." **Journal of Food Engineering** 58 : 23-32.
30. Cengel, Y. A. et al. **Thermodynamics**. U.S.A : McGraw-Hill Book Company, c1989



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยธรรมดา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุก 200 กรัม

เวลา (นาท)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1 Umf	1.3 Umf	1.8 Umf	2.0 Umf	1.1 Umf	1.3 Umf	1.8 Umf	2.0 Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	196	193	190	189	95.75758	95.75758	93.93939	93.33333
10	192	189	186	185	93.33333	93.33333	91.51515	90.90909
15	189	184	184	182	90.30303	90.30303	90.30303	89.09091
20	185	181	180	177	88.48485	88.48485	87.87879	86.06061
25	183	177	177	173	86.06061	86.06061	86.06061	83.63636
30	179	175	174	169	84.84848	84.84848	84.24242	81.21212
35	176	172	171	165	83.0303	83.0303	82.42424	78.78788
40	173	169	166	160	81.21212	81.21212	79.39394	75.75758
45	170	166	161	156	79.39394	79.39394	76.36364	73.33333
50	167	163	158	151	77.57576	77.57576	74.54545	70.30303
55	164	159	154	146	75.15152	75.15152	72.12121	67.27273
60	161	157	150	140	73.93939	73.93939	69.69697	63.63636
65	158	153	145	134	71.51515	71.51515	66.66667	60
70	154	151	142	129	70.30303	70.30303	64.84848	56.9697
75	151	148	138	124	68.48485	68.48485	62.42424	53.93939
80	148	145	132	118	66.66667	66.66667	58.78788	50.90909
85	146	142	124	109	64.84848	64.84848	53.93939	47.87879
90	142	139	120	99	63.0303	63.0303	51.51515	44.84848
95	145	136	114	94	61.21212	61.21212	47.87879	38.18182
100	136	132	109	90	58.78788	58.78788	44.84848	34.54545
105	132	129	105	88	56.9697	56.9697	42.42424	32.12121
110	130	126	101	86	55.15152	55.15152	40	30.90909
115	128	123	96	83	53.33333	53.33333	36.9697	29.09091
120	125	119	93	81	50.90909	50.90909	35.15152	27.87879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอธรรมดา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	185	184	183	180	90.90909	90.30303	89.69697	87.87879
10	173	170	167	165	83.63636	81.81818	80	78.78788
15	162	158	156	154	76.9697	74.54545	73.33333	72.12121
20	151	148	146	139	70.30303	68.48485	67.27273	63.0303
25	140	134	132	125	63.63636	60	58.78788	54.54545
30	132	123	122	111	58.78788	53.33333	52.72727	46.06061
35	125	112	110	101	54.54545	46.66667	45.45455	40
40	116.5	102	98	96	49.39394	40.60606	38.18182	36.9697
45	107	93	91	89	43.63636	35.15152	33.93939	32.72727
50	100.5	86	85	84	39.69697	30.90909	30.30303	29.69697
55	94	82	80	78	35.75758	28.48485	27.27273	26.06061
60	87.5	77	76	74	31.81818	25.45455	24.84848	23.63636
65	82.5	75	74	72	28.78788	24.24242	23.63636	22.42424
70	78	72	71	69	26.06061	22.42424	21.81818	20.60606
75	73	68	66	65	23.0303	20	18.78788	18.18182
80	69	65	62	61	20.60606	18.18182	16.36364	15.75758
85	66	61	59	59	18.78788	15.75758	14.54545	14.54545
90	62	59	57	57	16.36364	14.54545	13.33333	13.33333
95	59	57	55	54	14.54545	13.33333	12.12121	11.51515
100	57	53	52	52	13.33333	10.90909	10.30303	10.30303
105	54	50	49	48	11.51515	9.090909	8.484848	7.878788
110	52	46	45	45	10.30303	6.666667	6.060606	6.060606
115	49	45.6	43	43	8.484848	6.424242	4.848485	4.848485
120	48	44	42	42	7.878788	5.454545	4.242424	4.242424

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.2 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอระดมคา ต่อ

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.8Umf	2.0Umf	1.8Umf	2.0Umf
0	200	200	100	100
5	178	177	86.66667	86.06061
10	161	159	76.36364	75.15152
15	152	149	70.90909	69.09091
20	136	131	61.21212	58.18182
25	121	112	52.12121	46.66667
30	107	98	43.63636	38.18182
35	95	90	36.36364	33.33333
40	88	85	32.12121	30.30303
45	85	80	30.30303	27.27273
50	80	76	27.27273	24.84848
55	76	73	24.84848	23.0303
60	73	70	23.0303	21.21212
65	70	66	21.21212	18.78788
70	67	62	19.39394	16.36364
75	64	59	17.57576	14.54545
80	61	56	15.75758	12.72727
85	58	52	13.93939	10.30303
90	56	50	12.72727	9.090909
95	54	48	11.51515	7.878788
100	52	46	10.30303	6.666667
105	48	44	7.878788	5.454545
110	45	42	6.060606	4.242424
115	43	40	4.848485	3.030303
120	42	39	4.242424	2.424242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอระดมคา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	181	179	177	170	88.48485	87.27273	86.06061	81.81818
10	154	152	151	141	72.12121	70.90909	70.30303	64.24242
15	135	130	130	114	60.60606	57.57576	57.57576	47.87879
20	116	109	108	102	49.09091	44.84848	44.24242	40.60606
25	100	95	95	93	39.39394	36.36364	36.36364	35.15152
30	89	87	87	86	32.72727	31.51515	31.51515	30.90909
35	83	82	81	81	29.09091	28.48485	27.87879	27.87879
40	81	79	78	76	27.87879	26.66667	26.06061	24.84848
45	76	74	74	72	24.84848	23.63636	23.63636	22.42424
50	69	67	66	64	20.60606	19.39394	18.78788	17.57576
55	66	64	62	60	18.78788	17.57576	16.36364	15.15152
60	62	60	58	56	16.36364	15.15152	13.93939	12.72727
65	57	55	53	53	13.33333	12.12121	10.90909	10.90909
70	55	53	49	49	12.12121	10.90909	8.484848	8.484848
75	50	49	46	47	9.090909	8.484848	6.666667	7.272727
80	47	46	45	45	7.272727	6.666667	6.060606	6.060606
85	44	43	43	43	5.454545	4.848485	4.848485	4.848485
90	41	41	41	41	3.636364	3.636364	3.636364	3.636364
95	40	40	39	39	3.030303	3.030303	2.424242	2.424242
100	40	39	39	38	3.030303	2.424242	2.424242	1.818182
105	39	38	38	38	2.424242	1.818182	1.818182	1.818182
110	38	37	37	37	1.818182	1.212121	1.212121	1.212121
115	37	36	36	36	1.212121	0.606061	0.606061	0.606061
120	37	36	35	35	1.212121	0.606061	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของอาหารรรมดา ต่อ

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)		ความชื้นคงเหลือ(%)	
	1.8Umf	2.0Umf	1.8Umf	2.0Umf
0	200	200	100	100
5	167	166	80	79.39394
10	137	134	61.81818	60
15	110	108	45.45455	44.24242
20	94	91	35.75758	33.93939
25	88	87	32.12121	31.51515
30	81	81	27.87879	27.87879
35	76	75	24.84848	24.24242
40	71	70	21.81818	21.21212
45	68	65	20	18.18182
50	63	62	16.9697	16.36364
55	58	58	13.93939	13.93939
60	54	53	11.51515	10.90909
65	52	51	10.30303	9.69697
70	48	46	7.878788	6.666667
75	46	44	6.666667	5.454545
80	44	42	5.454545	4.242424
85	41	41	3.636364	3.636364
90	40	39	3.030303	2.424242
95	39	38	2.424242	1.818182
100	37	37	1.212121	1.212121
105	36	36	0.606061	0.606061
110	35	35	0	0
115	35	34	0	0
120	34	33	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.4 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยมุกคลื่น 30 องศา ห่าง 2 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาท)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	187	188	185	183	92.12121	92.72727	90.90909	89.69697
10	177	176	170	166	86.06061	85.45455	81.81818	79.39394
15	167	164	149	143	80	78.18182	69.09091	65.45455
20	157	152	129	121	73.93939	70.90909	56.9697	52.12121
25	147	139	110	105	67.87879	63.0303	45.45455	42.42424
30	136	124	101	94	61.21212	53.93939	40	35.75758
35	126	108	96	90	55.15152	44.24242	36.9697	33.33333
40	114	99	91	84	47.87879	38.78788	33.93939	29.69697
45	103	91	85	80	41.21212	33.93939	30.30303	27.27273
50	93	87	79	75	35.15152	31.51515	26.66667	24.24242
55	86	83	74	72	30.90909	29.09091	23.63636	22.42424
60	80	79	71	69	27.27273	26.66667	21.81818	20.60606
65	76	71	68	67	24.84848	21.81818	20	19.39394
70	72	67	65	63	22.42424	19.39394	18.18182	16.9697
75	68	66	61	59	20	18.78788	15.75758	14.54545
80	65	64	59	57	18.18182	17.57576	14.54545	13.33333
85	62	61	56	54	16.36364	15.75758	12.72727	11.51515
90	60	59	53	51	15.15152	14.54545	10.90909	9.69697
95	58	57	49	47	13.93939	13.33333	8.484848	7.272727
100	56	54	46	45	12.72727	11.51515	6.666667	6.060606
105	54	50	43	42	11.51515	9.090909	4.848485	4.242424
110	52	49	41	40	10.30303	8.484848	3.636364	3.030303
115	50	46	39	38	9.090909	6.666667	2.424242	1.818182
120	49	46	38	38	8.484848	6.666667	1.818182	1.818182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฉีกเส้น 30 องศา ห่าง 2 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf	1.8 Umf	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf	1.8 Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	181	180	178	177	88.48485	87.87879	86.66667	86.06061
10	160	160	154	151	75.75758	75.75758	72.12121	70.30303
15	144	140	125	122	66.06061	63.63636	54.54545	52.72727
20	125	119	109	104	54.54545	50.90909	44.84848	41.81818
25	108	103	94	92	44.24242	41.21212	35.75758	34.54545
30	94	90	87	86	35.75758	33.33333	31.51515	30.90909
35	86	83	82	81	30.90909	29.09091	28.48485	27.87879
40	80	78	77	75	27.27273	26.06061	25.45455	24.24242
45	76	72	71	71	24.84848	22.42424	21.81818	21.81818
50	71	68	67	66	21.81818	20	19.39394	18.78788
55	66	62	62	62	18.78788	16.36364	16.36364	16.36364
60	62	58	57	57	16.36364	13.93939	13.33333	13.33333
65	58	54	52	54	13.93939	11.51515	10.30303	11.51515
70	54	51	50	51	11.51515	9.69697	9.090909	9.69697
75	51	46	45	48	9.69697	6.66667	6.060606	7.878788
80	47	42	42	46	7.272727	4.242424	4.242424	6.666667
85	45	39	39	44	6.060606	2.424242	2.424242	5.454545
90	42	37	38	42	4.242424	1.212121	1.818182	4.242424
95	40	35	36	41	3.030303	0	0.606061	3.636364
100	38	34	35	41	1.818182	0	0	3.636364
105	37	33	34	40	1.212121	0	0	3.030303
110	36	32	33	39	0.606061	0	0	2.424242
115	36	30	32	38	0.606061	0	0	1.818182
120	35	29	31	37	0	0	0	1.212121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.6 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฝักลิ้น 30 องศา ห่าง 3 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf	1.8 Umf	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf	1.8 Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	187	184	183	183	92.12121	90.30303	89.69697	89.69697
10	175	171	168	166	84.84848	82.42424	80.60606	79.39394
15	164	158	152	148	78.18182	74.54545	70.90909	68.48485
20	153	144	133	126	71.51515	66.06061	59.39394	55.15152
25	141	129	114	108	64.24242	56.9697	47.87879	44.24242
30	130	115	100	96	57.57576	48.48485	39.39394	36.9697
35	120	102	93	90	51.51515	40.60606	35.15152	33.33333
40	109	91	88	86	44.84848	33.93939	32.12121	30.90909
45	99	83	83	82	38.78788	29.09091	29.09091	28.48485
50	91	78	79	79	33.93939	26.06061	26.66667	26.66667
55	85	73	76	76	30.30303	23.0303	24.84848	24.84848
60	79	69	72	73	26.66667	20.60606	22.42424	23.0303
65	76	66	68	69	24.84848	18.78788	20	20.60606
70	72	62	65	65	22.42424	16.36364	18.18182	18.18182
75	68	59	62	62	20	14.54545	16.36364	16.36364
80	65	56	59	59	18.18182	12.72727	14.54545	14.54545
85	62	53	56	56	16.36364	10.90909	12.72727	12.72727
90	59	50	54	54	14.54545	9.090909	11.51515	11.51515
95	57	47	52	52	13.33333	7.272727	10.30303	10.30303
100	54	45	50	49	11.51515	6.060606	9.090909	8.484848
105	52	43	48	47	10.30303	4.848485	7.878788	7.272727
110	50	41	46	46	9.090909	3.636364	6.666667	6.666667
115	47	39	44	45	7.272727	2.424242	5.454545	6.060606
120	45	37	43	44	6.060606	1.212121	4.848485	5.454545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยพิวคลีน 30 องศา ห่าง 3 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	177	177	173	173	86.06061	86.06061	83.63636	83.63636
10	155	153	144	142	72.72727	71.51515	66.06061	64.84848
15	134	129	116	113	60	56.9697	49.09091	47.27273
20	112	108	98	92	46.66667	44.24242	38.18182	34.54545
25	98	94	91	85	38.18182	35.75758	33.93939	30.30303
30	90	86	84	80	33.33333	30.90909	29.69697	27.27273
35	83	80	79	76	29.09091	27.27273	26.66667	24.84848
40	78	75	74	72	26.06061	24.24242	23.63636	22.42424
45	73	70	70	69	23.0303	21.21212	21.21212	20.60606
50	69	65	65	65	20.60606	18.18182	18.18182	18.18182
55	64	61	62	62	17.57576	15.75758	16.36364	16.36364
60	60	57	57	58	15.15152	13.33333	13.33333	13.93939
65	56	53	54	54	12.72727	10.90909	11.51515	11.51515
70	54	50	51	52	11.51515	9.090909	9.69697	10.30303
75	52	48	49	50	10.30303	7.878788	8.484848	9.090909
80	49	45	47	48	8.484848	6.060606	7.272727	7.878788
85	46	43	45	46	6.666667	4.848485	6.060606	6.666667
90	44	41	44	45	5.454545	3.636364	5.454545	6.060606
95	43	39	43	44	4.848485	2.424242	4.848485	5.454545
100	42	38	43	43	4.242424	1.818182	4.848485	4.848485
105	41	37	41	43	3.636364	1.212121	3.636364	4.848485
110	40	36	41	42	3.030303	0.606061	3.636364	4.242424
115	40	35	41	42	3.030303	0	3.636364	4.242424
120	39	35	40	41	2.424242	0	3.030303	3.636364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.8 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยมุกคลื่น 45 องศา ห่าง 2 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาทึ)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	188	186	185	185	92.72727	91.51515	90.90909	90.90909
10	175	174	169	162	84.84848	84.24242	81.21212	76.9697
15	163	161	145	139	77.57576	76.36364	66.66667	63.0303
20	152	147	125	118	70.90909	67.87879	54.54545	50.30303
25	141	131	108	102	64.24242	58.18182	44.24242	40.60606
30	128	116	98	93	56.36364	49.09091	38.18182	35.15152
35	117	103	90	86	49.69697	41.21212	33.33333	30.90909
40	105	94	85	82	42.42424	35.75758	30.30303	28.48485
45	95	87	81	78	36.36364	31.51515	27.87879	26.06061
50	88	84	77	74	32.12121	29.69697	25.45455	23.63636
55	82	80	76	71	28.48485	27.27273	24.84848	21.81818
60	79	75	71	66	26.66667	24.24242	21.81818	18.78788
65	74	72	67	62	23.63636	22.42424	19.39394	16.36364
70	70	68	63	58	21.21212	20	16.9697	13.93939
75	66	64	59	54	18.78788	17.57576	14.54545	11.51515
80	63	62	55	52	16.9697	16.36364	12.12121	10.30303
85	60	58	51	49	15.15152	13.93939	9.69697	8.484848
90	56	54	48	46	12.72727	11.51515	7.878788	6.666667
95	53	52	46	44	10.90909	10.30303	6.666667	5.454545
100	50	49	44	41	9.090909	8.484848	5.454545	3.636364
105	47	46	42	39	7.272727	6.666667	4.242424	2.424242
110	45	44	40	38	6.060606	5.454545	3.030303	1.818182
115	42	41	38	35	4.242424	3.636364	1.818182	0
120	40	40	36	34	3.030303	3.030303	0.606061	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.9 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฉีกเส้น 45 องศา ห่าง 2 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุก 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	182	181	174	173	89.09091	88.48485	84.24242	83.63636
10	163	161	148	141	77.57576	76.36364	68.48485	64.24242
15	143	141	120	113	65.45455	64.24242	51.51515	47.27273
20	124	120	100	96	53.93939	51.51515	39.39394	36.9697
25	107	103	93	87	43.63636	41.21212	35.15152	31.51515
30	94	93	86	81	35.75758	35.15152	30.90909	27.87879
35	87	86	80	76	31.51515	30.90909	27.27273	24.84848
40	81	80	75	71	27.87879	27.27273	24.24242	21.81818
45	77	76	70	66	25.45455	24.84848	21.21212	18.78788
50	72	70	66	61	22.42424	21.21212	18.78788	15.75758
55	67	66	62	57	19.39394	18.78788	16.36364	13.33333
60	63	62	58	54	16.9697	16.36364	13.93939	11.51515
65	60	59	54	50	15.15152	14.54545	11.51515	9.090909
70	55	54	51	47	12.12121	11.51515	9.69697	7.272727
75	50	50	49	45	9.090909	9.090909	8.484848	6.060606
80	49	48	47	43	8.484848	7.878788	7.272727	4.848485
85	48	47	45	42	7.878788	7.272727	6.060606	4.242424
90	46	44	43	41	6.666667	5.454545	4.848485	3.636364
95	43	42	42	39	4.848485	4.242424	4.242424	2.424242
100	41	41	41	38	3.636364	3.636364	3.636364	1.818182
105	40	40	39	37	3.030303	3.030303	2.424242	1.212121
110	39	39	38	36	2.424242	2.424242	1.818182	0.606061
115	39	38	37	35	2.424242	1.818182	1.212121	0
120	38	37	36	34	1.818182	1.212121	0.606061	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.10 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวกลิ้น 45 องศา ห่าง 3 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	189	188	180	178	93.33333	92.72727	87.87879	86.66667
10	180	177	163	161	87.87879	86.06061	77.57576	76.36364
15	170	167	143	140	81.81818	80	65.45455	63.63636
20	161	158	124	121	76.36364	74.54545	53.93939	52.12121
25	152	149	110	106	70.90909	69.09091	45.45455	43.0303
30	144	139	102	97	66.06061	63.0303	40.60606	37.57576
35	135	128	96	90	60.60606	56.36364	36.9697	33.33333
40	125	119	89	85	54.54545	50.90909	32.72727	30.30303
45	118	110	86	81	50.30303	45.45455	30.90909	27.87879
50	109	100	83	77	44.84848	39.39394	29.09091	25.45455
55	100	94	78	73	39.39394	35.75758	26.06061	23.0303
60	93	90	74	70	35.15152	33.33333	23.63636	21.21212
65	87	86	70	67	31.51515	30.90909	21.21212	19.39394
70	83	83	67	64	29.09091	29.09091	19.39394	17.57576
75	81	80	64	61	27.87879	27.27273	17.57576	15.75758
80	77	77	61	58	25.45455	25.45455	15.75758	13.93939
85	75	74	58	55	24.24242	23.63636	13.93939	12.12121
90	71	72	55	52	21.81818	22.42424	12.12121	10.30303
95	69	69	52	50	20.60606	20.60606	10.30303	9.090909
100	67	68	50	48	19.39394	20	9.090909	7.878788
105	65	65	48	46	18.18182	18.18182	7.878788	6.666667
110	63	61	46	44	16.9697	15.75758	6.666667	5.454545
115	60	60	45	42	15.15152	15.15152	6.060606	4.242424
120	58	59	43	41	13.93939	14.54545	4.848485	3.636364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.11 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวกลิ้น 45 องศา ห่าง 3 ชม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	182	174	170	168.7	89.09091	84.24242	81.81818	81.0303
10	160	153	139	135	75.75758	71.51515	63.0303	60.60606
15	141	130	104	101	64.24242	57.57576	41.81818	40
20	123	109	94	92	53.33333	44.84848	35.75758	34.54545
25	106	95	88	85	43.0303	36.36364	32.12121	30.30303
30	94	86	81	79	35.75758	30.90909	27.87879	26.66667
35	86	80	77	74	30.90909	27.27273	25.45455	23.63636
40	80	75	72	69	27.27273	24.24242	22.42424	20.60606
45	76	71	67	64	24.84848	21.81818	19.39394	17.57576
50	71	67	64	60	21.81818	19.39394	17.57576	15.15152
55	67	63	60	56	19.39394	16.9697	15.15152	12.72727
60	63	59	56	54	16.9697	14.54545	12.72727	11.51515
65	58	54	52	50	13.93939	11.51515	10.30303	9.090909
70	54	51	50	47	11.51515	9.69697	9.090909	7.272727
75	51	48	46	45	9.69697	7.878788	6.666667	6.060606
80	48	45	44	43	7.878788	6.060606	5.454545	4.848485
85	46	44	43	42	6.666667	5.454545	4.848485	4.242424
90	43	42	41	41	4.848485	4.242424	3.636364	3.636364
95	43	40	39	39	4.848485	3.030303	2.424242	2.424242
100	41	40	39	39	3.636364	3.030303	2.424242	2.424242
105	40	39	39	38	3.030303	2.424242	2.424242	1.818182
110	40	39	38	38	3.030303	2.424242	1.818182	1.818182
115	39	38	38	38	2.424242	1.818182	1.818182	1.818182
120	39	38	38	38	2.424242	1.818182	1.818182	1.818182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.12 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวดิน 60 องศา 2 ชม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	190	186	184	186	93.93939	91.51515	90.30303	91.51515
10	176	172	167	168	85.45455	83.0303	80	80.60606
15	166	158	150	151	79.39394	74.54545	69.69697	70.30303
20	154	143	133	134	72.12121	65.45455	59.39394	60
25	143	128	117	117	65.45455	56.36364	49.69697	49.69697
30	131	113	102	105	58.18182	47.27273	40.60606	42.42424
35	118	101	91	97	50.30303	40	33.93939	37.57576
40	106	93	85	90	43.0303	35.15152	30.30303	33.33333
45	97	86	81	86	37.57576	30.90909	27.87879	30.90909
50	89	82	77	83	32.72727	28.48485	25.45455	29.09091
55	84	77	73	79	29.69697	25.45455	23.0303	26.66667
60	80	74	70	75	27.27273	23.63636	21.21212	24.24242
65	75	71	67	71	24.24242	21.81818	19.39394	21.81818
70	72	66	63	69	22.42424	18.78788	16.9697	20.60606
75	68	63	60	65	20	16.9697	15.15152	18.18182
80	65	59	57	62	18.18182	14.54545	13.33333	16.36364
85	61	56	54	59	15.75758	12.72727	11.51515	14.54545
90	58	53	51	56	13.93939	10.90909	9.69697	12.72727
95	55	50	49	54	12.12121	9.090909	8.484848	11.51515
100	52	48	46	51	10.30303	7.878788	6.666667	9.69697
105	49	45	44	49	8.484848	6.060606	5.454545	8.484848
110	47	44	42	47	7.272727	5.454545	4.242424	7.272727
115	45	42	40	46	6.060606	4.242424	3.030303	6.666667
120	43	40	38	44	4.848485	3.030303	1.818182	5.454545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.13 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฉิวคลื่น 60 องศา ห่าง 2 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	183	176	173	170	89.69697	85.45455	83.63636	81.81818
10	164	152	146	142	78.18182	70.90909	67.27273	64.84848
15	145	128	120	115	66.66667	56.36364	51.51515	48.48485
20	125	106	99	97	54.54545	43.0303	38.78788	37.57576
25	107	93	89	90	43.63636	35.15152	32.72727	33.33333
30	94	85	83	84	35.75758	30.30303	29.09091	29.69697
35	87	78	78	77	31.51515	26.06061	26.06061	25.45455
40	81	74	73	73	27.87879	23.63636	23.0303	23.0303
45	76	68	68	68	24.84848	20	20	20
50	71	62	64	64	21.81818	16.36364	17.57576	17.57576
55	66	58	60	60	18.78788	13.93939	15.15152	15.15152
60	62	54	56	54	16.36364	11.51515	12.72727	11.51515
65	58	50	52	52	13.93939	9.090909	10.30303	10.30303
70	53	47	49	49	10.90909	7.272727	8.484848	8.484848
75	49	43	46	46	8.484848	4.848485	6.666667	6.666667
80	46	40	43	42	6.666667	3.030303	4.848485	4.242424
85	44	37	41	40	5.454545	1.212121	3.636364	3.030303
90	41	36	39	38	3.636364	0.606061	2.424242	1.818182
95	38	35	38	37	1.818182	0	1.818182	1.212121
100	38	34	37	37	1.818182	0	1.212121	1.212121
105	37	33	36	37	1.212121	0	0.606061	1.212121
110	36	31	35	35	0.606061	0	0	0
115	35	31	34	34	0	0	0	0
120	35	31	34	34	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.14 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยมุกคลื่น 60 องศาห่าง 3 ซม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	185	185	184	182	90.90909	90.90909	90.30303	89.09091
10	174	171	164	159	84.24242	82.42424	78.18182	75.15152
15	164	159	154	136	78.18182	75.15152	72.12121	61.21212
20	153	146	139	114	71.51515	67.27273	63.0303	47.87879
25	143	132	125	99	65.45455	58.78788	54.54545	38.78788
30	132	118	110	92	58.78788	50.30303	45.45455	34.54545
35	121	104	99	86	52.12121	41.81818	38.78788	30.90909
40	112	95	95	82	46.66667	36.36364	36.36364	28.48485
45	102	88	87	78	40.60606	32.12121	31.51515	26.06061
50	91	83	82	75	33.93939	29.09091	28.48485	24.24242
55	87	78	75	71	31.51515	26.06061	24.24242	21.81818
60	83	74	71	68	29.09091	23.63636	21.81818	20
65	77	70	68	64	25.45455	21.21212	20	17.57576
70	75	68	64	62	24.24242	20	17.57576	16.36364
75	70	63	61	59	21.21212	16.9697	15.75758	14.54545
80	69	60	58	56	20.60606	15.15152	13.93939	12.72727
85	65	57	55	53	18.18182	13.33333	12.12121	10.90909
90	61	55	53	51	15.75758	12.12121	10.90909	9.69697
95	59	52	50	49	14.54545	10.30303	9.090909	8.484848
100	56	49	47	46	12.72727	8.484848	7.272727	6.666667
105	53	47	45	44	10.90909	7.272727	6.060606	5.454545
110	51	45	44	43	9.69697	6.060606	5.454545	4.848485
115	49	43	43	42	8.484848	4.848485	4.848485	4.242424
120	48	42	42	41	7.878788	4.242424	4.242424	3.636364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.15 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยมวกคลื่น 60 องศา ห่าง 3 ชม.

อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1.8Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	178	178	177	172	86.66667	86.66667	86.06061	83.0303
10	159	159	147	143	75.15152	75.15152	67.87879	65.45455
15	141	139	119	116.9	64.24242	63.0303	50.90909	49.63636
20	123	118	101	97	53.33333	50.30303	40	37.57576
25	106	102	91	88	43.0303	40.60606	33.93939	32.12121
30	93	91	85	83	35.15152	33.93939	30.30303	29.09091
35	86	86	79	78	30.90909	30.90909	26.66667	26.06061
40	81	81	74	74	27.87879	27.87879	23.63636	23.63636
45	76	76	69	70	24.84848	24.84848	20.60606	21.21212
50	72	72	65	66	22.42424	22.42424	18.18182	18.78788
55	68	68	62	62	20	20	16.36364	16.36364
60	64	64	58	59	17.57576	17.57576	13.93939	14.54545
65	61	61	54	56	15.75758	15.75758	11.51515	12.72727
70	58	58	51	53	13.93939	13.93939	9.69697	10.90909
75	55	54	48	50	12.12121	11.51515	7.878788	9.090909
80	52	52	46	48	10.30303	10.30303	6.666667	7.878788
85	49	49	44	46	8.484848	8.484848	5.454545	6.666667
90	47	47	43	44	7.272727	7.272727	4.848485	5.454545
95	45	45	42	43	6.060606	6.060606	4.242424	4.848485
100	43	42	41	42	4.848485	4.242424	3.636364	4.242424
105	42	41	40	41	4.242424	3.636364	3.030303	3.636364
110	41	41	39	40	3.636364	3.636364	2.424242	3.030303
115	40	40	38	40	3.030303	3.030303	1.818182	3.030303
120	39	39	38	39	2.424242	2.424242	1.818182	2.424242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.17 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวคลื่น 45 องศา ขอคคลื่นห่าง 2 ซม. ตะแกรงเต็ม ระยะห่าง 2.5 ซม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เปรอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1 Umf	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf	1 Umf	1.1 Umf	1.3 Umf	1.5 Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	186	185	182	180.5	91.51515	90.90909	89.09091	88.18182
10	174.5	171.5	166	164	84.54545	82.72727	79.39394	78.18182
15	163.5	159	155.5	153	77.87879	75.15152	73.0303	71.51515
20	153.5	147	145	138	71.81818	67.87879	66.66667	62.42424
25	143.5	134.5	130.5	124	65.75758	60.30303	57.87879	53.93939
30	133.5	123	120.5	110	59.69697	53.33333	51.81818	45.45455
35	124.5	112.5	109	100	54.24242	46.9697	44.84848	39.39394
40	116	103.5	96.5	95	49.09091	41.51515	37.27273	36.36364
45	108	96	90	87.5	44.24242	36.9697	33.33333	31.81818
50	101.5	90	83	82.5	40.30303	33.33333	29.09091	28.78788
55	95	84	78.5	76	36.36364	29.69697	26.36364	24.84848
60	89	79	74	72	32.72727	26.66667	23.63636	22.42424
65	84	75.4	72	70	29.69697	24.48485	22.42424	21.21212
70	79.5	69.5	69.5	66.5	26.9697	20.90909	20.90909	19.09091
75	75.5	65.5	64.5	63	24.54545	18.48485	17.87879	16.9697
80	71	62	60.5	59.5	21.81818	16.36364	15.45455	14.84848
85	67.5	59	57	57	19.69697	14.54545	13.33333	13.33333
90	64.5	55.5	55.5	55	17.87879	12.42424	12.42424	12.12121
95	61	53	53	53.5	15.75758	10.90909	10.90909	11.21212
100	58	50	50.5	51	13.93939	9.090909	9.393939	9.69697
105	55.5	47.5	47.5	48.5	12.42424	7.575758	7.575758	8.181818
110	53	46	45	46	10.90909	6.666667	6.060606	6.666667
115	50.5	44	43	44.5	9.393939	5.454545	4.848485	5.757576
120	49		41.5	43	8.484848	4.545455	3.939394	4.848485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.18 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผิวกลิ้น 45 องศา ถัดขนาด ตะแกรงเดิม
ระยะห่าง 2.5 ซม. อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เปรอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf	1Umf	1.1Umf	1.3Umf	1.5Umf
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	185.5	184	181.5	180	91.21212	90.30303	88.78788	87.87879
10	174	170	166	162.5	84.24242	81.81818	79.39394	77.27273
15	164	158	156	150	78.18182	74.54545	73.33333	69.69697
20	152	146.5	145.5	135.5	70.90909	67.57576	66.9697	60.90909
25	142.5	133	130	121	65.15152	59.39394	57.57576	52.12121
30	132	122	120	106.5	58.78788	52.72727	51.51515	43.33333
35	123	110.5	108.5	95.5	53.33333	45.75758	44.54545	36.66667
40	115	100.5	95.5	91	48.48485	39.69697	36.66667	33.93939
45	106.5	93.5	89	83.5	43.33333	35.45455	32.72727	29.39394
50	100	87	81.5	78	39.39394	31.51515	28.18182	26.06061
55	93	81.5	76	71	35.15152	28.18182	24.84848	21.81818
60	86.5	76.5	72	67.5	31.21212	25.15152	22.42424	19.69697
65	82	71	67	63	28.48485	21.81818	19.39394	16.9697
70	77	66.5	64	59	25.45455	19.09091	17.57576	14.54545
75	73	62	60.5	56	23.0303	16.36364	15.45455	12.72727
80	68.5	58	57	53	20.30303	13.93939	13.33333	10.90909
85	65	55	53.5	49	18.18182	12.12121	11.21212	8.484848
90	62	52	50.5	47.5	16.36364	10.30303	9.393939	7.575758
95	58.5	49	48	45	14.24242	8.484848	7.878788	6.060606
100	56	46.5	46	42.5	12.72727	6.969697	6.666667	4.545455
105	53.5	44.5	44	40	11.21212	5.757576	5.454545	3.030303
110	51	42	41.5	38	9.69697	4.242424	3.939394	1.818182
115	48.5	40	39	36.5	8.181818	3.030303	2.424242	0.909091
120	47	38.5	37	34.5	7.272727	2.121212	1.212121	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.20 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฉิวคลื่น 45 องศา ถดขนาด ไล่ลิ้นปีกมีเนื้อ 1.3 Umf
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ความชื้นในอากาศ 67-70%RH
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)				ความชื้นคงเหลือ(%)			
	60 rpm	80 rpm	100 rpm	160 rpm	60 rpm	80 rpm	100 rpm	160 rpm
0	200	200	200	200	100	100	100	100
5	187	186	189.5	187.5	92.121	91.515	93.636	92.424
10	176.5	174.5	179	177	85.758	84.545	87.273	86.061
15	167.5	164.5	169.5	167.5	80.303	78.485	81.515	80.303
20	158.5	154.5	161	157	74.848	72.424	76.364	73.939
25	150	145	152	148	69.697	66.667	70.909	68.485
30	141	135	143	138.5	64.242	60.606	65.455	62.727
35	132	127.5	135.5	130.5	58.788	56.061	60.909	57.879
40	124	119.5	127.5	122	53.939	51.212	56.061	52.727
45	116.5	112	120.5	116	49.394	46.667	51.818	49.091
50	110	105	114	109.5	45.455	42.424	47.879	45.152
55	104.5	99	107.5	101.5	42.121	38.788	43.939	40.303
60	98.5	93	102	97	38.485	35.152	40.606	37.576
65	93.5	88	97	91	35.455	32.121	37.576	33.939
70	88.5	82.5	91	86.5	32.424	28.788	33.939	31.212
75	84	79	87	82	29.697	26.667	31.515	28.485
80	80	75	83.5	78.5	27.273	24.242	29.394	26.364
85	76	72	80.5	74.5	24.848	22.424	27.576	23.939
90	73.5	68	77	72.5	23.333	20	25.455	22.727
95	71	66.5	74	69.5	21.818	19.091	23.636	20.909
100	68.5	64.5	72	68	20.303	17.879	22.424	20
105	66	61.5	70.5	65	18.788	16.061	21.515	18.182
110	64	59	68.5	63.5	17.576	14.545	20.303	17.273
115	62.5	58.5	66.5	62.5	16.667	14.242	19.091	16.667
120	61	56.5	64.5	60.5	15.758	13.03	17.879	15.455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ตารางคุณสมบัติของอากาศ

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-7}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.8	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-7}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1359	1.665	818	589	222	960	0.613
2600	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

ที่มา [30]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องอบแห้งผัสดกที่มีกรไหลเป็นจังหวะ¹

ธวัชชัย เมฆะ², วีระพงษ์ พรหมแพทย์², สุรเทพ พุกเกษม², พงษ์เจต พรหมวงศ์³

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบควบคุมความเร็วลมเป็นจังหวะ โดยใช้ลิ้นปีกผีเสื้อเป็นตัวควบคุม เพื่อหาความเร็วลม อุณหภูมิ ขนาดของผัสดกและลิ้นปีกผีเสื้อที่เหมาะสม เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพที่สุด จะทำการทดลองโดยใช้ท่ออะคริลิกใสทรงสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 80 มม. ยาว 200 มม. สูง 1000 มม. ในท่อดทดลองจะใส่ผัสดกชนิดต่างๆ ส่วนด้านล่างของท่อดทดลองจะมีลิ้นปีกผีเสื้อ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความเร็วลมที่เข้ามาในท่อให้เป็นจังหวะ ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 82.5 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) เริ่มทดลองที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วของอากาศภายในท่อดทดลอง $1.1 U_{mf}$, $1.3 U_{mf}$, $1.5 U_{mf}$, $1.8 U_{mf}$ และ $2.0 U_{mf}$ โดยใช้เวลาดทดลองแต่ละกรณี 2 ชั่วโมง วัดความชื้นของเมล็ดพริกไทยทุกๆ 5 นาที สิ่งที่ได้จากการทดลองคือ ความเร็วลม อุณหภูมิ ผัสดก ขนาดของลิ้นปีกผีเสื้อ และความเร็วรอบของเพลที่ใช้ในการ เปิด-ปิด ลิ้นปีกผีเสื้อที่เหมาะสมในการอบแห้ง และได้ทราบลักษณะการไหลของอากาศที่มีผลต่อการอบแห้ง

Abstract

The pepper deals with the characteristic study of drying pepper corn with cyclic air velocity fluidization by using a throttle valve to optimize air, velocity, temperature, wavy-surfaced and amplitude (size) of the throttle valve that provides the best efficiency. Transparent rectangular acrylic bed is used with wide 80 mm length 200 mm and 1000 mm. height inside and the throttle valve is introduced at the bed inlet to create air cyclic flow. Experiment with pepper of 82.5% moisture content (wet standard) is employed with varying inlet air temperature at 80° and 90° and air velocity of $1.1 U_{mf}$, $1.3 U_{mf}$, $1.5 U_{mf}$, $1.8 U_{mf}$ and $2.0 U_{mf}$. Drying time and weight pepper corn are measured in every 5 min for 120 min.

© 2008 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: Fluidized-bed; Swirling fluidization and nozzle; initial moisture content

1. บทนำ

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งมีการแปรรูปทั้งแบบพริกไทยสดและพริกไทยแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดสดทั่วไป และพริกไทยแห้งจะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พริกไทยดำและพริกไทยขาว ซึ่งจะนำไปขายทั้งเมล็ดในท้องตลาด และนำไปส่งโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นพริกไทยบดต่อไป

การผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งนอกจากเป็นภาระถนอมอาหารให้มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นวิธีหนึ่งแล้ว เมล็ดพริกไทยแห้งยังสามารถเปลี่ยนรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับมากขึ้นได้อีกด้วย ในปัจจุบันมีการผลิตเมล็ดพริกไทยแห้งทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งกระบวนการผลิตพริกไทยแห้งนั้น ส่วนมากผู้ผลิตมักใช้การผลิตด้วยวิธีตากแห้งตามธรรมชาติโดยใช้พลังงานแสงแดด

¹ ชื่ออังกฤษ "Swirling fluidized wavy-surfaced dryer with cyclic flow" เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

² นักศึกษานิเทศศาสตร์วิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1 รหัส 48015376, 3Q/1 รหัส 48015395 และ 3Q/1 รหัส 48015405 ตามลำดับ

³ รองศาสตราจารย์ประจักษ์ภาควิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kppongie@kmitl.ac.th

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืชให้มีคุณภาพ และ ประสิทธิภาพในการอบแห้งที่ดีที่สุด
2. เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ ในการประหยัดพลังงานที่ใช้ ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ลักษณะที่เป็นรูปทรงกลม เช่น เมล็ดพริกไทย
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง
4. เพื่อศึกษาความถี่ของลมที่มีผลต่อการอบแห้ง

3. นิยามความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกรวมของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้งความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบคือ

3.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่ว ๆ ไป จะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

3.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ), kg

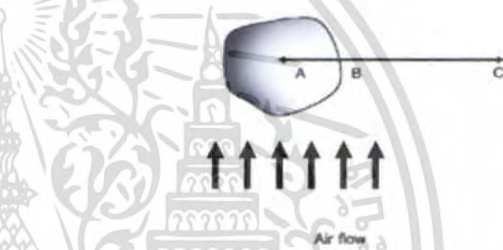
ความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของ กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งผลผลิตทางเกษตรเป็นลิ่งมีชีวิตมีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหารทำให้มวลแห้งลดลงส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

4. การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบด

การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบด สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือการถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหล และการถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับท่อทดลอง การถ่ายเทความร้อนระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหล ขบวนการนี้แบ่งย่อยได้อีก

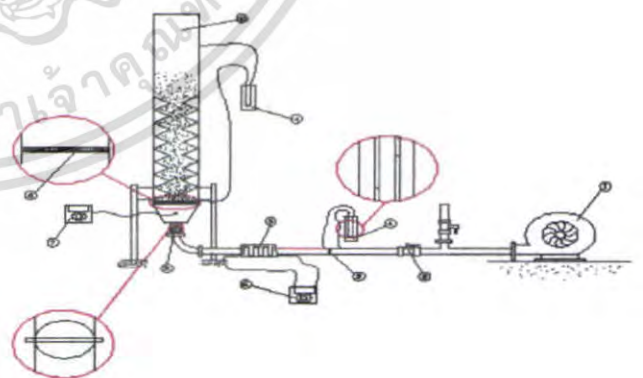
สองประเภท คือ ความร้อนจากของไหลจะถ่ายเทให้กับเม็ดของแข็งในเบด และความร้อนจากเม็ดของแข็งก็จะถ่ายเทให้กับของไหล ในกระบวนการนี้กระทำแบบต่อเนื่องทั้งของไหลและเม็ดของแข็ง การถ่ายเทความร้อนและมวลในฟลูอิดไดซ์เบดการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูป 1 ความร้อนจะทำให้ความชื้นหรือของเหลวที่อยู่ในเม็ดของแข็งเกิดการระเหยเป็นไอแล้วเคลื่อนย้ายออกจากเม็ดของแข็งเข้าสู่ตัวกลางในการอบ ในที่นี้คือ อากาศร้อน ความร้อนที่ถูกเคลื่อนย้ายโดยการพาจากสิ่งแวดล้อม (C) เข้าสู่ผิวของเม็ดของแข็ง (B) และจากผิวของเม็ดของแข็ง (B) ไป (A) โดยการนำความร้อนและความชื้นภายในเม็ดของแข็งถูกเคลื่อนย้ายในทิศตรงกันข้ามบนผิวเม็ดของแข็งความชื้นจะระเหยสู่สิ่งแวดล้อมโดยการพาความร้อน

โดยพาความร้อน



รูป 1 การถ่ายเทความร้อนและมวลในฟลูอิดไดซ์เบดของเมล็ดของแข็ง

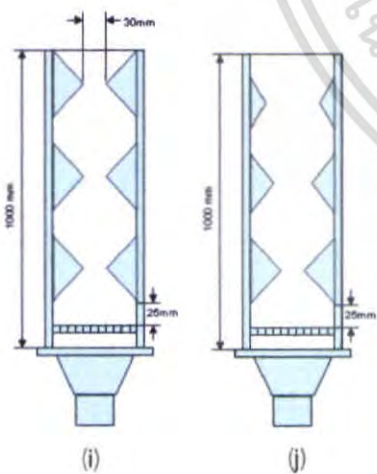
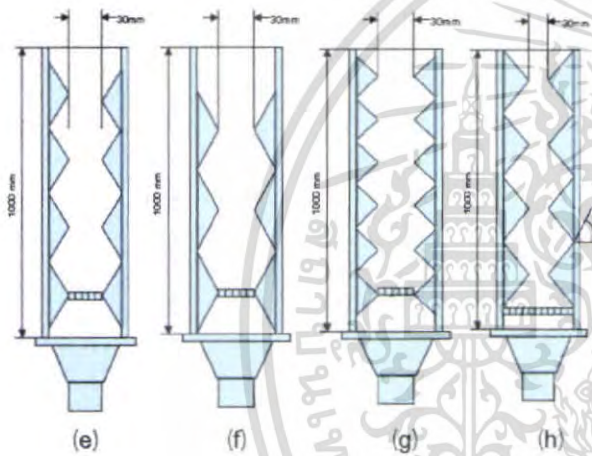
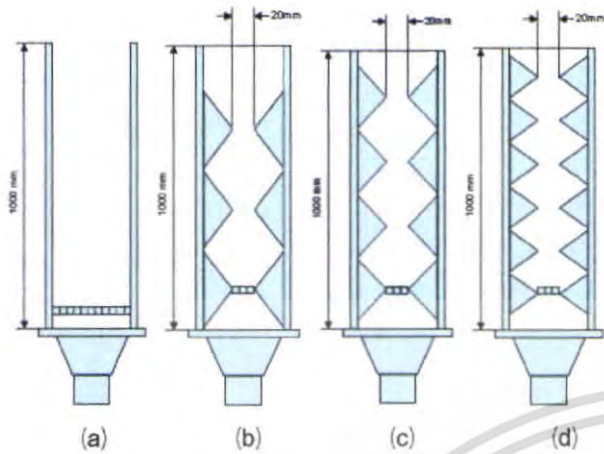
5. อุปกรณ์การทดลอง



1. โบลเวอร์
2. วาล์วจ่ายลม
3. ออร์ฟิส
4. ออร์ฟิสมิเตอร์
5. ชุดลดความร้อน
6. ชุดควบคุมชุดลดความร้อน
7. ชุดวัดอุณหภูมิ
8. แผ่นกระจายลม
9. ท่อทดลอง
10. ลินปิกผีเสื้อ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทอทดลองของเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไครซ์เบด



7. ขั้นตอนการทดลอง

7.1 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้หอทดลองที่ไม่มีล้นปีกผีเสื้อ

1. เปิด ฮีตเตอร์ และ โบลเวอร์

2. ประกอบหอทดลองเหลี่ยมที่ไม่มีผิวคลื่น ดังรูป (a) เข้ากับเครื่องทดลอง

3. ปรับอุณหภูมิฮีตเตอร์ให้มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

4. ปรับโบลเวอร์โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลองที่

1.1 U_{mf}

5. ชั่งเมล็ดพริกไทยให้ได้น้ำหนัก 200 กรัม แล้วเทเข้าไปในหอทดลองทำการจับเวลาทันที

6. นำเมล็ดพริกไทยออกซึ่งทุก 5 นาทีบันทึกค่าสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงและพฤติกรรมของเมล็ดพริกไทย จนถึง 120 นาที

7. บันทึกค่าที่ได้แล้วนำไปพล็อตกราฟ เพื่อหาการลดลงของความชื้น

8. ทำตามขั้นตอน 1-7 แต่ทำการเปลี่ยนขั้นตอนที่ 4 โดยปรับโบลเวอร์

โดยใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลองที่ 1.3 U_{mf} 1.5 U_{mf}

1.8 U_{mf} และ 2.0 U_{mf} ตามลำดับ

9. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 1-8 เสร็จแล้วให้เปลี่ยนหอทดลอง โดยใส่หอทดลองที่มีผิวคลื่น 30,45,60 องศา ตะแกรงอยู่บนยอดคลื่น ยอดคลื่นห่าง 2 ซม. ดังรูป (b),(c),(d) ตามลำดับ

10. และเมื่อทำตามขั้นตอนที่ 1-9 เสร็จแล้วให้เปลี่ยนขั้นตอนที่ 3 โดยปรับอุณหภูมิฮีตเตอร์ให้มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำตามขั้นตอน 1-9 ต่อไป

11. เมื่อทำตามขั้นตอนที่ 1-10 เสร็จแล้วให้เปลี่ยนหอทดลอง โดยใส่หอทดลองที่มีผิวคลื่น 30,45,60 องศา ตะแกรงอยู่บนยอดคลื่น ยอดคลื่นห่าง 3 ซม. ดังรูป (e),(f),(g) ตามลำดับ

7.2 การอบแห้งเมล็ดพริกไทยโดยใช้หอทดลองที่มีล้นปีกผีเสื้อ

1. ทำตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.1 ข้อ 1-5

2. ปรับความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อให้มีความเร็วรอบเท่ากับ 60 70 80 90 100 160 240 rpm ตามลำดับ

3. นำเมล็ดพริกไทยออกซึ่งทุก 5 นาทีบันทึกค่าสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงและพฤติกรรมของเมล็ดพริกไทย จนถึง 120 นาที

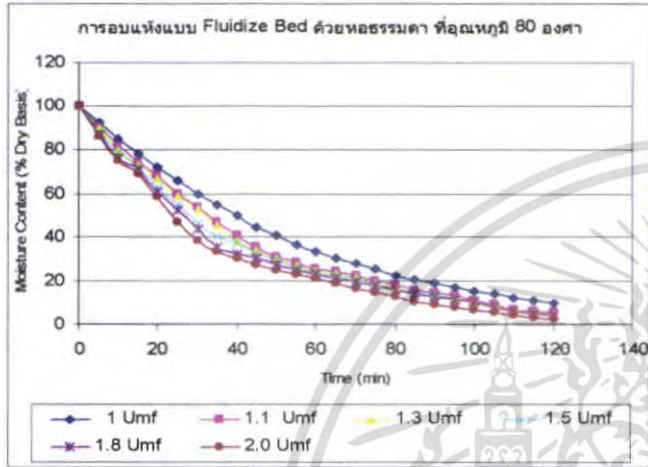
4. บันทึกค่าที่ได้แล้วนำไปพล็อตกราฟ เพื่อหาการลดลงของความชื้นที่ดีที่สุด

5. เมื่อได้ความเร็วรอบของล้นปีกผีเสื้อ และหอทดลองที่ดีที่สุด นำมาประกอบกันแล้วทำการทดลองใหม่อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

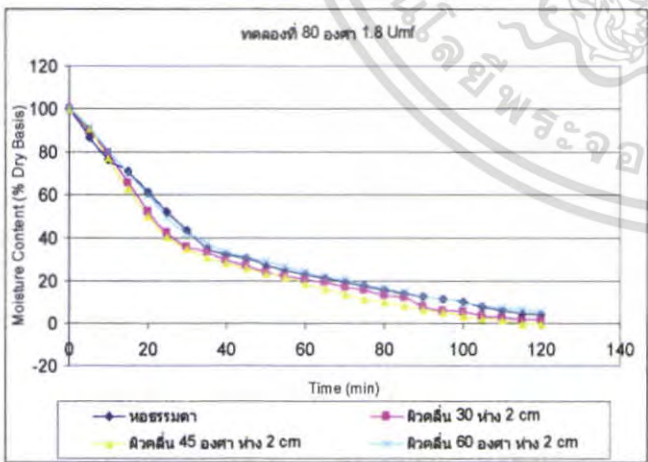
8.ผลการทดลอง

ในรูปที่ 9 แสดงการอบแห้งโดยใช้ความเร็วลม $1.1 U_{mf}$, $1.3 U_{mf}$, $1.5 U_{mf}$, $1.8 U_{mf}$ และ $2.0 U_{mf}$ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หอทดลองแบบธรรมชาติจะเห็นได้ว่าความเร็วลมในหอทดลอง มีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นภายในเมล็ดพริกไทย กล่าวคือ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยดีขึ้น



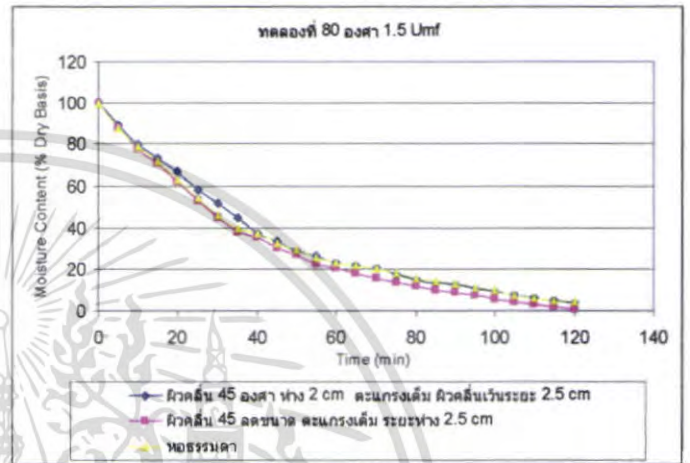
รูปที่ 9 แสดงผลการทดลองเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 10 แสดงการอบแห้งที่มีการเปรียบเทียบระหว่าง หอโล่งกับ หอผิวคลื่นที่มีมุมเท่ากับ 30,45,60 จะเห็นได้ว่า ผิวคลื่นมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย ที่อุณหภูมิเดียวกัน



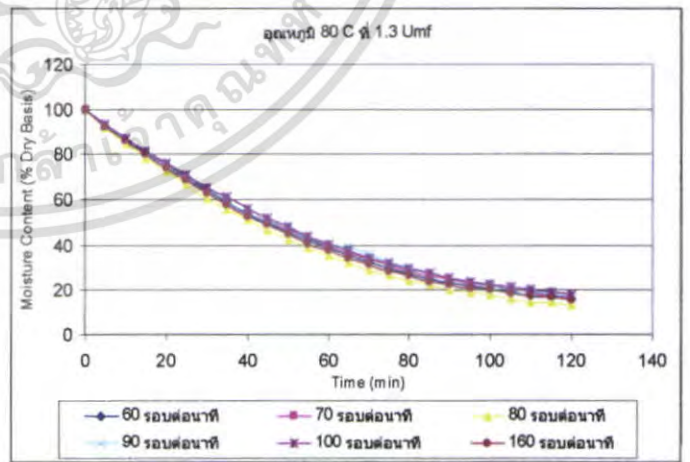
รูปที่ 10 ผิวคลื่นมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย

ในรูปที่ 11 แสดงการอบแห้งโดยการนำหอทดลองที่มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน มาผสมกันเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ดังรูป (j)



รูปที่ 11 แสดงหอทดลองที่ดีที่สุด ของการทดลองนี้

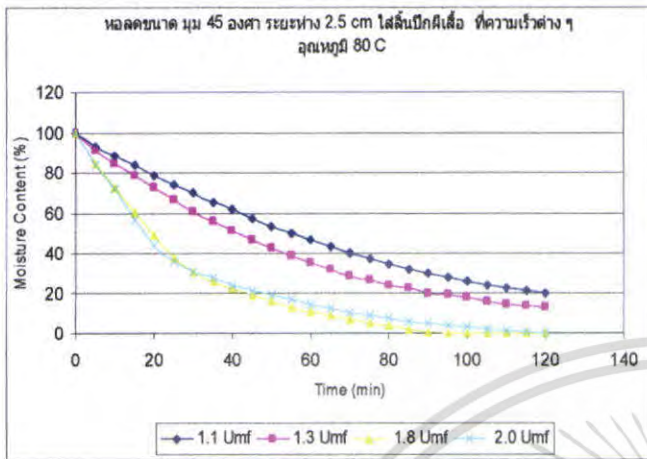
ในรูปที่ 12 แสดงการอบแห้งโดยมีการใส่ลินปึกฝั่เลื้อยหอลดขนาดมุม 45 องศา ระยะห่าง 2.5 ซม. อุณหภูมิ 80 องศา ที่ $1.3 U_{mf}$ โดยพบว่า การเปิด-ปิดของลินปึกฝั่เลื้อยมีผลต่อการทดลอง



รูปที่ 12 แสดงผลการทดลองเมื่อใส่ลินปึกฝั่เลื้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 13 แสดงการหาความเร็วลมที่ดีที่สุดของหอคิวคลิ่น 45 ลดขนาด ตะแกรงเต็ม ระยะห่าง 2.5 ซม. ที่ใส่ลีนปีกผีเสื้อ ที่อุณหภูมิ 80 องศา ความเร็ว 80 รอบต่อนาที



รูปที่ 12 แสดงผลการทดลองเมื่อใส่ลีนปีกผีเสื้อ

9.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันที่ความชื้นเริ่มต้น 82.5% มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอากาศ 80 และ 90 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 67-70% มวลของเมล็ดพริกไทยที่ใช้ในการอบแห้ง 200 กรัม สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 1.การอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันความเร็วลมในหอคิวคลิ่นและคิวคลิ่นมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยที่อุณหภูมิเดียวกัน
- 2.ความเร็วลมมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย พบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยดีขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 9
- 3.คิวคลิ่นมีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าคิวคลิ่นที่มีมุม 45 องศา มีคุณภาพดีที่สุด เมื่อเทียบกับคิวคลิ่นที่มีมุม 30 และ 45 องศา ดังรูปที่ 10

4.จากการทดลองที่ผ่านมา จะพบว่าหอคิวคลิ่นแบบ ตะแกรงเต็มคิวคลิ่นลดขนาด 45 องศา ฐานคิวคลิ่นห่าง 2.5 ซม. มีประสิทธิภาพในการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยดีที่สุดสำหรับการทดลอง ดังรูปที่ 11

5.ความเร็วรอบที่ใช้ในการเปิด-ปิดลีนปีกผีเสื้อ ที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองนี้ คือ 80 รอบ/นาที ดังรูปที่ 12

10.เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, "ฟลูอิดไดเซชัน," สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2528
- [2] วรเมธ ทัดทอง, "การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2546
- [3] การุณ เลาะมาน, "การศึกษารอบแห้งเทคนิคลมหมุนควงแบบมีแผ่นขวาง," วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2547
- [4] สมชาติ ไสภภรณ์ฤทธิ์, "การอบแห้งเมล็ดพืชอาหาร," พิมพ์ครั้งที่ 5, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2535, หน้า 50-60.
- [5] อรุณี ผุดผ่อง, "การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2531, หน้า 1-38.
- [6] D. Kunii, O. Levenspiel, "Fluidization Engineering," John Wiley, New York, 1969
- [7] Davidson, J.F. and Harrison, D., "Fluidized Particles," Cambridge University Press, New York, 1963
- [8] Othmer, D.F., "Fluidization," Reinhold Publishing Corp., New York, 1960

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้