

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น

SWIRLING FLUIDIZED-BED DRYER WITH WAVY SURFACE

นายประดิษฐ์ มงคลคุณ

นายสมหมาย นาร์ตัน

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62404
วัน,เดือน,ปี..... 17 ส.ค. 2549

b..... 41623081
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น
SWIRLING FLUIDIZED-BED DRYER WITH WAVY SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น

SWIRLING FLUIDIZED-BED DRYER WITH WAVY SURFACE

ผู้จัดทำ

1. นายประดิษฐ์ มงคลคุณ รหัสประจำตัว 46015405

2. นายสมหมาย นารัตน์ รหัสประจำตัว 46015422



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น

นาย ประดิษฐ์ มงคลคุณ 46015405

นาย สมหมาย นารัตน์ 46015422

รศ.ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด แบบลมหมุนและผิวคลื่น เพื่อหาค่าความเร็วลม อุณหภูมิ และขนาดของผิวคลื่นที่เหมาะสม เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพที่สุด ทำการทดลองโดยใช้ หออะคลิลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มม. สูง 1000 มม. ภายในหอจะใส่ผิวคลื่นที่มีลักษณะกลมสูงประมาณ 40 มม. ส่วนด้านล่างของหอทดลองจะมีใบพัด ซึ่งใบพัดจะเป็นตัวทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนภายในหอ ในการทดลองใช้เมล็ดพริกไทยที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% (มาตรฐานเปียก) ทดลองที่อุณหภูมิ 80°C และใช้ความเร็วของอากาศภายในหอทดลอง 1.3U_{mf} 1.6U_{mf} และ 2U_{mf} โดยใช้เวลาดทดลองแต่ละกรณี 180 นาทีวัดความชื้นของเมล็ดพริกไทย ทุกๆ 10 นาที

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการใส่ผิวคลื่นในหอทดลอง ช่วยให้ความชื้นที่มีอยู่ในเมล็ดพริกไทยระเหยออกได้เร็วขึ้นเนื่องจากผิวคลื่นทำให้เมล็ดพริกไทยมีการสั่น และไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อนและช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอทดลองเพิ่มมากขึ้นทำให้เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ทำให้การอบแห้งเร็วขึ้น

SWIRLING FLUIDIZED-BED DRYER WITH WAVY SURFACE

Mr. Pradit Mongkolkoon

Mr. Sommai Narat

Assoc.Prof.Dr. Pongjet Promvonge Advisor

ABSTRACT

The paper deals with the drying characteristic study of pepper corn with swirling fluidization; and the insertion of conical-nozzles to optimize velocity, temperature and wave numbers to obtain higher efficiencies. In the experiment, an acrylic cylindrical bed with 130 mm diameter and 1000 mm height is used and inside the bed, conical nozzles with 40 mm height are inserted to create wavy-walled surface. The helical distributor plate is also used to produce swirling flow in the bed. In each test run, the pepper corn with initial moisture content of about 80% w.b. is employed with inlet air temperature at 80°C and varying air inlet velocities as $1.3 U_{mf}$, $1.6 U_{mf}$ and $2 U_{mf}$. Drying time and weight of pepper corns are measured in 10 minute intervals for 3 hours.

From experimental results, it is found that the use of wavy-walled surfaces and the helical distributor in the bed helps to remove the moisture of pepper corn faster since the wavy surface can induce sustained-oscillating flow with high turbulence of hot air and causes the dilute bed leading to higher heat and mass transfer of the moisture in pepper corn.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่าย โดยท่านแรกเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำไม่ว่าจะเป็นทางด้านแนวทางการวิจัย แนวความคิด รวมถึงวิธีการวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณอาจารย์การุณ เสาะมาน ซึ่งคอยดูแลให้คำปรึกษาทางด้านอุปกรณ์การวิจัยต่าง ๆ และยังรวมไปถึงคำแนะนำอย่างดียิ่งที่ได้รับจากคณะกรรมการคุมสอบ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ช่วยให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ จึงต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในการเรียนของผู้วิจัยเป็นอย่างดี ได้แก่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งของผู้วิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ที่ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน ที่ทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายประคิษฐ์ มงคลคุณ
นายสมหมาย นารัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	3
บทที่ 3 ทฤษฎี	9
3.1 กระบวนการอบแห้ง	9
3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่	9
3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง	9
3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ	10
3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช	11
3.3.1 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน	11
3.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ	12
3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังอบ	12
3.6 ฟลูอิดไดเซชัน	13
3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน	13
3.6.2 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด	13
3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	16
3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ε_m)	16
3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน	17
3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง	18
3.8 ก๊าซฟลูอิดไลเซชัน	18
3.9 การหาความเร็วของก๊าซที่ทางเข้า ฟลูอิดไลซ์เบด	20
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	21
4.1 การออกแบบอุปกรณ์การทดลอง	22
4.2 อุปกรณ์การทดลอง	23
4.3 พารามิเตอร์ในการทดลอง	29
4.4 วิธีการทดลอง	29
4.4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน	29
4.4.2 ขั้นตอนการอบเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไลซ์เบด	30
บทที่ 5 ผลการทดลอง	31
5.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทดลองแบบต่างๆ	31
5.2 การเปรียบเทียบเทคนิคฟลูอิดไลซ์เบดแบบธรรมดา กับเทคนิคฟลูอิดไลซ์เบดแบบอื่นๆ	36
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	39
6.1 สรุปผลการทดลอง	39
6.2 ข้อเสนอแนะ	39
ภาคผนวก ก.	42
1.การคำนวณหาความหนาแน่นของเมล็ดพริกไทย	42
2.การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์เบด	43
3.การคำนวณหาขนาดแผ่นกระจายลม	44
ภาคผนวก ข	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการทดลองการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น	30
ตาราง ข.1 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ของหอโถ่งแผ่นกระจายลมแบบธรรมดา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	47
ตาราง ข.2 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ของหอโถ่งแผ่นกระจายลมแบบใบพัด อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	48
ตาราง ข.3 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ของหอผิวคลื่น 8 ลูกแผ่นกระจายลมแบบธรรมดา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	49
ตาราง ข.4 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทย ของหอผิวคลื่น 8 ลูกแผ่นกระจายลมแบบใบพัด อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	50
ตาราง ข.5 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอผิวคลื่น 4 ลูกแผ่นกระจายลมแบบธรรมดา อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	51
ตาราง ข.6 ผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยของหอผิวคลื่น 4 ลูกแผ่นกระจายลมแบบใบพัด อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	52
ตาราง ข.7 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอทดลองแบบต่าง ๆ ที่ความเร็ว 1.3 Umf	53
ตาราง ข.8 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอทดลองแบบต่าง ๆ ที่ความเร็ว 1.6 Umf	54
ตาราง ข.9 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอทดลองแบบต่าง ๆ ที่ความเร็ว 2.0 Umf	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง (Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985)	10
รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [Daizo Kunii, 1991]	15
รูปที่ 3.3 ความความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกับสัดส่วนช่องว่าง (Kunii, D. Levenspiel, O. 1991)	17
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วมวลอากาศ	18
รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไโครเบด	21
รูปที่ 4.2 ชุดผิวกลิ้ง	22
รูปที่ 4.3 ชุดกำเนิดลมหมุน	22
รูปที่ 4.4 ตัวป้อนอากาศ (Blower)	23
รูปที่ 4.5 ชุดควบคุมความเร็วรอบ Blower	23
รูปที่ 4.6 ชุดให้ความร้อน (Heater)	24
รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมชุดให้ความร้อน	24
รูปที่ 4.8 ออร์ฟิซิเตอร์ (Orifice Meter)	25
รูปที่ 4.9 มาโนมิเตอร์ (Manometer)	25
รูปที่ 4.10 ถังพักลม	26
รูปที่ 4.11 แผ่นกระจายลมแบบธรรมดา	26
รูปที่ 4.12 แผ่นกระจายลมหมุน	27
รูปที่ 4.13 ผิวกลิ้งรูปกรวย	27
รูปที่ 4.14 หอทดลองแบบลมหมุนและผิวกลิ้ง	28
รูปที่ 4.15 ทรายซังคิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม	29
รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองแบบโล่ง แผ่นกระจายลมธรรมดา ที่ความเร็วต่างๆ	31
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองแบบผิวกลิ้ง 8 ลูก แผ่นกระจายลมธรรมดา ที่ความเร็วต่างๆ	32
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองแบบผิวกลิ้ง 4 ลูก แผ่นกระจายลมธรรมดา ที่ความเร็วต่างๆ	32
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองแบบโล่ง แผ่นกระจายลมแบบใบพัด ที่ความเร็วต่างๆ	33
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองผิวกลิ้ง 8 ลูก แผ่นกระจายลมแบบใบพัด ที่ความเร็วต่างๆ	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองผิวคลื่น 4 ลูก แผ่นกระจายลมแบบใบพัด ที่ความเร็วต่างๆ	34
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.3 Umf	34
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.6 Umf	35
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 Umf	35
รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบค แบบธรรมดา กับหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบคแบบผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 8 ลูก	36
รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบค แบบธรรมดา กับหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบคแบบผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 4 ลูก	37
รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบค แบบธรรมดา กับหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบคแบบลมหมุน(ใบพัด) หอโล่ง	37
รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบค แบบธรรมดา กับหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบคแบบลมหมุนและผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 8 ลูก	38
รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบค แบบธรรมดา กับหอยทาดลองฟลูอิดไคซ์เบคแบบลมหมุนและผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 4 ลูก	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวทรงกลม, เมตร ²
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, เมตร ² /วินาที
d	มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), กิโลกรัม
d_p	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเม็ดของแข็ง, เมตร
d_p^*	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ
g	อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก, เมตร/ชม. ²
h_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัสดุ
K	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
K_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_1	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
k_2	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
L_{mf}	ความสูงต่ำสุดของเบด, เมตร
M	ปริมาณความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง
M_{eq}	ปริมาณความชื้นที่สภาวะสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_{in}	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก
\bar{M}_t	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
MR	อัตราส่วนความชื้น
N_c	อัตราการระเหยน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่
n	ค่าคงที่ของการอบแห้ง
p	ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ
p_{wb}	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก
Δp	ความดันต่างของเบด, นิวตัน/เมตร ²
Re_{mf}	Reynolds number ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน
r	รัศมีทรงกลม, เมตร
SP	อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ
T	อุณหภูมิอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_{wb}	อุณหภูมิกระเปาะเปียก
t	ระยะเวลาในการอบแห้ง
u_0	ความเร็วของก๊าซในหอทดลอง
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน, เมตร/วินาที
u_t	ความเร็วตกอิสระของของแข็ง
u_t^*	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มวล
V	ปริมาตรทรงกลม, เมตร ³
w	มวลของวัสดุ, กิโลกรัม
ε_m	สัดส่วนช่องว่าง
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
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 อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัสดุด้วยการระเหย ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น โดยทั่วไปจะอาศัยอากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน หรือการพาความร้อนจากแหล่งความร้อนมายังวัสดุ โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย และยังนำความชื้นออกจากวัสดุไปพร้อมๆกันด้วย

1.1 ความสำคัญและที่มา

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งของจังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีการแปรรูปทั้งพริกไทยสดและพริกไทยแห้ง พริกไทยสดจะนำส่งขายตามท้องตลาดทั่วไป และพริกไทยแห้งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ พริกไทยดำและพริกไทยขาว พริกไทยทั้งสองประเภทนี้จะถูกส่งเข้าไปในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทำการผลิตเป็นพริกไทยป่นต่อไป

ในปัจจุบันเมล็ดพริกไทยที่เก็บจากไร่ของเกษตรกร จะถูกนำมาแยกเอาก้านออกให้เหลือแต่เมล็ดล้วนๆ โดยการใช้เครื่องมือที่เกษตรกรได้ผลิตขึ้นมา จากนั้นเกษตรกรจะนำเอาเมล็ดพริกไทยที่ได้นั้นไปตากแดดเพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากเมล็ด จากนั้นจะนำเมล็ดที่แห้งแล้วไปส่งต่อยังโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำไปผลิตเป็นพริกไทยป่น แต่วิธีไล่ความชื้นโดยการตากแดดนั้น ต้องพบปัญหาและอุปสรรคมากมาย เช่น สภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย บางครั้งฝนตก บางครั้งแสงแดดอ่อน ทำให้เมล็ดพริกไทยเกิดเชื้อรา นอกจากสภาพอากาศแล้วยังมีจุลินทรีย์ แมลงเล็กๆ ปัญหาต่างๆเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตเมล็ดพริกไทยทั้งสิ้น เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ทำให้เมล็ดพริกไทยแห้งเร็ว และมีคุณภาพดีขึ้น

และจากการได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชัน ที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการอบเมล็ดพืช พบว่าอุณหภูมิและลักษณะการไหลของลมร้อนภายในหอทดลองมีผลต่อการอบแห้ง จึงได้เกิดแนวความคิดที่จะพัฒนารูปแบบการไหลของลมร้อนภายในหอทดลองขึ้น เพื่อให้การอบแห้งเมล็ดพริกไทยเร็วขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1). เพื่อศึกษาลักษณะการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 2). เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุน และแบบธรรมดาที่มีการใส่ผิวคลื่นภายในหอทดลอง
- 3). เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วลม ขนาดของผิวคลื่น และจำนวนผิวคลื่นที่มีผลต่อการอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1). ศึกษาการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ความเร็ว $1.3U_{mf}$, $1.6U_{mf}$ และ $2.0U_{mf}$
- 2). ศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งเมล็ดพริกไทยแบบลมหมุนโดยใช้ใบพัด และฟลูอิดไดซ์เบดแบบใช้แผ่นกระจายลมธรรมดา
- 3). จะใช้เวลาในการอบแห้งแต่ละ กรณีเป็นเวลา 180 นาที
- 4). ใช้เมล็ดพริกไทยสดหนัก 200 กรัม ในการทดลองแต่ละกรณี
- 5). ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นกระบวนการหนึ่งในงานด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาคุณภาพ ลดความสูญเสีย และยืดระยะเวลาการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศและเงื่อนไขที่กำหนด เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อทำนายการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน

Suksankraisorn, Patumsawad and Fungtammasan (2001) ทำการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน ในห้องเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-500 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายขนาด 500 μm และทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองเทียบกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากสมการการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา (ภาคผนวก ค) พบว่าผลที่ได้จากการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน มีค่าเกินกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตามผู้วิจัยแนะนำว่าการหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันจากสมการการทำนายนั้นจะใช้ได้ดีในช่วงที่แต่ละสมการกำหนด

Mawatari, Tatamoto and Noda (2003) ได้หาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน สำหรับชุดการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการสั่น ซึ่งใช้กลุ่มของอนุภาค Geldart A และ C โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการของ Ergun ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันโดยการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับ Geldart A แต่ Geldart C มีค่าแตกต่างกันเพราะอนุภาครวมตัวกันเป็นก้อน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อนันต์ พงษ์ธรกุลพานิช (2539) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวโพดที่ความชื้นสูง และช่วงอุณหภูมิสูง ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิทางเข้าหอตลอด และอัตราการใช้ลมแห้ง มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ สมการของ Wang-Singh, Page และสมการของ Lewis มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า สมการของ Wang-Singh สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง โดยมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย (2540) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิค ฟลูอิดไดเซชัน โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอุณหภูมิในการอบแห้ง 110-140 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 24.7-33.3 มาตรฐานแห้ง ความสูงเบด 10-15 cm และความเร็วของการอบแห้ง 2.4-4.1 m/s จากการทดลอง พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง และอัตราการไหลจำเพาะ ของอากาศ และพบว่า Page's model มีความเหมาะสมมากที่สุดที่ใช้อธิบายผลการทดลอง

ฉัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ ไสภณรณฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน (2542) พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของข้าวเปลือก ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้สมการ การอบแห้งทางทฤษฎี โดยพิจารณารูปทรงข้าวเปลือกเป็นทรงกระบอกสั้น และใช้แบบจำลองสมการของ Arrhenius พบว่าสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ตลอดช่วงการอบแห้ง และอุณหภูมิของอากาศในการ อบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมากกว่าความชื้นของข้าวเปลือก

Soponronnarit, Kittiporn and Prachayawarakom (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดในเครื่อง อบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง และนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ บนพื้นฐานของพลังงานและคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดอยู่ระหว่าง 19-40% มาตรฐานแห้ง และอบแห้งภายใต้ อุณหภูมิอากาศ 130-175 องศาเซลเซียส ความสูงของเบด 17-22 cm ความเร็วของอากาศ 2.7 m/s และเป็น เวลา 3-7 นาที จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากกว่า 28% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพการ อบแห้งจะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ และปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 4.7-6.7 และ 0.3-0.6 MJ/kg ในการระเหยน้ำตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด น้อยกว่า 23% มาตรฐานแห้ง ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างเล็กน้อยกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศ และ ปริมาณการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 15.2-27.8 และ 0.8-2.0 MJ/kg ในการระเหยน้ำ ตามลำดับ

Sharma (1999) ทำการอบแห้งมันฝรั่งและมะม่วงดิบที่ 4 รูปร่าง (แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกระบอกผ่าครึ่ง และพีรามิด) และสามขนาด (10, 15 และ 20 mm) ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C โดยวิธี ฟลูอิดไดเซชันต่อผลของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับแท่งสี่เหลี่ยม และทรงกระบอก โดยใช้ผลเฉลย อนุกรมอนันต์ (Infinite series solution) บนพื้นฐานของกฎของ Fick (Crank, 1975) พบว่าสำหรับมะม่วงดิบมี ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรง กระบอกอยู่ในช่วง 1.08×10^{-9} และ $3.32 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยม อยู่ในช่วง 4.09×10^{-10} และ $1.18 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และมันฝรั่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทรงกระบอกอยู่ในช่วง 1.43×10^{-9} - $3.75 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ และสำหรับแท่งสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วง 7.55×10^{-10} - $1.40 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนความยาวไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะสูงเมื่ออัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำ และทำการหาค่าคงที่ของการอบแห้งพบว่า ค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น และจะสูงที่สุดที่อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำ และความยาวไม่มีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง

Sarsavadia, Sawhney, Pangavhane and Singh (1999) ทำการทดลองในเครื่องอบแห้งชนิดถาด ในการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งห้วหอมแบบแผ่น 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 พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องสำหรับทำนายอัตราการอบแห้งห้วหอมแผ่น และยังพบอีกว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น และที่ความเร็วสูงสุด อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าน้อย อัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วที่สุด

กิตติชัย ไควรัตน์ศิริชัย และ กิตติ สิริทธิประภาพร (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) งานวิจัยนี้ทำการจำลองทางความร้อนของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไคซ์เบดของอนุภาคเปียกในการศึกษาถึงการขนถ่ายความร้อนและมวล และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง โดยเทียบกับผลการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางความร้อนของการอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดลดลงอย่างฉับพลัน เมื่อปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโพดลดลง และลดลงต่ำสุดที่จุดสิ้นสุดกระบวนการการอบแห้ง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการขนถ่ายความร้อนจากวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ความเร็วอากาศ และปริมาณความชื้นของวัสดุ ผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองสอดคล้องกันดีกับผลการทดลอง

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

ในงานวิจัยนี้สรุปว่าความชื้นจะระเหยเป็นไอได้ดี เมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น และช่องว่างในเบดมีผลกระทบต่ออุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งเล็กน้อย แต่ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเมล็ดธัญพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ที่ได้จากการทดลองพบว่าการใช้เทคนิค Multiple regression analysis ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ 97.3% ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและอุณหภูมิภายในผลเอพริคอต

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 สำหรับทรงกระบอก และเมล็ดหัวสำหรับทรงกลม ตามลำดับ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 15% และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Exponential model ($MR = \exp(-kt)$) และ Page model ($MR = \exp(-kt^n)$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีผลเพียงเล็กน้อยกับขนาดของอนุภาคเมื่อความชื้นถูกพิจารณาในสามมิติ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

Hatamipour and Mowla (2003) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ การหดเหี่ยว ความหนาแน่น และการแพร่ความชื้นของเมล็ดข้าวโพด และถั่วเขียว ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน งานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของวัสดุ ขนาด และการแพร่ของมวลซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นพบว่าอุณหภูมิของอากาศ และความเร็วของอากาศไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ การหดเหี่ยวและความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันเพียงสองอย่างของปริมาณความชื้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

วรเมธ ทัดทอง (2546) ได้ทำการศึกษาตัวแปรของกระบวนการอบแห้งเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด ทำการทดลองโดยใช้ห่ออะคลิลิกใส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร ความสูง 1000 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิที่ทางเข้าของห่อทดลองอยู่ในช่วง 60 – 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลจำเพาะของอากาศอยู่ในช่วง 0.21- 0.43 kg/s - kg dry coffee ความชื้นเริ่มต้น 18% มาตรฐานเปียก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Newton และ Page ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นตาม และที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงสู่ 14% มาตรฐานเปียก ภายในเวลา 5 ชั่วโมง และสรุปได้ว่าอัตราการไหลของอากาศไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง

กิตติชัย พาวนุทนอด สุวิทย์ สุวรรณรุ่งโรจน์ และ เอกรินทร์ จินดาพิ (2547) ได้ทำการศึกษาและทำการทดลองการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด โดยการติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไป วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดพริกไทย ผิวคลื่นที่เพิ่มเข้าไปจะมีลักษณะเป็นกรวยที่มีรูขนาด 1/3 ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห่อทดลอง สูง 85 เซนติเมตร วางสลับกันเป็นลูกคลื่นหลายลูกคลื่นต่อกัน ในการทดลองใช้ฮีทเตอร์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 70,80 และ 100 องศาเซลเซียส และความเร็วของอากาศร้อนภายในห่ออบมีค่า $1.0U_{mf}$ $1.2 U_{mf}$ และ $1.4 U_{mf}$ ผลการทดลองพบว่าเมื่อติดตั้งชุดผิวคลื่นเพิ่มเข้าไปจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนภายในห่อทดลองมากขึ้น ทำให้การอบแห้งเร็วกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาถึง 30%

พงษ์ศักดิ์ หมทอง สกล ผลิระโทก และ สยาม เป็น (2547) ได้ทำการประยุกต์การใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่นสำหรับอบเมล็ดกาแฟ โดยใช้ห่อทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.17 เมตร สูง 1 เมตร ทดลองโดยแบ่งลักษณะภายในห่ออบออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้ ห่ออบแบบธรรมดา ห่ออบแบบผิวคลื่น ห่ออบแบบวงแหวน และห่ออบแบบผิวคลื่นวงแหวน โดยการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลจำเพาะของอากาศและความเร็วลมที่ทางเข้าห่ออบ 4 ถึง 6 เมตรต่อวินาที จากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองสรุปได้ว่าหอบแบบผิวคลื่นสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าหอบลักษณะอื่น ๆ คือสามารถลดความชื้นของเมล็ดกาแฟจาก 66% เหลือเพียง 14% และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งมากที่สุดก็คืออุณหภูมิ

जरศักดิ์ เพ็ญจันทร์ ชัชวาลย์ ทองประภา และ ชานนท์ พงศ์ชัยประสิทธิ์ ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวโพดชนิดฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้เทคนิคลมหมุนควงมาใช้ในการอบอุปกรรมที่ทำให้เกิดการหมุนควงของลมร้อนเป็นเทอร์โบ หอบทดลองทำจากอะคริลิกใส ภายในหอบทดลองจะมีกรวยที่ทำด้วยสังกะสีทำมุม 60 และ 70 องศา กับขอบของตัวเทอร์โบ โดยการทดลองแต่ละครั้งใช้เมล็ดข้าวโพดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80 % มวล 300 กรัม ใช้อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการบันทึกผลทุกๆ 10 นาที ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคลมหมุนควงความเร็วลมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการลดความชื้นของเมล็ดข้าวโพด ที่ความเร็วลมและอุณหภูมิสูงจะทำการอบแห้งได้เร็วกว่าความเร็วและอุณหภูมิต่ำ และพบว่ากรวยที่ทำมุมกับขอบของเทอร์โบที่ 60 องศา ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งดีที่สุด

จากการศึกษาบทความดังกล่าวข้างต้นพอสรุปได้ว่าลักษณะการไหลของอากาศ ความเร็วลม และอุณหภูมิมีผลต่อการอบแห้งเมล็ดพืช แต่เนื่องจากความเร็วและอุณหภูมิเราสามารถควบคุมได้ว่าให้มากหรือน้อย เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบลักษณะการไหลของอากาศ โดยมีแนวความคิดที่ว่า การเพิ่มระยะทางการไหลของลมร้อนให้มากขึ้นภายในหอบทดลองจะช่วยให้ลมร้อนสัมผัสกับเมล็ดพืชได้มากขึ้น และการกระจายตัวกันของเมล็ดพืชภายในหอบทดลองจะช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นการวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบให้มีลักษณะดังกล่าวภายในหอบทดลอง โดยจะใช้แผ่นกระจายแบบใบพัดติดไว้ที่ด้านล่างของหอบ เพื่อเพิ่มระยะทางของลมร้อนให้มากขึ้นก่อนจะหลุดออกนอกหอบไป และจะใช้ผิวคลื่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในแตกต่างกันเพื่อให้เกิดการกระจายของเมล็ดพืชภายในหอบทดลอง

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อให้ความชื้นออกจากวัสดุโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับจากอากาศร้อนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ในกระบวนการอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ (2540)

3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant-rate drying Period)

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

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

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ แสดงว่าความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากอากาศไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอ จากสมการที่ 3.1 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

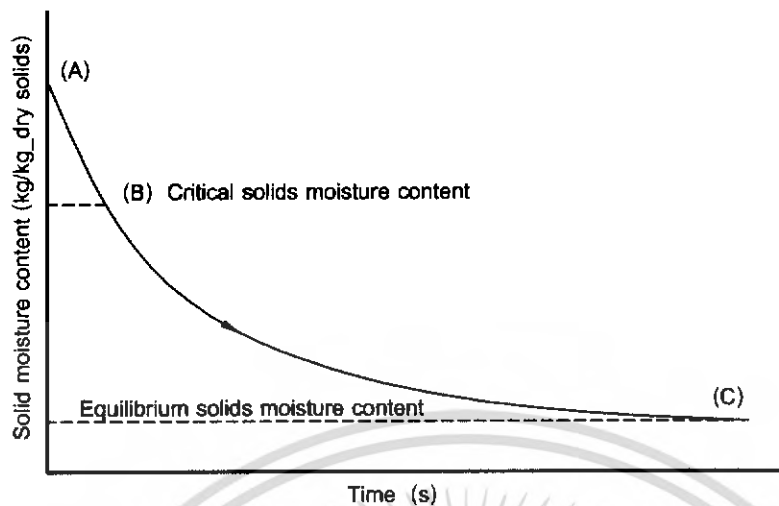
$$N_c = \frac{h_p}{\lambda} (T - T_{wb}) \quad (3.2)$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่วัตถุ, λ คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และ T คือ อุณหภูมิอากาศ

3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling-Rate Drying Period)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแข็งและเวลาในการอบแห้ง (Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985)

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

3.2 นิยามความชื้นในวัสดุ สมชาติ โสภณภทร (2540)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชิ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w

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

ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างในรูปของเปอร์เซ็นต์ $100M_w$

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d

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

เมื่อ w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีน้ำ) , kg

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้เป็นที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์ของกระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ระหว่างการอบแห้ง ที่เกือบคงที่ผลิตทางเกษตรเป็นสิ่งมีชีวิต มีการหายใจ ดังนั้นจึงมีการเผาผลาญสารอาหาร ทำให้มวลแห้งลดลงส่วนใหญ่แล้วมวลแห้งจะลดลงเล็กน้อย

3.3 หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่วไปเรามักจะใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธี และเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้อบแห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ

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

3.3.1 การได้เปรียบ และเสียเปรียบของฟลูอิดไดเซชัน

ข้อเปรียบเทียบการได้เปรียบและการเสียเปรียบระหว่างการใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันกับเทคนิคอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

ข้อได้เปรียบ

1. เนื่องจากเมล็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอด ซึ่งต่างจากเบดนิ่งซึ่งอุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด
2. มีการจัดเรียงตัวของเม็ดของแข็ง เม็ดที่มีน้ำหนักร้อยจะอยู่ส่วนบน เม็ดที่มีน้ำหนักร้อยจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดของเม็ดของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีน้อยกว่ามาก
3. จากคุณสมบัติที่คล้ายกันของไหลจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเดิมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดของแข็งกับของไหลจะมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบคหนึ่งที่ทำพวกเม็ดของแข็งเท่ากันจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสาร

ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาของของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบคสูง ๆ หรือเบคหลายชั้นเปลืองเงินลงทุนมาก
2. มักเกิดฟองก๊าซในเบคเมื่อทำงานกับก๊าซ ทำให้การสัมผัสไม่ดีเป็นการสูญเสียเปลืองเงิน ถ้าต้องเป็นขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและต้องใช้ตัวเร่งช่วยแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลดลง
3. การทำงานมีข้อจำกัดเพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็งก็จะออกจากเบคไปพร้อมกับของไหล
4. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เป็ยหรือเป็นขางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบค

3.4 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุที่มีความสำคัญต่อการศึกษากระบวนการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ด้วย เราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

3.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังอบ

การอบแห้งมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และชีวภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ ความชื้นและการหดตัวของเมล็ดพืชระหว่างการอบแห้งซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าวหรือแตกหักในเมล็ดพืช คุณภาพทางเคมีในเมล็ดพืชบางชนิด ได้แก่ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ความสามารถในการแตกแป้ง และคุณค่าทางอาหารเป็นต้น ส่วนคุณภาพทางชีวภาพได้แก่ความสามารถในการงอกของเมล็ดพืช

อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชหลังการอบแห้งมาก การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปมักทำให้คุณภาพของเมล็ดพืชลดลง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้งจะแตกต่างจากอุณหภูมิของเมล็ดพืช เมื่อเริ่มการอบแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าของอากาศ เมื่อเมล็ดพืชแห้งลงมากแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดอาจมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ

การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวแข็งตัว เมื่อโชนการอบแห้งเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวไปยังชั้นในๆ ของเมล็ด ทำให้ชั้นในสูญเสียความชื้นและหดตัวโดยแยกตัวออกจากผิวที่แข็ง ซึ่งอาจมีผลให้เกิดรอยร้าว แยกแตก ปริหรือหักในเมล็ด ซึ่งขึ้นตอนต่อไปหลังการอบแห้งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมล็ดพืชคือการตีเพื่อเอาเปลือกออก และผลกระทบอีกอย่างคือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเมล็ดคั่วในเปลือกจะแห้งติดกับเปลือกทำให้ขั้นตอนการสีนั้นยาก

ในการทดลองการอบแห้งเมล็ดพืชจะพิจารณาถึงสีของเมล็ดกาแฟคั่วในเปลือก ว่าจะต้องไม่เป็นสีดำ และเมล็ดคั่วในไม่เกาะติดกับเปลือก ซึ่งเป็นคุณภาพสำคัญในขั้นตอนการสี ซึ่งในการทดลองจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยเมล็ดพืชคั่วในเปลือกที่ได้หลังการอบแห้งเริ่มจะมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม และเมล็ดคั่วในยังไม่เกาะติดกับเปลือก

3.6 ฟลูอิดไคซ์เซชัน

ฟลูอิดไคซ์เซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้น สัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอ ที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพฤติตัวคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับ แล้วให้ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นเรื่อยๆ เมื่อของไหลมีความเร็วค่าหนึ่ง จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไคซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไคซ์เซชัน ซึ่งพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.6.1 ประเภทของฟลูอิดไคซ์เซชัน

งานของฟลูอิดไคซ์เซชันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

1. ฟลูอิดไคซ์เซชันแบบสองสถานะ (Two-phase Fluidization) หมายความว่า ในหอตลอดหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบไปด้วยสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดไคซ์เซชันสองสถานะจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือก๊าซฟลูอิดไคซ์เซชัน (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไคซ์เซชันเหลว (Liquid Fluidization)
2. ฟลูอิดไคซ์เซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) หมายความว่าภายในหอตลอดหรือเบดจะประกอบไปด้วยสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลวและก๊าซสำหรับฟลูอิดไคซ์เซชันสามสถานะนั้นเป็นขบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไคซ์เซชันสองสถานะ

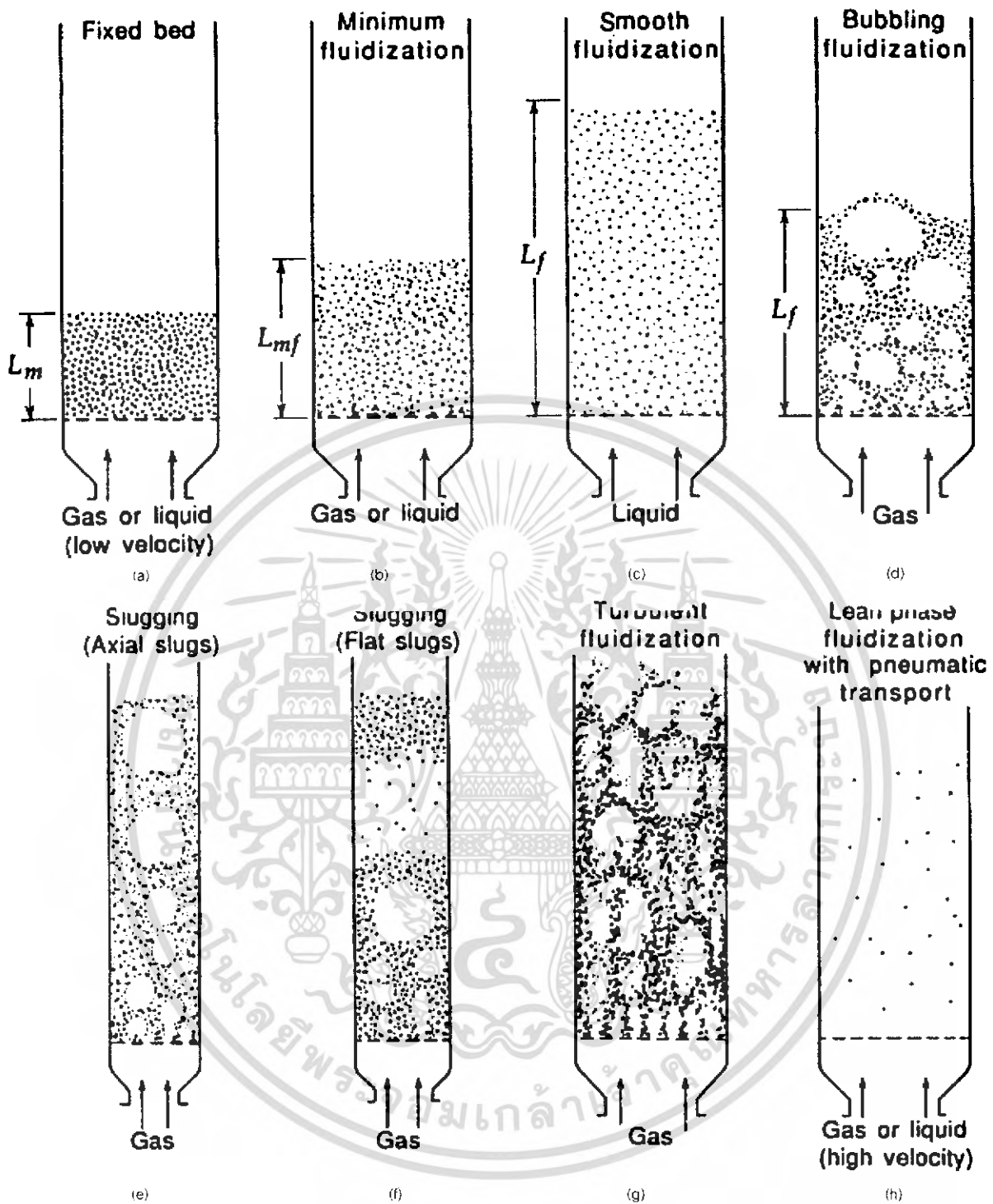
3.6.2 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอตลอดที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่ง หรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอตลอดจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือ ผิวหน้าของเม็ดแข็งที่อยู่ในหอตลอด เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอตลอดเรียบร้อยแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอตลอดอย่างช้า ๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งเริ่มเอกลักษณะเป็นเอกสารที่สวางไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกัน ลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไลเซชัน หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น จะไปทำให้เบคขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกัน เป็นกลุ่มก้อน เบคลักษณะนี้เรียกว่าฟลูอิดไลซ์เบคแบบหนาแน่น (Dense – phase fluidized bed) ถ้าความเร็ว ของไหลมากขึ้นอีกของไหลก็เกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอตลอดอยู่แล้ว เบคลักษณะนี้เรียกว่าฟลู อิดไลซ์เบคเจือจาง (Diluted - phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งก็ จะหลุดลอยออกจากหอตลอดไป ซึ่งในขณะที่เกิดปรากฏการณ์นี้มักใช้ในการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไป ยังอีกที่หนึ่ง ถ้าใช้อากาศ ก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic transport) ตัวอย่างเช่นการขนส่งเม็ดแร่ จากที่ หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง

ลักษณะการคล้ายกับของไหลของฟลูอิดไลซ์เบค ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยอยู่ในลักษณะ ฟลูอิดไลซ์ เซชันแบบหนาแน่นแล้วผิวหน้าของเบคจะเรียบสม่ำเสมอ เหมือนกับผิวหน้าของของไหลที่อยู่ในสถานะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิดไลซ์เบคแบบเดียวกันหรือว่าจัดหอตลอดจนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าของ เบคก็ยังเรียบอยู่เช่นเดิม ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบค วัตถุของแข็ง นั้นจะลอยตัวอยู่ บนผิวหน้าของเบคและหากเบคมีการเจาะรูเม็ดของแข็งนั้นจะลอยผ่านรูออกมาพร้อมกับของ ไหล หรือถ้าเอาเบค สองเบคมาต่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบคที่อยู่สูงกว่าจะไหลไปยังเบคที่มีความสูงต่ำกว่า

จากคุณสมบัติที่ของแข็งในเบคทำหน้าที่คล้ายกับของเหลวนี้ จึงมีประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม อย่างมหาศาล ที่สามารถนำเอาเทคนิคนี้ไปใช้ทำงานในระบบต่อเนื่อง (Continue process) ได้ตั้งในหอตลอดที่มี หลายหลายชั้น เม็ดของแข็งจากชั้นบนจะไหลลงมายังชั้นล่างและไหลออกนอกหอตลอดในที่สุด ในลักษณะ เช่นนี้เหมือนในหอกถั่ว หรือใช้ป้อนของแข็งเข้าทางซ้าย แล้วให้ออกมาทางขวาของหอตลอด ในขณะที่ผ่านเบ คออกมาที่ข้อมต้องมีการเปลี่ยนแปลงบางส่วนอย่างแน่นอน ดังอย่างเช่นการตากแห้งเม็ดธัญญาหาร หรือเม็ด ผลไม้ต่าง ๆ เช่น ถั่ว งา เม็ดข้าวโพด



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไลเซชัน [Daizo Kunii, 1991]

ฟลูอิดไลเซชันแบบที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอการลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 (b) ฟลูอิดไลเซชันแบบที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบคและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจาก ส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมาบางส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตาม ภายในเบคจะเห็นว่า การเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างสุ่มจนวุ่นวายเบคชนิดนี้เรียกว่าฟลูอิด ไคซ์เบควุ่นวาย ดังรูปที่ 3.2 (d)

3.7 กลศาสตร์ของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันมักมีตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบอย่างมาก เพราะ ก่อนที่เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวหรือเกิดฟลูอิดไคซ์เบค เม็ดของแข็งจะพักอยู่บนตระแกรงรองรับ ปล่อยให้ของไหลไหลผ่านไปตามช่องว่างที่อยู่ในเบค ความเร็วของของไหลจึงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเบค ดังรายละเอียดต่อไปนี้

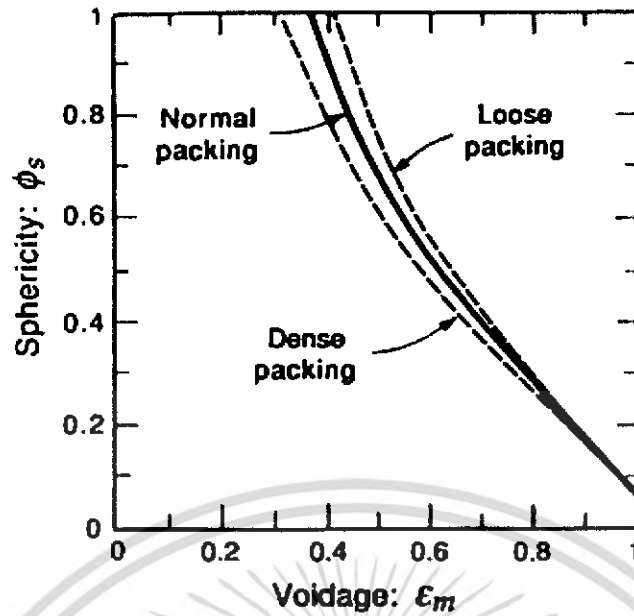
3.7.1 ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ_s)

การวัดค่าความไม่เป็นทรงกลมศึกษาโดย Zenz และ Othmer ปี 1960 ที่อ้างอิงโดย Kunii, D. Levenspiel, O. (1991) โดยความเป็นทรงกลมหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของเม็ดทรงกลมที่มีปริมาตร เท่าเม็ดของแข็งต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ โดยที่เม็ดของแข็งเป็นทรงกลมค่าความเป็นทรงกลมมีค่า เท่ากับหนึ่ง ($\phi_s = 1$) และถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่างๆ ไปค่าความเป็นทรงกลมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ($\phi_s < 1$) เสมอ ซึ่งค่าความเป็นทรงกลมที่ทำการทดลองของเม็ดคอฟฟีนไทยมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากที่สุดจึงสมมติเป็น หนึ่ง

3.7.2 สัดส่วนช่องว่าง (Fraction void, ϵ_m)

กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอหมดตลอด เราสามารถคำนวณหาช่องว่าง ระหว่างเม็ดทรงกลมเหล่านี้ได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดทรงกลมในเบคทำให้เกิด ขนาดของช่องว่างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป แต่ในกรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม Brown และ คณะ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่างไว้ดังรูปที่ 3.3

ในขณะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน ช่องว่างในเบคจะมีการขยายตัว ช่องว่างในขณะนั้นเรียกว่าสัดส่วน ช่องว่างที่เกิดฟลูอิดไคซ์เบค (ϵ_{mf})



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นทรงกลมกับสัดส่วนช่องว่าง (Kunii, D. Levenspiel, O. 1991)

WEN และ YU, 1966 ได้เสนอผลคูณของช่องว่างต่ำสุดและความเป็นทรงกลม เป็นค่าคงที่ และอาจสังเกตได้จากการทดลองของเขาโดยใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ บรรจุลงในเบคแล้วสรุปว่าวัตถุอย่างหนึ่งก็จะมีสัดส่วนช่องว่างอันหนึ่ง ดังสมการ

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

3.7.3 การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน, u_{mf}

ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้นอาจกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า เม็ดของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งเองกับแรงพยุงจากการไหลหรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหลซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้เป็น

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

โดยการประยุกต์สมการ (3.6) กับสมการความดันตกของ ERGUN จะได้

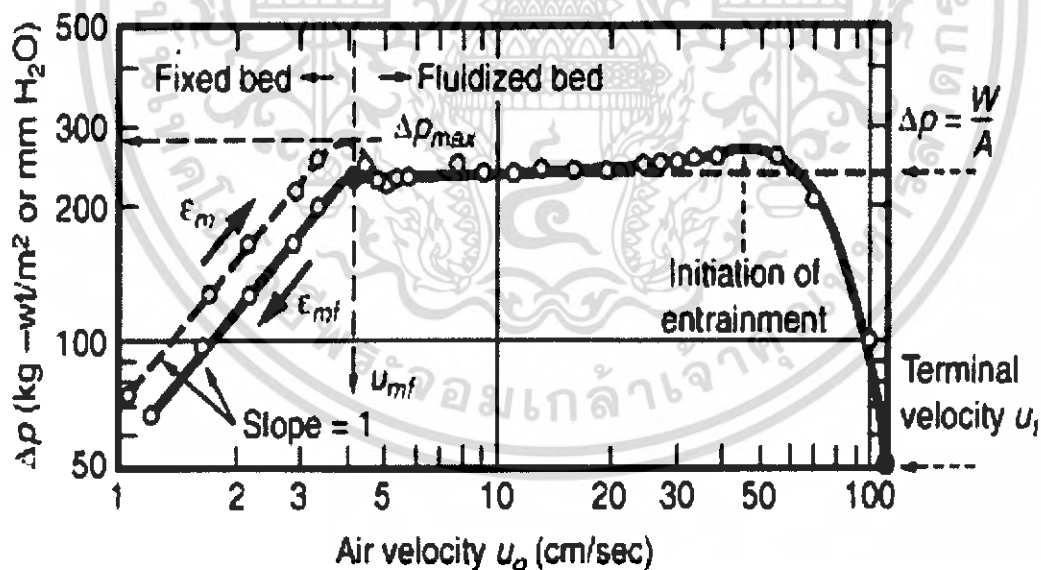
$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \text{Re}_{mf} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$Re_{mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu_g} \quad (3.8)$$

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

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชันสามารถหาได้อีกวิธีการหนึ่ง คือจากการทดลองโดยพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ (Superficial air velocity) ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วอากาศ

3.7.4 ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง, u_t

ในฟลูอิดไลเซชันนั้นมีขอบเขตความเร็วของของไหลอยู่สองอย่างคือ ขอบเขตแรก คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน และขอบเขตที่สองคือ ความเร็วของของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งลอยตัวหลุดออกจากหอตกลง ความเร็วนี้มีขนาดเท่ากับความเร็วตกอิสระของของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Haider และ Levenspiel ได้เสนอการหาค่าความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งดั่งสมการ

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

เมื่อ d_p^* คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งไร้มิติ

โดยที่ $0.5 < \phi_s < 1$ และ

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

ดังนั้นความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ u_i^* คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งไร้มิติ

3.8 ก๊าซฟลูอิดไลซ์เซชัน

ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไลซ์เบดที่เกิดจากก๊าซที่มีความซับซ้อนอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซที่ผ่านเข้าเบด ขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบด ในขณะที่เบดเริ่มมีลักษณะเป็นฟลูอิดไลซ์เซชันใหม่ๆ จะมีส่วนคล้ายกับลักษณะของเบดที่เกิดในฟลูอิดไลซ์ของของเหลว แต่ถ้าความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะมีก๊าซบางส่วนรวมตัวกัน ก่อตัวเหมือนถุงอากาศ ซึ่งเรียกว่า ฟองก๊าซ

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซ และแผ่นกระจายของไหล ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

3.8.1 Channeling เกิดการผ่านไปของก๊าซเป็นช่องๆ โดยที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ตรงทางผ่านของก๊าซเท่านั้นที่เคลื่อนที่ แต่บริเวณข้างเคียงจะอยู่กับที่

3.8.2 Bubbling อนุภาคของแข็งในฟลูอิดไลซ์เบดจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอในเบด แต่ถ้าบริเวณใดมีของแข็งอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น หรือ ไม่มีเลย เราเรียกบริเวณนั้นว่า bubbling

3.8.3 Slugging การเกิดฟองก๊าซหรือการรวมตัวของฟองก๊าซ จนได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหอทดลอง มีการแยกตัวของอนุภาคของแข็งเป็นชั้นๆ

3.8.4 Spouted Bed คือ การที่ก๊าซไหลผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มของของแข็งเท่านั้น ด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นของอนุภาคน้อย เมื่อเทียบกับบริเวณด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การหาความเร็วของก๊าซในหอคลลงฟลูอิดไดซ์เบด (u_0)

การหาความเร็วของอากาศในหอคลลงฟลูอิดไดซ์เบด ที่ทำให้อนุภาคภายในหอคลลงสามารถลอยตัวอย่างสม่ำเสมอในหอคลลง ความเร็วที่แนะนำคือประมาณ 1.3 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแต่ต้องน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน (Soponronnarit และ คณะ, 1995)

$$u_0 = 1.3u_{mf} \quad (3.12)$$



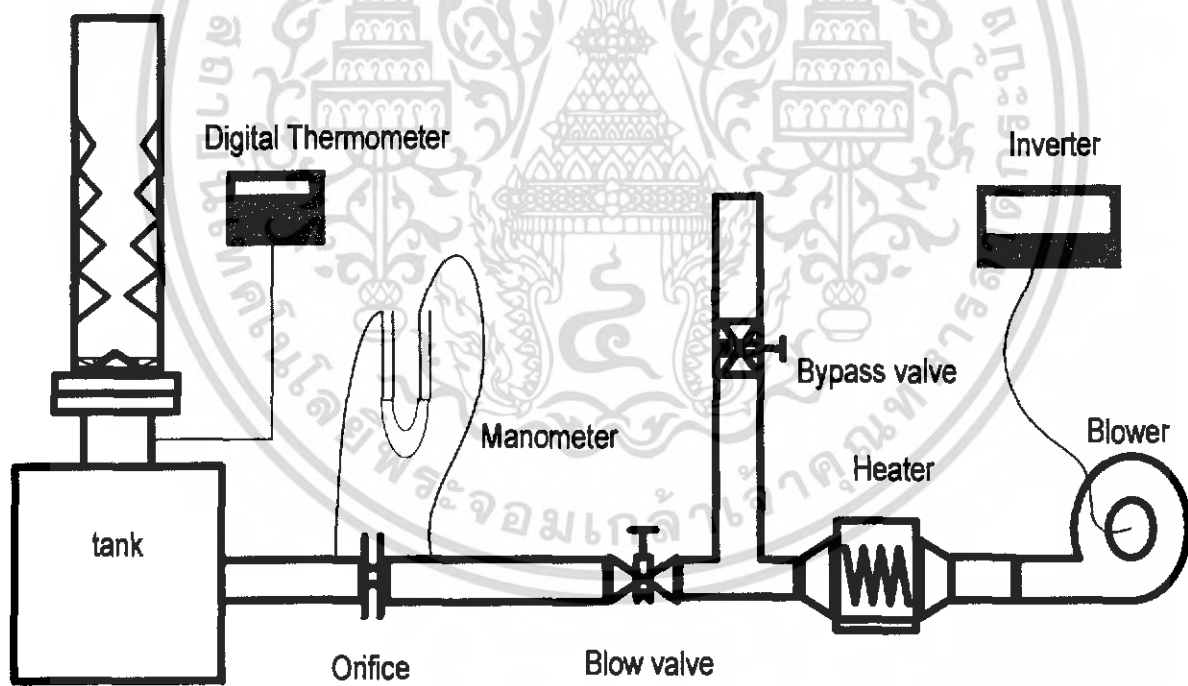
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งเมล็ดพริกไทย โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด แบบลมหมุนและผิวดิน ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ดังที่แสดงในรูป ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์หลักคือ ชุดหอตลอดซึ่งมีขนาด ความสูง 1000 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 130 มิลลิเมตร ภายในบรรจุไปด้วย ชุดผิวดิน ที่มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ภายในแตกต่างกัน และยังประกอบด้วยอุปกรณ์หลักอีกอย่างหนึ่งคือ แผ่นกระจายลมหมุน ที่ทำหน้าที่กระจายลม หมุน แทนการใช้ เทอร์โบเป็นตัวกระจายลมหมุนซึ่งจะทำให้ลมหมุนนานขึ้นเนื่องจากไม่ ต้องมีแผ่นกระจายมาขวาง ทางกาลไหลของลมหมุน รวมทั้งอุปกรณ์วัดค่าต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วรอบของ Blower และอุณหภูมิในการอบแห้ง โดยการใช้ตัววัดอุณหภูมิที่ฐานของหอตลอด ชุดอุปกรณ์ป้อนอากาศ และ อุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งจะแจกแจงรายละเอียดต่อไป

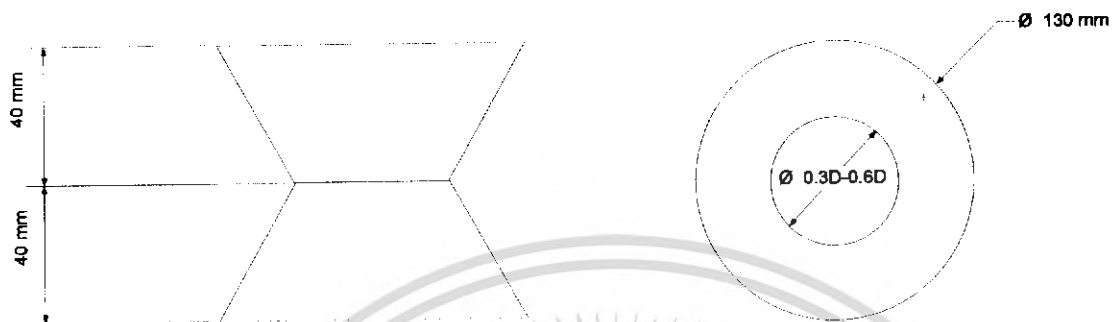


รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์การอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

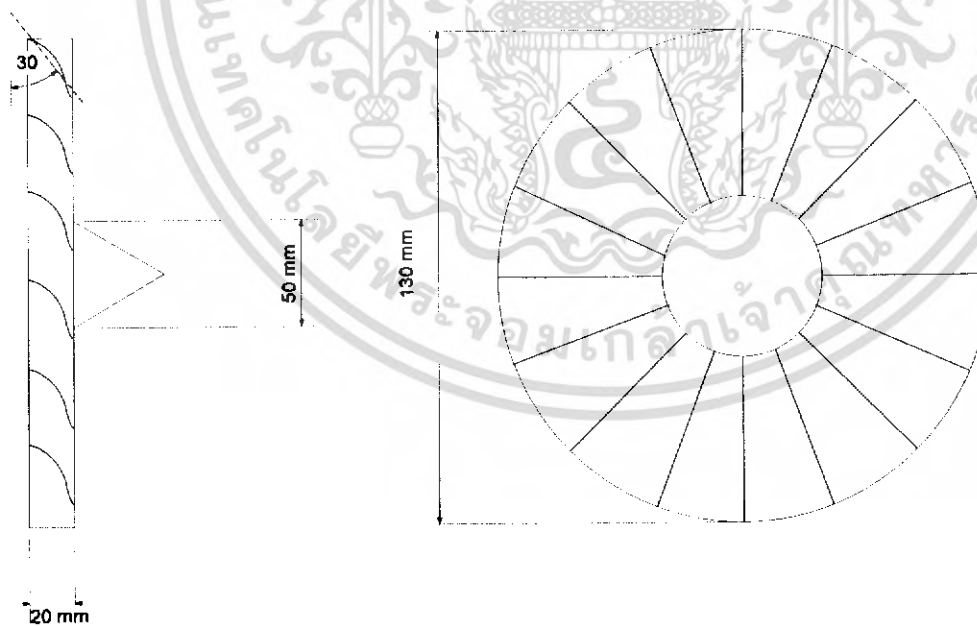
4.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์ทดลอง

1. ผักตมรูปกรวย



รูปที่ 4.2 ชุด ผักตม

2. ชุดใบพัดกำเนิดลมหมุน



รูปที่ 4.3 ชุดกำเนิดลมหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อุปกรณ์การทดลอง

4.2.1 ชุดป้อนอากาศ

ชุดป้อนอากาศ จะใช้ Blower ขนาด 7.46 กิโลวัตต์ ในการป้อนอากาศ ซึ่งจะควบคุมความเร็วของอากาศที่เข้าในหอทดลองโดย ใช้ Inverter เป็นตัวควบคุม



รูปที่ 4.4 ตัวป้อนอากาศ (Blower)



รูปที่ 4.5 ชุดควบคุมความเร็วรอบ Blower

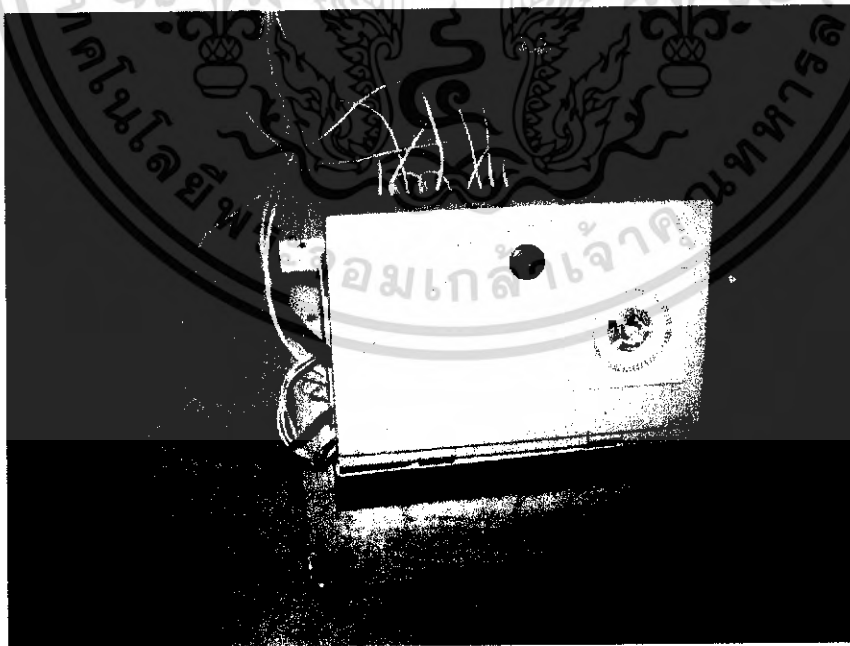
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ชุดให้ความร้อน

การให้ความร้อนจะให้โดยใช้ตัว Heater ขนาด 12 กิโลวัตต์ ในการให้ความร้อน ซึ่งควบคุมโดยชุดควบคุมอุณหภูมิของตัว Heater เองโดยเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ชุดให้ความร้อน (Heater)

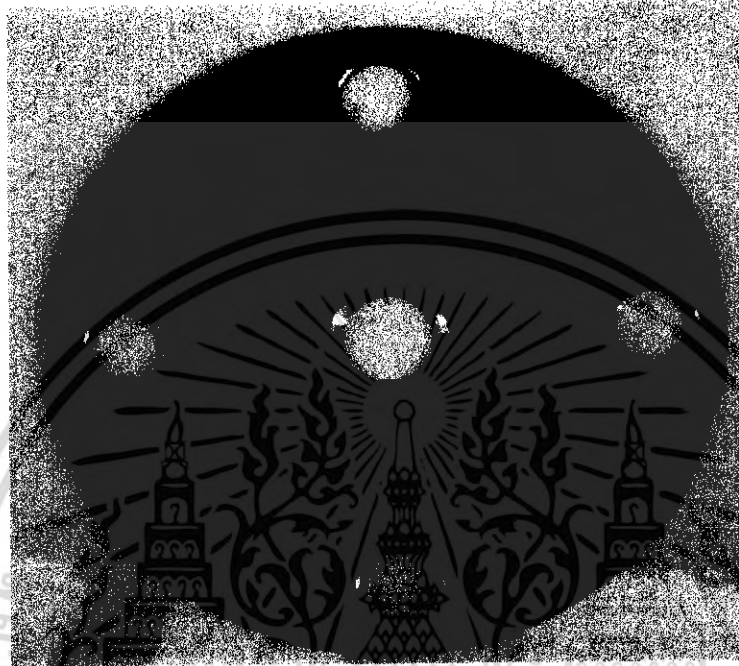


รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมชุดให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ชุดวัดความเร็ว

ชุดวัดความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าหอทดลอง ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น อากาศร้อนจาก ตัวให้ความร้อน จะไหลผ่าน ออร์ฟิซ (Orifice) เพื่อทำการวัดความดัน โดยใช้มานอมิเตอร์ (Manometer) วัดความดันแตกต่าง ระหว่างทางเข้าและทางออกของ ออร์ฟิซ (Orifice)



รูปที่4.8 ออร์ฟิซมิเตอร์ (Orifice Meter)

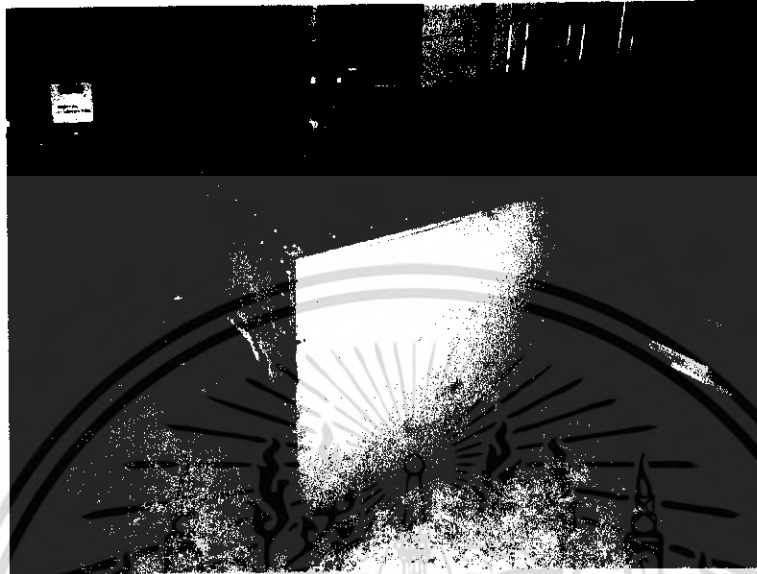


รูปที่4.9 มาโนมิเตอร์ (Manometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 อังพักอม (Air tank)

อังพักอมทำหน้าที่ปรับความเร็วลมให้คงที่และปรับอุณหภูมิให้คงที่ทำให้ลมที่ผ่านขึ้นไปในห้องทดลอง มีความเร็วที่สม่ำเสมอ และมีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด



รูปที่ 4.10 อังพักอม

4.2.5 แผ่นกระจายลมแบบธรรมดา

แผ่นกระจายลมแบบธรรมดานี้ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ กับแผ่นกระจายแบบลมหมุนที่ทำการพัฒนาขึ้นมาในครั้งนี้



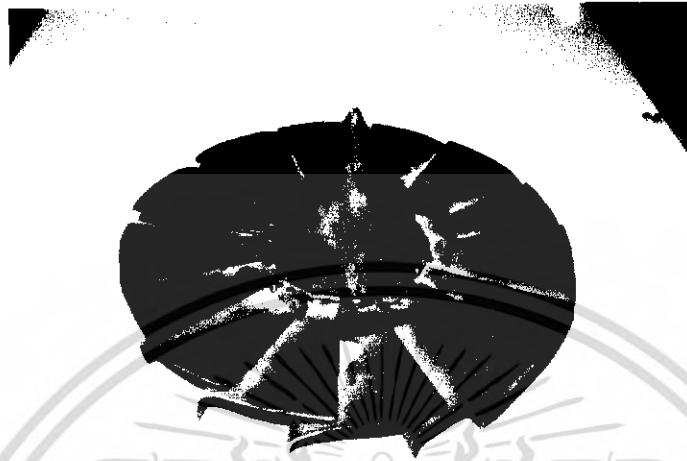
13 9 2005

รูปที่ 4.11 แผ่นกระจายลมแบบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 แผ่นกระจายแบบลมหมุน

แผ่นกระจายแบบลมหมุนทำหน้าที่สร้างลมหมุนในการอบเมล็ดพริกไทยแทนการใช้เทอร์โบ (Turbo) มีลักษณะเป็นแผ่นครึ่งวงซ้อนกัน โดยมีช่องว่างสำหรับอากาศร้อนไหลผ่าน



13 9 2005

รูปที่ 4.12 แผ่นกระจายลมหมุน

4.2.7 ฝักคั้นรูปกรวย

ทำหน้าที่สร้างการปั่นป่วนในการไหลของลมร้อน โดยที่ฝักคั้นแต่ละอันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในไม่เท่ากัน

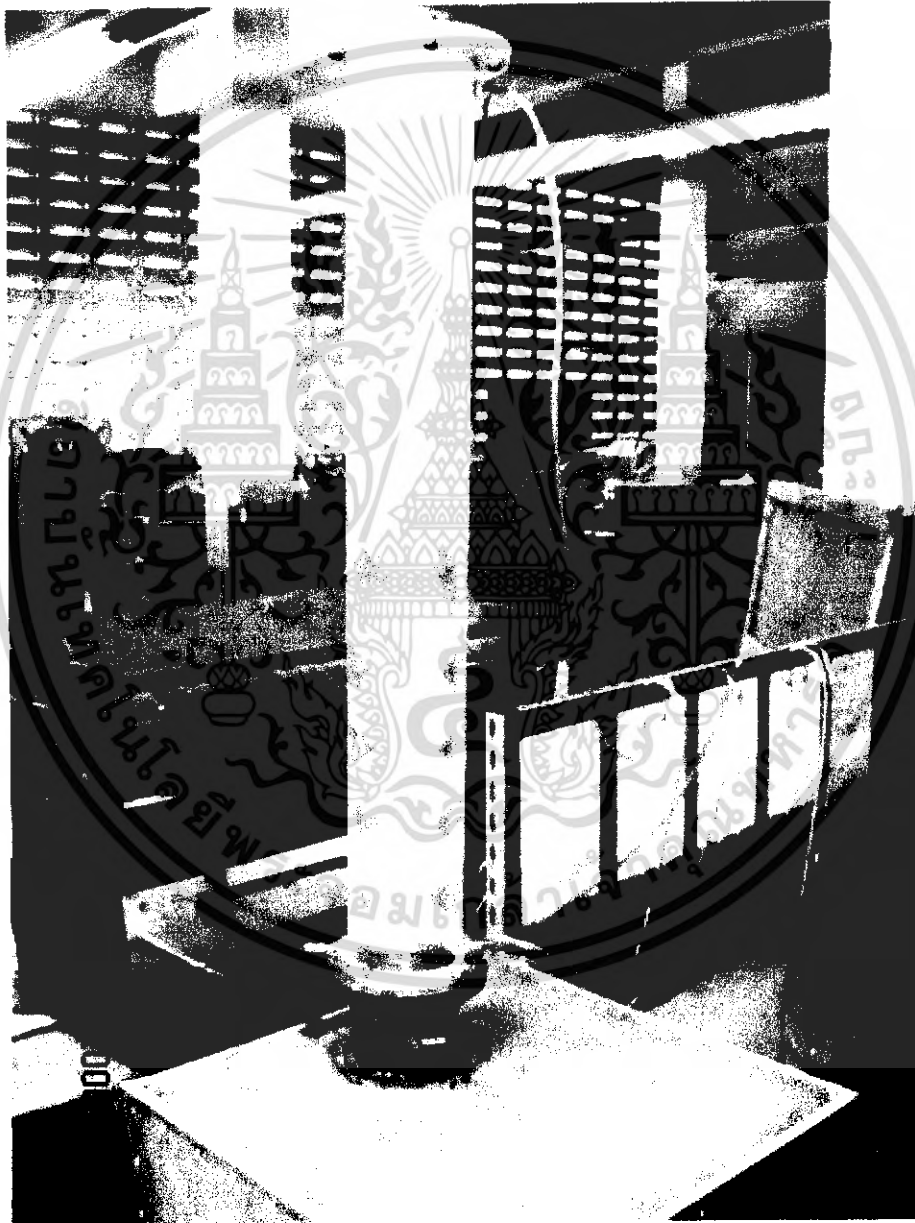


รูปที่ 4.13 ฝักคั้นรูปกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ชุดหอททดลอง แบบลมหมุนและผิวคลื่น

หอททดลองจะทำจากท่ออะคริลิกใสเพื่อการมองเห็นและสังเกตพฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด ภายในหอททดลองได้สะดวกขึ้น ด้านบนจะทำการปิดด้วยตะแกรงลวด เพื่อป้องกันเมล็ดพริกไทยหลุดออกจาก หอเมื่อเมล็ดพริกไทยแห้ง และรอบข้างหอทจะเจาะรูเพื่อทำการวัดความดันภายในหอทและความดันระหว่างแผ่น กระจาย ด้านหอททดลองจะทำให้มีขนาดเล็กลงจากการทดลองที่ผ่านมา

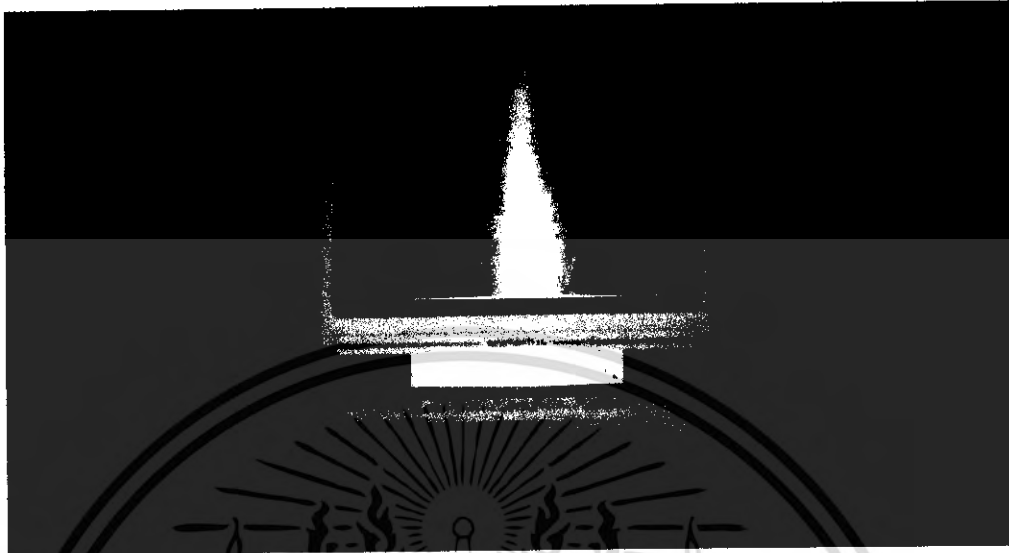


รูปที่ 4.14 หอททดลองแบบลมหมุนและผิวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 อุปกรณ์วัดน้ำหนัก

อุปกรณ์วัดน้ำหนักที่ใช้เป็นตราซึ่งคิดจลขนาดความละเอียด 0.01 กรัม ที่มีการแสดงผลเป็นตัวเลข ทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 4.15 ตราซึ่งคิดจล ความละเอียด 0.01 กรัม

4.3 ทารามิเตอร์ในการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาดังผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (Superficial air velocity) ภายในหอทดลองและลักษณะของแผ่นกระจายแบบลมหมุน และแผ่นกระจายแบบธรรมดาว่ามีผลกระทบต่อ การลดความชื้นอย่างไรบ้างรวมถึงลักษณะของผิวคลื่นที่มีลักษณะต่างกันของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน

การทดลองในครั้งนี้จะไม่ พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของการทดลองเนื่องจากได้มีการ ทำการศึกษาแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบเมล็ดพืช มีผลต่อการลดลงของความชื้นในเมล็ดพืช ในการอบแบบเทคนิคฟลูอิด ไคซ์เบคในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้อุณหภูมิเพียงอุณหภูมิเดียว คือ 80 องศาเซลเซียส

4.4 ลำดับการทดลอง

4.4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

- 1) ทำการติดตั้งชุดมาโนมิเตอร์เข้ากับชุด ออร์ฟิส
- 2) ใส่เมล็ดพริกไทยลงไปในห้องทดลองจำนวน 500 กรัม
- 3) เปิดโบลเวอร์ให้ระดับของน้ำในมาโนมิเตอร์ที่วัดจากความดันแตกต่างระหว่าง ทางเข้าและ ทางออกของ ออร์ฟิส โดยทำการปรับความเร็วของ โบลเวอร์ให้ระดับของความต่างของมาโนมิเตอร์เปลี่ยนไปที่ 4 เซนติเมตร

- 4) บันทึกค่าความดันตกคร่อมภายในหอทดลอง

- 5) ปรับความเร็วไปจนกว่าสังเกตเห็นเมล็ดพริกไทยเริ่มขยับและความดันในหอทดลองเริ่มคงที่ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

- 6) ทำตามขั้นตอน 2 ถึง 5 โดยเปลี่ยนแผ่นกระจายธรรมดาเป็นแผ่นกระจายแบบลมหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ขั้นตอนการอบเมล็ดพริกไทยโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น

1. ประกอบแผ่นกระจายแบบธรรมดาเข้ากับหอทดลอง
2. เปิดโบล์เวอร์ อุ่นอากาศให้ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3. ใส่เมล็ดพริกไทยลงในหอทดลอง 200 กรัม
4. ตั้งความเร็วให้ได้ 1.3 Umf
5. นำพริกไทยออกมาชั่งทุกๆ 10 นาที
6. ทำตามขั้นตอน 3 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความเร็วเป็น 1.6 Umf และ 2 Umf
7. ทำการทดลองตามขั้นตอน 3 ถึง 6 โดยใส่ผิวคลื่น ขนาด 3,4,5,6
8. ทำการทดลองตามขั้นตอน 3 ถึง 6 โดยเปลี่ยน ขนาดผิวคลื่นเป็น 3, 3.5, 4, 4.5,5 ,5.5 ,6,6.5
9. ทำการทดลองตามขั้นตอน 3 ถึง 8 โดยเปลี่ยนเป็นแผ่นกระจายลมหมุน

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการทดลองการอบแห้งโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบลมหมุนและผิวคลื่น

ลักษณะแผ่นกระจาย	ลักษณะหอทดลอง	ความเร็ว Umf
แผ่นกระจายธรรมดา	หอโล่ง	1.3
		1.6
		2
	หอกรวยขนาด 3,4,5,6	1.3
		1.6
		2
	หอกรวยขนาด 3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5	1.3
		1.6
		2
แผ่นกระจายแบบลมหมุน	หอโล่ง	1.3
		1.6
		2
	หอกรวยขนาด 3,4,5,6	1.3
		1.6
		2
	หอกรวยขนาด 3,3.5,4,4.5,5,5.5,6,6.5	1.3
		1.6
		2

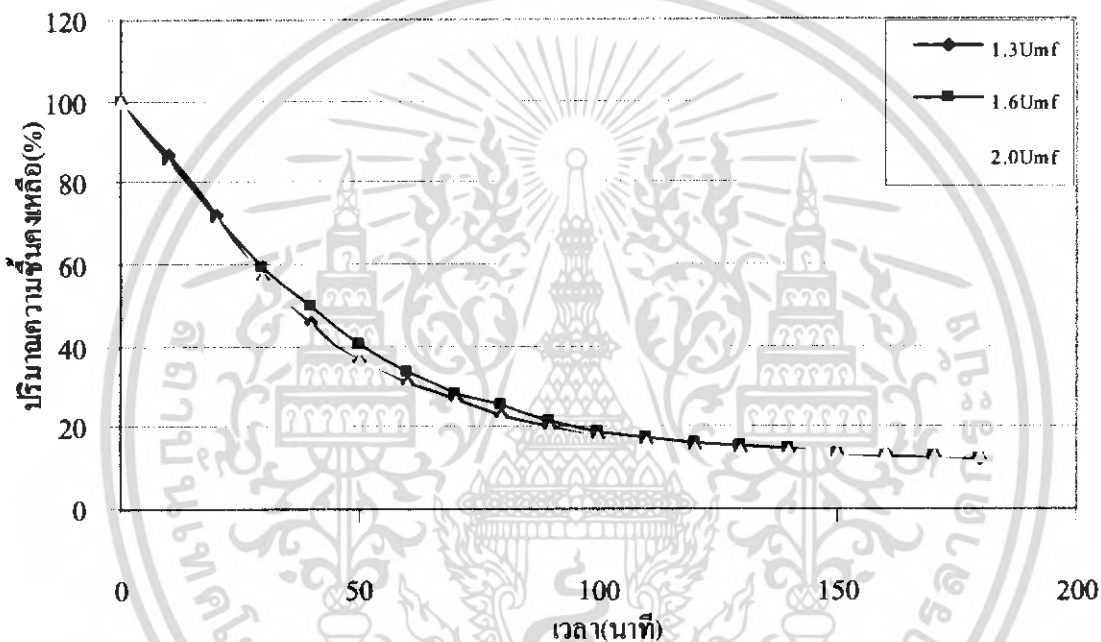
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

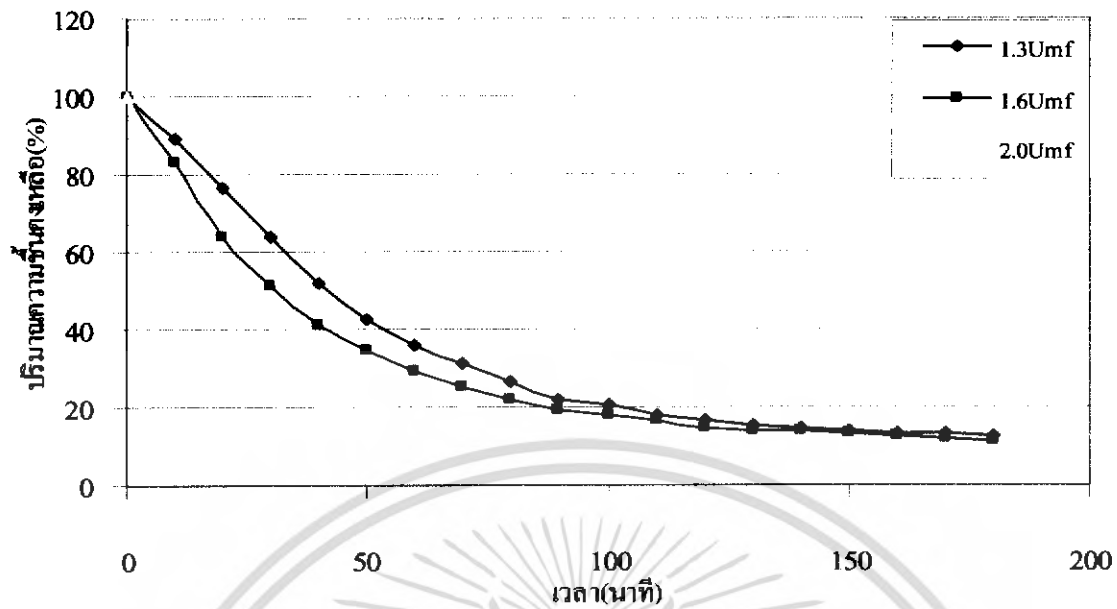
5.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองแบบต่างๆ

จากการทดลองครั้งนี้ ได้บันทึกน้ำหนักของเมล็ดพริกไทยจากการนำมาชั่งทุกๆ 10 นาที แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือที่เวลานำมาชั่งแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความชื้นในแต่ละกรณี

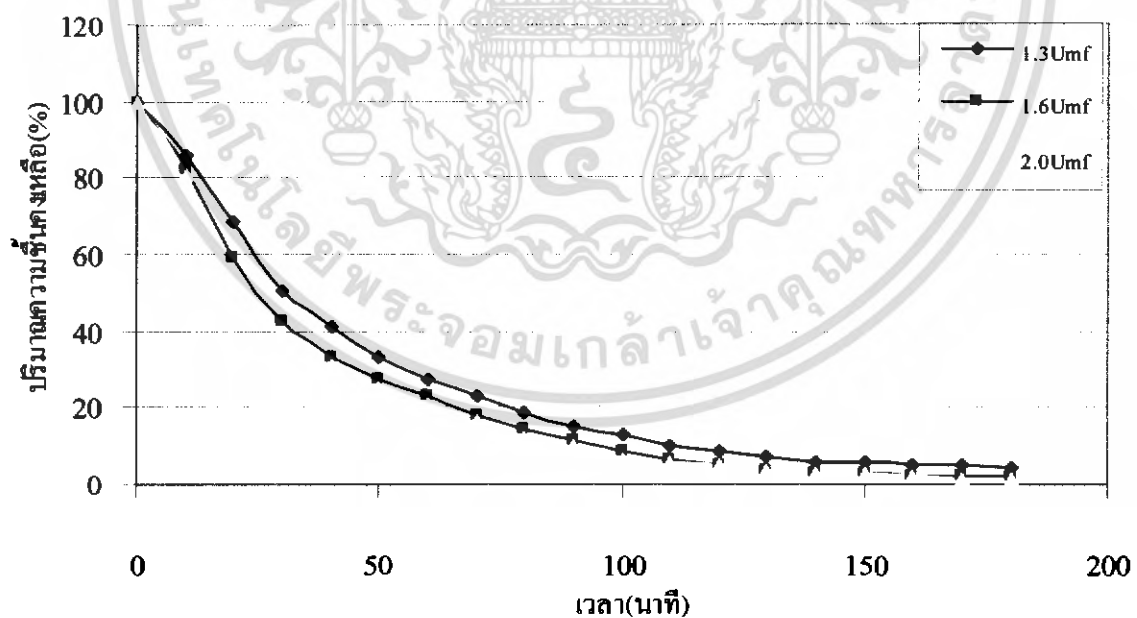


รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอททดลองแบบโค้งแผ่นกระจายลมธรรมชาติ ที่ความเร็วต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 5.1 จะพบว่า การทดลองโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมชาติความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งน้อยมาก และถ้าสังเกตในขณะทำการทดลองจะเห็นว่าเมล็ดพริกไทยมีการกระจายตัวกันน้อยมาก จะเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนเหนียวแผ่นกระจายเล็กน้อย ทำให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนมีน้อย และความชื้นส่วนมากจะสูญเสียนอกจากหอททดลองอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับเมล็ดพริกไทย ทำให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดพริกไทยลดลงน้อยกว่าการอบแห้งในรูปแบบอื่นๆ

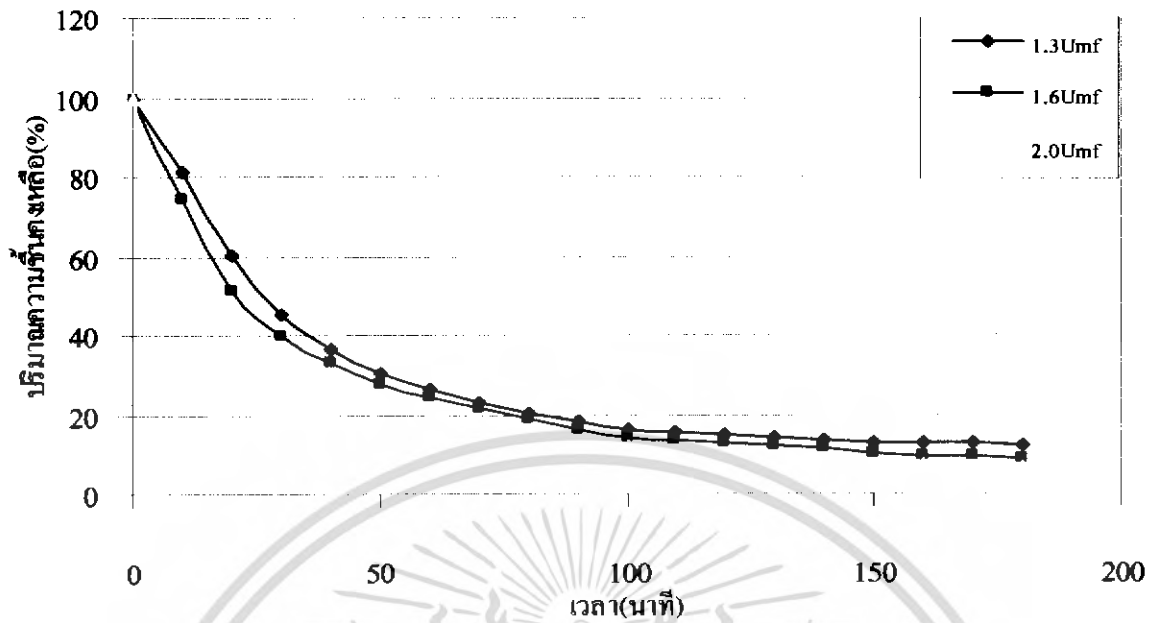


รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความเข้มข้นกับเวลา ของหอตดลองแบบผิวดิน 8 ลูก ขนาด (0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65) เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห่อ แผ่นกระจายลมธรรมดา ที่ความเร็วต่างๆ

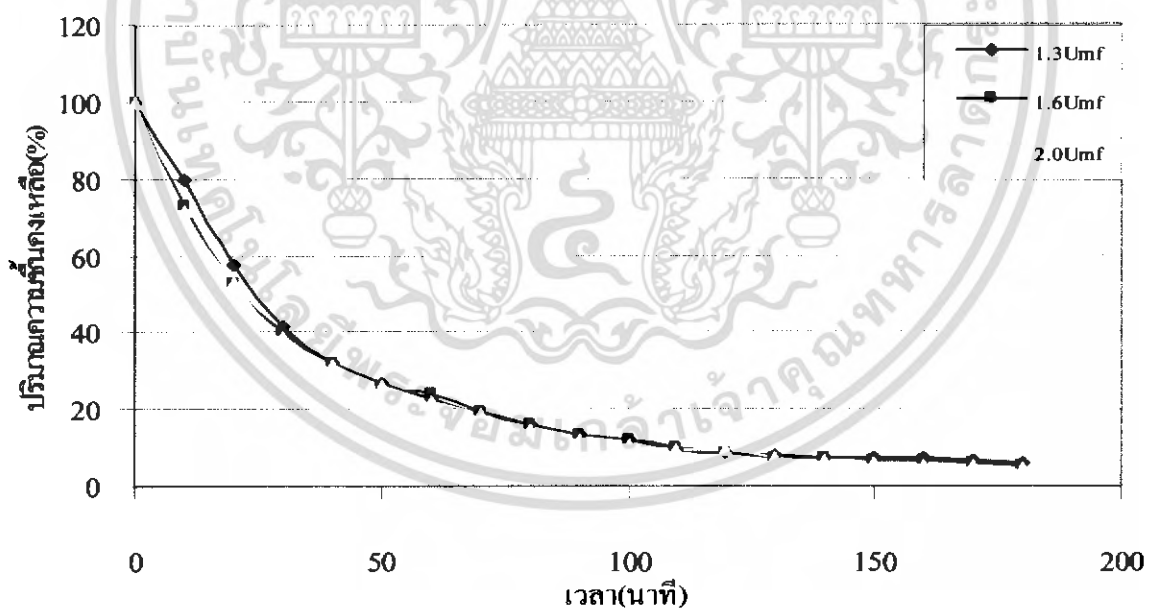


รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความเข้มข้นกับเวลา ของหอตดลองแบบผิวดิน 4 ลูก ขนาด (0.3,0.4,0.5,0.6) เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห่อ แผ่นกระจายลมธรรมดา ที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

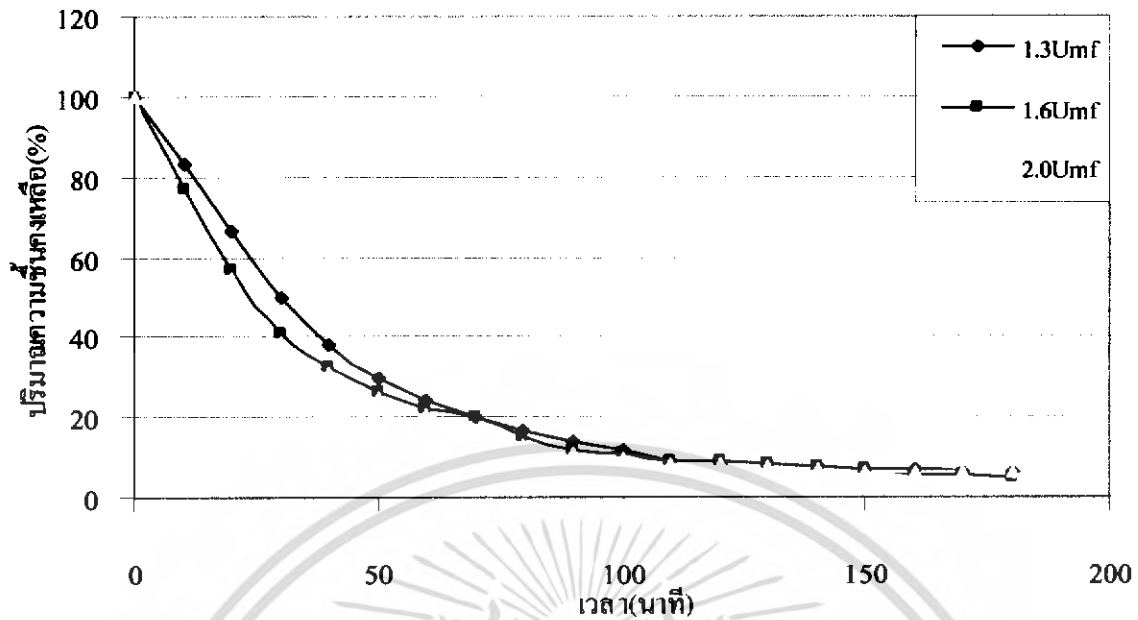


รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทากลองแบบโล่งแผ่นกระจายลมแบบไบพัด ที่ความเร็วต่างๆ

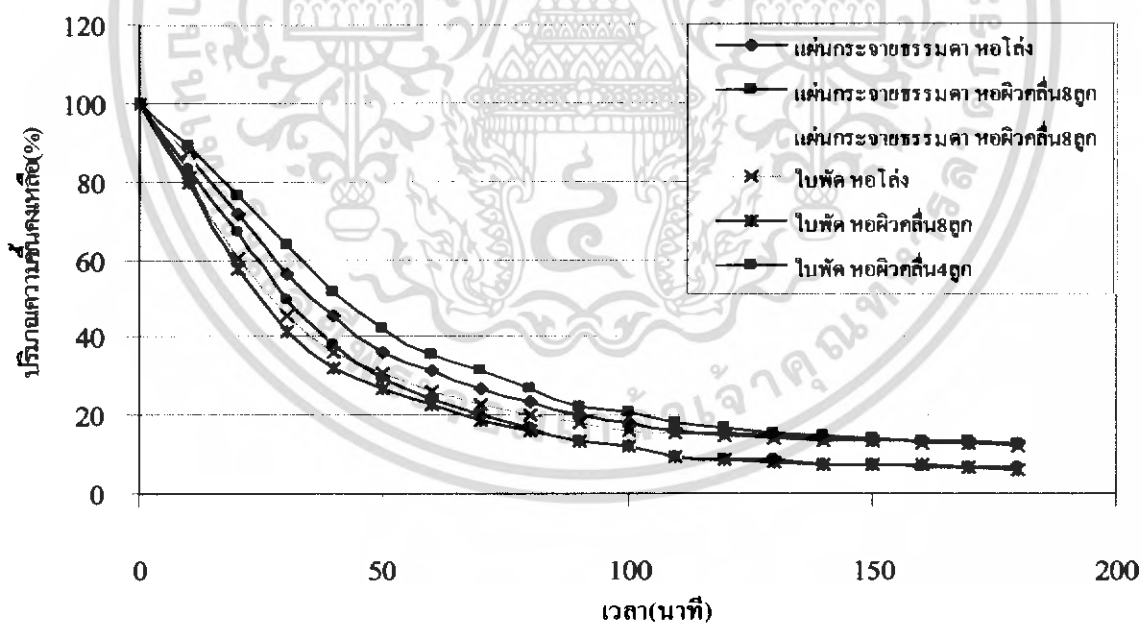


รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอยทากลองผิวกลื่น 8 ลูก ขนาด (0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65) เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหอย แผ่นกระจายลมแบบไบพัด ที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

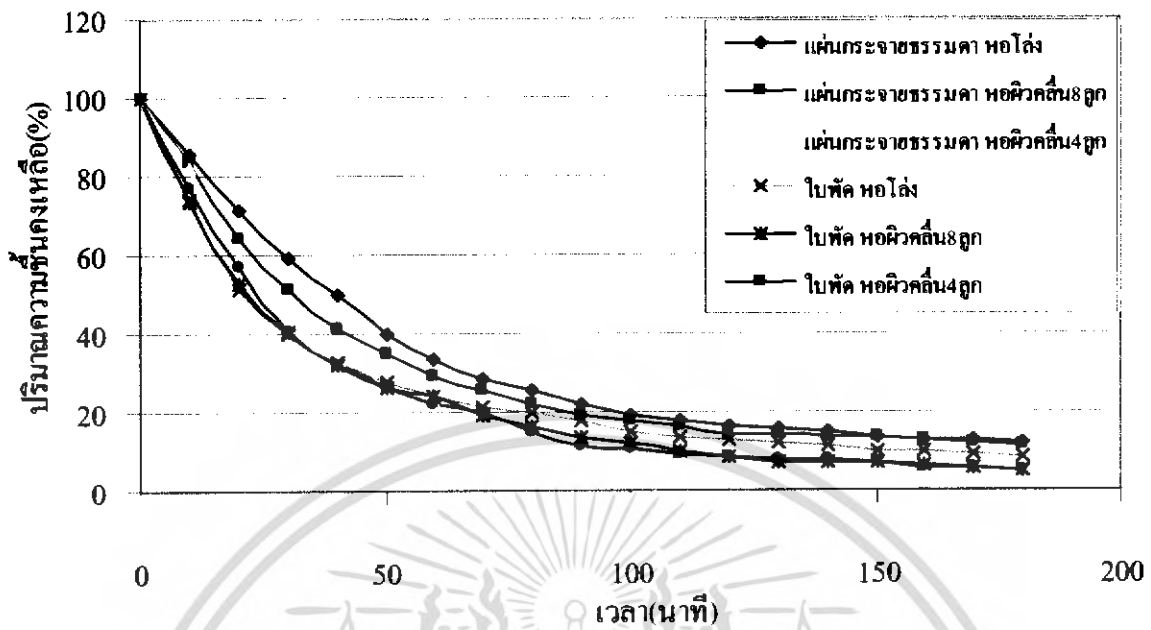


รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดงผิวคลื่น 4 ลูก ขนาด (0.3,0.4,0.5,0.6) เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหอต แผ่นกระจายลมแบบใบพัด ที่ความเร็วต่างๆ

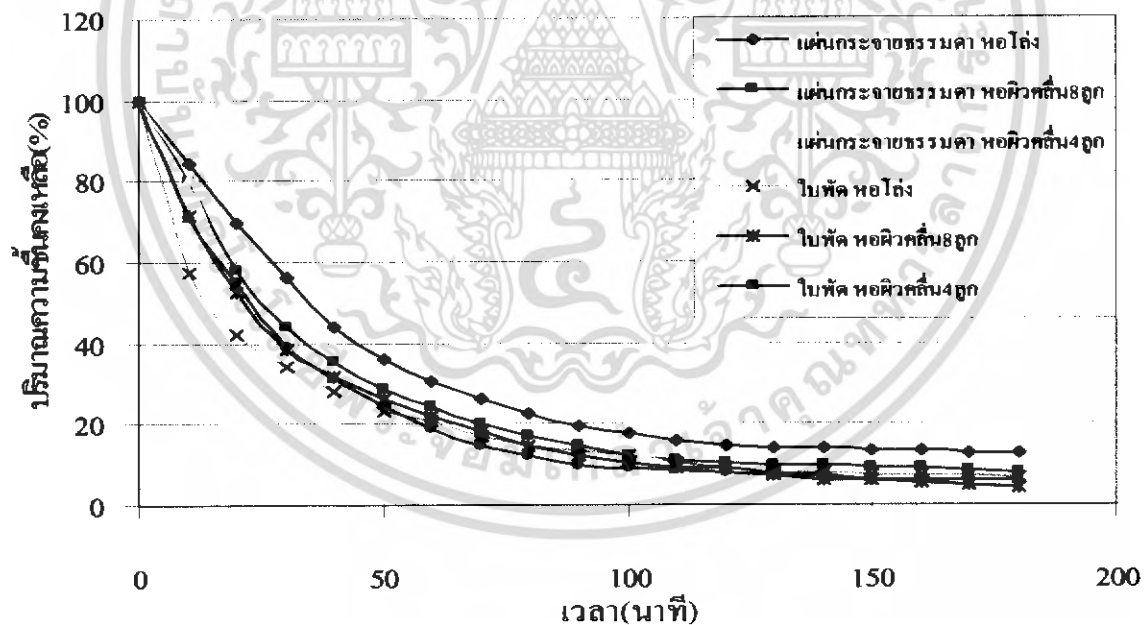


รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดงลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.3 Umf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 1.6 Umf



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองลักษณะต่างๆ ที่ความเร็วลม 2.0 Umf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

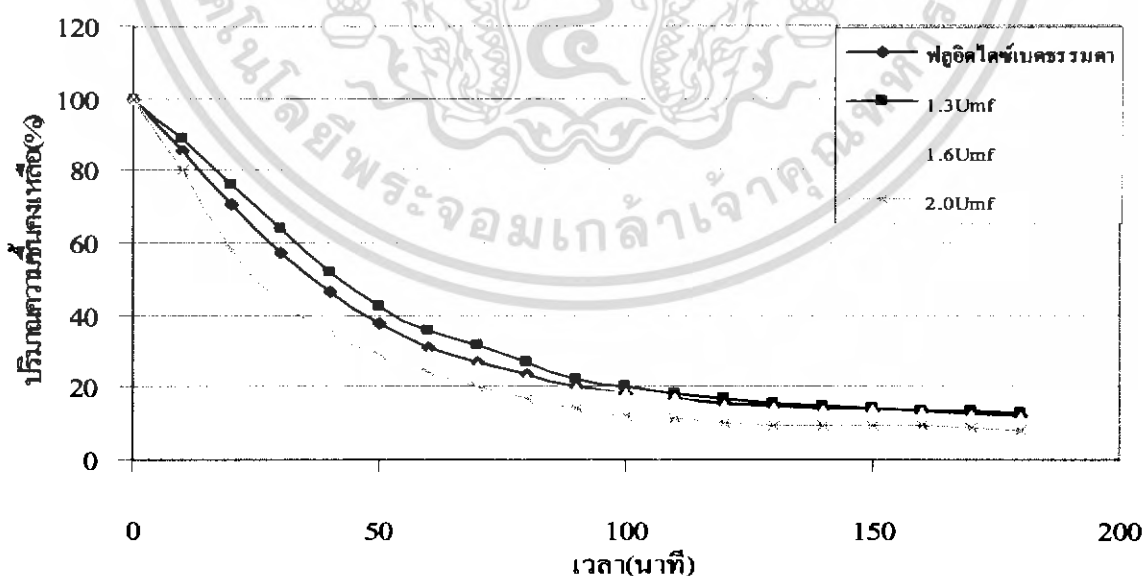
จากกราฟรูปที่ 5.2 และ 5.3 จะพบว่าเมื่อใส่ผิวคลื่นเข้าไปในหอทดลองความเร็วเริ่มมีผลต่อการอบแห้ง โดยจะเห็นว่าความชื้นจะลดลงเร็วขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผิวคลื่นจะช่วยทำให้เมล็ดพริกไทยกระจายตัวภายในหอทดลองได้ดี เป็นผลให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนเพิ่มขึ้น และผิวคลื่นยังช่วยให้เกิดการไหลอย่างปั่นป่วนของลมร้อน ทำให้ลมร้อนใหม่เข้าไปสัมผัสกับเมล็ดพริกไทยตลอดเวลา ช่วยให้ความชื้นในเมล็ดพริกไทยลดลงเร็วขึ้น

จากกราฟรูปที่ 5.4 , 5.5 และ 5.6 เป็นการทดลองโดยใช้แผ่นกระจายลมแบบใบพัด จากรูป 5.1 เป็นการทดลองของหอทดลอง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะค่อยๆ ช้าลง ในกรณีนี้สังเกตจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้ง และจากกราฟรูปที่ 5.5 และ 5.6 เป็นการเพิ่มผิวคลื่นเข้าไปในหอทดลอง จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มผิวคลื่นเข้าไปในหอทดลองความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งน้อยมาก

จากกราฟรูปที่ 5.7, 5.8 และ 5.9 จะเห็นว่าการทดลองที่ใช้ลมหมุนและผิวคลื่นสามารถลดความชื้นในช่วงแรกได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อปริมาณความชื้นเริ่มลดลงมากแล้วการทดลองแบบนี้จะลดความชื้นได้น้อยลง ต่างกันกับการทดลองแบบแผ่นกระจายธรรมดาที่มีการใส่ผิวคลื่น คือการทดลองแบบแผ่นกระจายธรรมดาที่มีการใส่ผิวคลื่นจะมีอัตราการลดลงของความชื้นช่วงแรกน้อยกว่าการทดลองที่ใช้ลมหมุนและผิวคลื่น แต่จะมีการลดลงของความชื้นค่อนข้างสม่ำเสมอ และสามารถความชื้นของเมล็ดพริกไทยในช่วงที่เหลือความชื้นน้อยๆ ได้ดีมาก

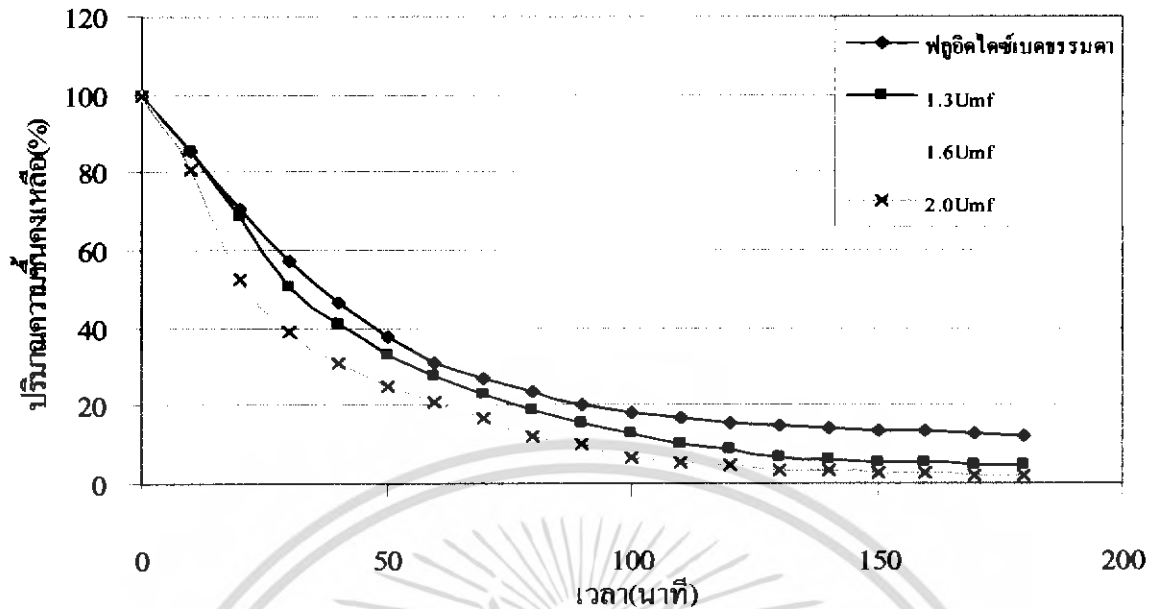
5.2 การเปรียบเทียบเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา กับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบอื่นๆ

เป็นการแสดงผลของปริมาณความชื้นเทียบกับเวลา ของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา เปรียบเทียบกับเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบอื่นๆ ที่ได้ทำการทดลองมา เพื่อดูลักษณะแนวโน้มการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทย รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จากรูปกราฟที่แสดงต่อไปนี้

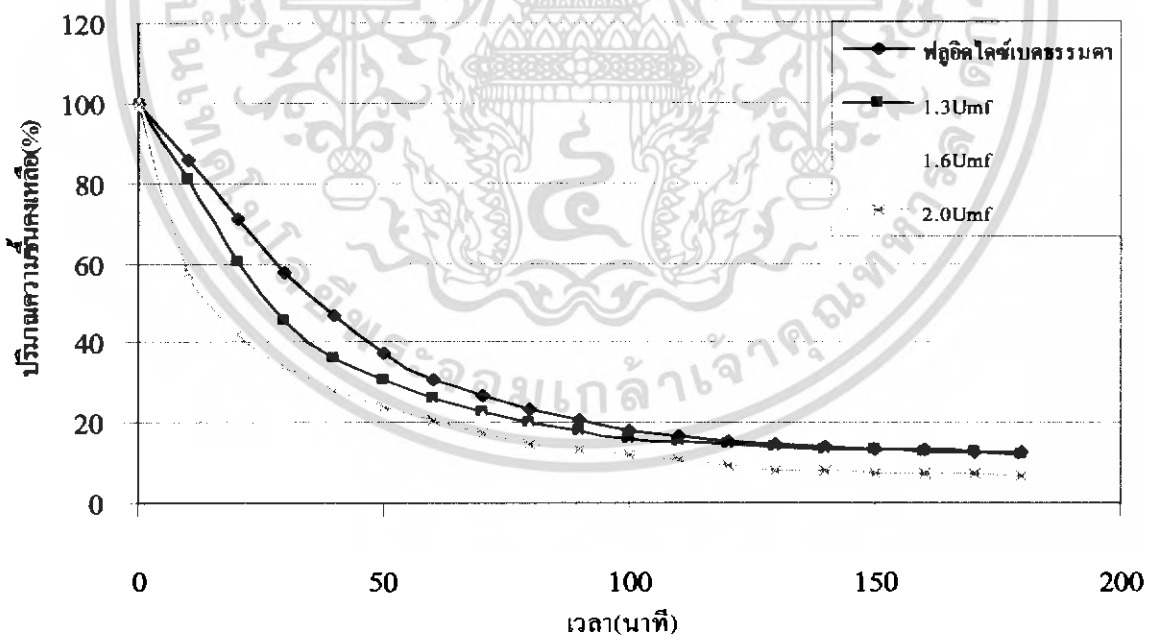


รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา กับหอทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 8 ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

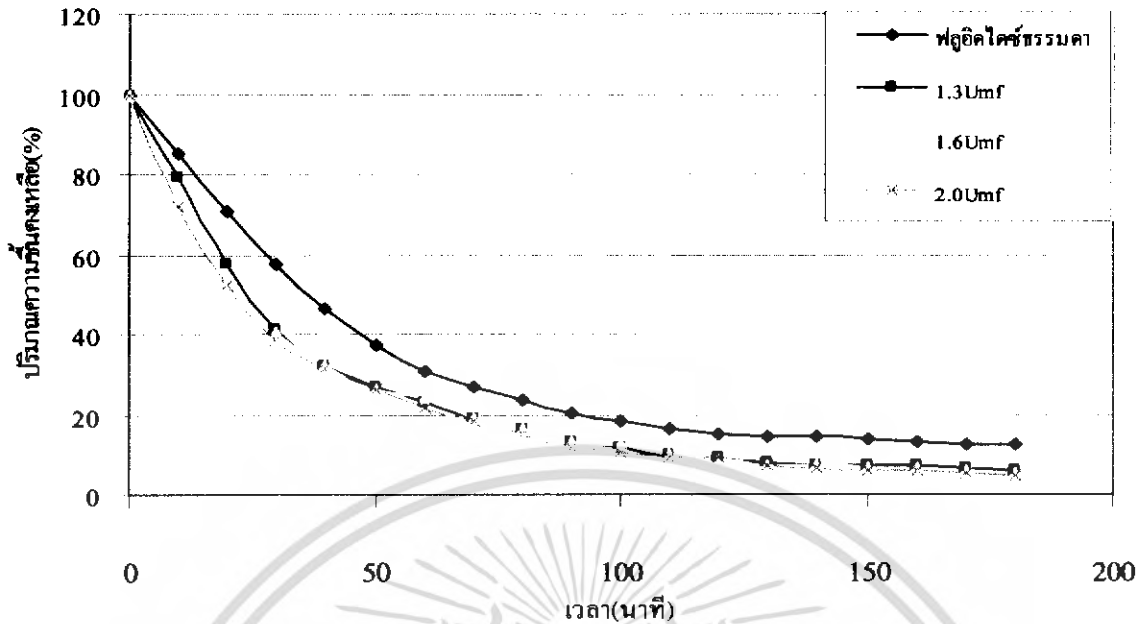


รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นกับเวลา ของหอตลอดฟลูอิดโค้ดแบบธรรมดา กับหอตลอดฟลูอิดโค้ดแบบผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 4 ลูก

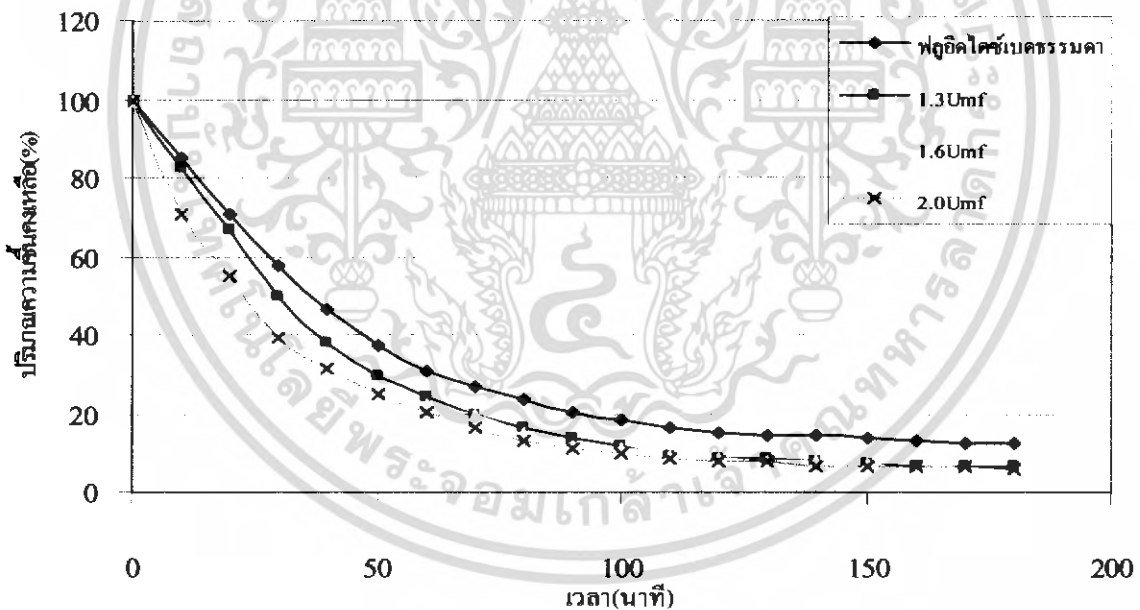


รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นกับเวลา ของหอตลอดฟลูอิดโค้ดแบบธรรมดา กับหอตลอดฟลูอิดโค้ดแบบกลมมน(ใบพัด) หอโถ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดฟลูอิดโคจรรวมคาแบบธรรมดา กับหอตลอดฟลูอิดโคจรรวมคาแบบกลมมนและผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 8 ลูก



รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับเวลา ของหอตลอดฟลูอิดโคจรรวมคาแบบธรรมดา กับหอตลอดฟลูอิดโคจรรวมคาแบบกลมมนและผิวคลื่น จำนวนผิวคลื่น 4 ลูก

จากกราฟในรูปแบบต่างๆ ที่ผ่านมา จะพบว่าเมื่อใส่ผิวคลื่นเข้าไปในหอตลอดจะช่วยให้อัตราการอบแห้ง เมล็ดพริกไทยเร็วขึ้น เนื่องจากผิวคลื่นสามารถช่วยให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างลมร้อนกับเมล็ดพริกไทยดีขึ้น จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งโดยใช้หอตลอดแบบผิวคลื่นจะดีกว่าการใช้หอตลอดแบบธรรมดา หรือแบบห่อโล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดา ที่มีการใส่ผิวคลื่นเข้าไปในหอททดลองจะเห็นว่าการอบแห้งเร็วขึ้นกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดาโดยสังเกตจากกราฟแสดงผลการทดลอง ในส่วนของเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดาพบว่าความเร็วลมไม่มีผลต่อการอบแห้ง เนื่องจากเส้นกราฟที่ความเร็วต่างๆเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่หลังจากใส่ผิวคลื่นเข้าไปในหอททดลองพบว่าสามารถลดความชื้นได้ดีกว่าเดิมถึง 43.4 % โดยเฉพาะที่ความเร็วลม 2 Umf สามารถลดความชื้นเหลือเพียงไม่ถึง 2 % เท่านั้น และจากการสังเกตขณะทำการทดลอง พบว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดาที่มีการใส่ผิวคลื่นเข้าไปประมาณ 4 ลูก การกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยในหอททดลองดีมาก และมีการไหลขุ่นลงของเมล็ดพริกไทยภายในหอททดลองอยู่ตลอดเวลาจึงช่วยให้การอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีข้อเสียคือในการอบแห้งช่วงแรกๆ ประสิทธิภาพในการลดความชื้นจะน้อยกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุน (ใบพัด) และผิวคลื่นมาก

ในส่วนการอบแห้งโดยใช้เทคนิคแบบลมหมุนและผิวคลื่น สังเกตจากกราฟผลการทดลองจะเห็นว่าอัตราการอบแห้งในช่วงแรกๆสามารถความชื้นได้เร็วมาก เนื่องจากการหมุนของลมร้อนจะช่วยให้เกิดการไหลอย่างปั่นป่วนได้ง่ายทำให้เมล็ดพริกไทยถูกเหวี่ยงไปมาตลอดเวลา และผิวคลื่นจะช่วยให้เกิดการกระจายของเมล็ดพริกไทยได้ทั่วหอทเป็นผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ผิวคลื่นจำนวน 4 ลูก จะอบแห้งได้เร็วกว่าผิวคลื่นจำนวน 8 ลูก เนื่องจากการกระจายตัวของเมล็ดพริกไทยจะดีกว่า ความเร็วลมมีผลต่อการอบแห้งค่อนข้างน้อยโดยดูจากกราฟปริมาณความชื้นที่ลดลงค่อนข้างใกล้เคียงกัน

จากการทดลองทั้ง 2 แบบ สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบลมหมุนและผิวคลื่นช่วยลดความชื้นในเมล็ดพริกไทยได้ดีกว่าการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดา และยังทำให้เมล็ดพริกไทยเกิดการกระจายตัวกันทั่วหอทมากขึ้นการแลกเปลี่ยนความร้อนของเมล็ดพริกไทยกับลมร้อนก็จะดีขึ้น ในขณะที่เดียวกันความเร็วลมที่เกิดการสั่นและปั่นป่วนก็มีผลให้การอบแห้งเร็วขึ้น ในการทดลองครั้งนี้พบว่าผิวคลื่นจำนวน 4 ถึง 5 ลูก และแผ่นกระจายลมแบบใบพัด ที่ความเร็วลม 2.0Umfช่วยให้การอบแห้งเมล็ดพริกไทยได้ดีที่สุด โดยลดความชื้นได้ดีกว่าเทคนิคฟลูอิดไดซ์แบบธรรมดาถึง 45.42%

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในการทดลองถ้าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเปลี่ยนแปลงมากๆ จะมีผลต่ออัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในเมล็ดพริกไทย ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์หรือทำการทดลองที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ปกติ

6.2.2 ในการออกแบบเครื่องทดลองไม่ควรออกแบบให้ระยะห่างของหอททดลองกับแหล่งความร้อน (ฮีตเตอร์) มากเกินไปเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียเนื่องจากเกิดการถ่ายเทกับอากาศ

บรรณานุกรม

- กาญจน์มณี ศรีวิศาลภพ. 2546. **คุณรู้เรื่องกาแฟดีแค่ไหน...?.** กรุงเทพฯ : ดอกหญ้าการ์ฟ.
- กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร. 2545. "การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบ
ชั้นบาง" หน้า 592-595 ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16.
กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
- กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. 2542. **การพัฒนาการผลิตและการตลาดกาแฟ.** งานจัดประกวดเมล็ดกาแฟ
ปี 2541/42 และการสัมมนา. กรุงเทพฯ : บริษัท บพิการพิมพ์ จำกัด
- ฉัฐพล ภูมิสะอาด สมชาติ โสภณธฤทธิ์ และ อภิชาติ เทอดโยธิน. 2542. "แบบจำลองการแพร่ความชื้นของ
ข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน." หน้า 268-273. ใน การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม.
กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิวัฒน์ วุฒิววัฒน์ชัย. 2540. "แนวทางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองโดยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน"
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2540. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.** พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : หนังสือ
ในโครงการส่งเสริมการสร้างตำรา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- อนันต์ พงษ์ธรกุลพานิช. 2539. "การศึกษาการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไลเซชัน." วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรเมธ ทัดทอง. "การศึกษาเชิงทดลองอบแห้งเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชัน" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2546.
- การุณ เลาะมาน. "การศึกษาการอบแห้งเทคนิคคอมพูนกวแบบมีแผ่นขวาง" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.
- กิตติชัย พาวขุนทด. และคณะ. "การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเทคนิคฟลูอิดไลเซชันแบบ
ผิวกลั่น" วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.
- Abdullah, M.Z.Husain, Z.and Yin Pong, S.L 2003. "Analysis of cold flow fluidization test results for
various." *Biomass & Bioenergy.* 24 : 487-494.
- Akpinar, E. Midilli, A. and Bicer, Y. 2003. "Single layer drying behavior of potato slices in a
convective cyclone dryer and mathematical modeling." *Energy Conversion and Management.* 44
: 1689-1705.
- Brooker, D.B. Bakker-Arkema, F.D. and Hall, C.W. 1981. *Drying Cereals Grains.* The AVI publish Company,
Inc, Westport, Connecticut
- Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion.* 2nd ed. Oxford : Oxford University Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Davidson, J. F. Clift, R. and Harrison, D. 1985. **Fluidization**. 2nd ed. London : Academic Press
- Ertekin, C. and Yaldiz, O. 2004. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model." **Journal of Food Engineering**. 63 : 349-359.
- Kozanoglu, B.U. Welti Chanes, J. Garcia Cuautle, D. and Santos Jean J.P. 2002. "Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study." **Power Technology**. 125 : 55-60.
- Kunii, D. Levenspiel, O. 1991. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. United States of America : Butterworth-Heinemann.
- Mawatari, Y. Tatemoto, Y. Noda, K. 2003. "Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed." **Power Technology**. 131 : 66-70.
- Midilli, A. Olgun, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. **Drying Technology**, 20(7), 1503-1513.
- Montgomery, D.C. 1997. **DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS**. Fourth edition. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
- Senadeera, W. Bhandari, B.R. Toung, G. Wijesinghe, B. 2003. "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying." **Journal of Food Engineering**. 58 : 277-283.
- Sharma, R.R. 1999. "Fluidized bed drying characteristics of green-mango and potato." A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of master of Engineering. Asian Institute of technology.
- Soponronarit, S. Yapha, M. and Prachayawarakorn, S. 1995. "Cross-flow fluidized bed paddy dryer." **Drying Technology**. 53(8) : 2207-2216
- Soponronarit, S. Kittiporn, K. and Prachayawarakorn, S. 1999. "CORNDRYING IN A CONTINUOUS FLUIDIZED BED DRYER." **Agricultural Engineering Journal**. 8(4) : 223-231.
- Srivastava, V.K. and John, J. 2002. "Deep bed grain drying modeling" **Energy Conversion and management**. 43 : 1689-1708.
- Suksankraison, K. Patumsawad, S. and Fungtammasan, B. 2001 "Prediction of Minimum Fluidisation Velocity from Correlations: An Observation." **Asia J. Energy Environ**. 2(2) : 145-154.
- Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. "Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles." **Applied Thermal Engineering**. 22 : 1763-1775.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. "Modeling of drying kinetics of single apricot." **Journal of Food Engineering** 58 : 23-32.



ภาคผนวก ก
การคำนวณที่ใช้การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของเมือคพริกไทย

น้ำหนักพริกไทย 1000 กรัม

ปริมาตรพริกไทย 1128 cm^3

ความหนาแน่นพริกไทย (ρ)

$$(\rho) = \frac{1000}{1128(1 - 0.414)}$$

$$= 1.714 \text{ g/cm}^3$$

กรณียังไม่ทราบค่าของ U_{mf} และ Φ_s จากการศึกษาพบว่าค่า k_1 และ k_2 มีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับอนุภาคต่างๆ ในช่วง Re_{op} ตั้งแต่ 0.01 – 40000 โดย Wen และ Yu(1996) แนะนำค่า k_1 ดังนี้

$$\frac{1}{k_1} = 0.0408, \quad K_1 = 24.5098$$

อากาศที่อุณหภูมิ 35°C

$$\rho_g = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \quad \mu = 1.8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

จากสมการ :

$$k_1 = \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \Phi_s^2}$$

$$\epsilon_{mf}^3 = \frac{1.75}{24.5098}$$

$$\epsilon_{mf} = 0.414$$

จากสมการ :

$$k_2 = \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \left(\frac{0.0714}{\epsilon_{mf}^3} \right)^2}$$

แทนค่า ϵ_{mf} ได้

$$k_2 = 1238.76$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_R - \rho_g) g}{\mu^2}$$

$$= \frac{0.3^2 (0.0012)(1.714 - 0.0012)(9.81)}{0.00018^2}$$

$$= 1680256.8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลซ์

จากสมการของ Ergun

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \left[\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150 (1 - \epsilon_{mf}) (U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu \epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$k_1 \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + k_2 \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = Ar$$

แทนค่า k_1, k_2 และ Ar ได้

$$98.04 U_{mf}^2 + 2477.52 U_{mf} = 1680256.8$$

$$U_{mf} = 130.69 \text{ cm/s}$$

การคำนวณหาความสัมพัทธ์ระหว่างขนาดท่อตลอดต่อแผ่นกระจายลม

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทางเข้าท่อ 0.013 m , $L_{mf} = 0.3 \text{ m}$, $\epsilon_{mf} = 0.414$

$$\rho_s = 1.714 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 197816 \times 10^{-7} \text{ NS/m}^2$$

หาความดันตกคร่อมในเบด (ΔP_b)

$$\begin{aligned} \Delta P_b &= L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g / g_c \\ &= 0.3 (1 - 0.414) (1714 - 1.2) (9.81) \\ &= 2953.89 \text{ Pa} \end{aligned}$$

จาก Zuideweg[14] กล่าวว่า

$$\Delta P_d = (0.2 \text{ ถึง } 0.4) \Delta P_b$$

เลือก 0.3

$$\Delta P_d = 0.3 (2953.89)$$

$$\Delta P_d = 886.167 \text{ Pa}$$

ตรวจสอบหาค่า Re เพื่อหา Cd_{or} ของรู

$$\begin{aligned} Re &= \frac{d_t u_o \rho_g}{\mu} \\ &= \frac{(0.013)(1.78)(1.2)}{197.816 \times 10^{-7}} \\ &= 14037.287 > 3000 \end{aligned}$$

เลือกใช้ $Cd = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณขนาดแผ่นกระจายลม

$$U_{or} = C_d \left(\frac{2gc \times \Delta P_d}{\rho_g} \right)^{1/2}$$

$$\frac{U_o}{U_{or}} = \text{สัดส่วนของพื้นที่รูต่อพื้นที่ทั้งหมด}$$

$$\frac{U_o}{U_{or}} = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 N_{or}$$

$$U_{or} = 0.6 \left[\frac{2 \times 886.167}{1.2} \right]^{1/2}$$

$$= 23.05 \text{ m/s}$$

$$\frac{U_o}{U_{or}} = \frac{5.0175}{23.05} = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 N_{or}$$

$$5.0175 = \frac{\pi}{4} d_{or}^2 N_{or}$$

$$N_{or} = \frac{0.277}{d_{or}^2}$$

เลือกใช้นาครู 0.003 m

ได้ $N_{or} = 30795 \text{ รู/m}^2 = 3.079 \text{ รู/cm}^2$

พื้นที่ทั้งหมด $A = \pi(13)^2 / 4 = 132.73 \text{ cm}^2$

จำนวนรูทั้งหมด $3.079 \times 132.73 = 408.75 \text{ รู}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ผลการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของห่อโล่ง แผ่นกระจายแบบลมธรรมดา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	178.3	177.06	175.14	86.65	85.56	84.35
20	155.4	154.60	152.07	71.92	71.42	69.83
30	130.83	135.71	130.57	56.46	59.53	56.3
40	113.5	120.44	111.55	45.56	49.92	44.32
50	99.15	105.14	98.48	36.52	40.29	36.10
60	90.68	94.37	89.42	31.19	33.51	30.40
70	83.45	86.45	82.54	26.64	28.53	26.06
80	77.89	80.17	76.65	23.14	25.57	22.36
90	73.18	75.87	72.36	20.17	21.87	19.66
100	69.5	71.53	69.39	17.86	19.14	17.79
110	66.78	68.95	66.75	16.15	17.51	16.13
120	65.15	66.84	64.33	15.12	16.18	14.60
130	64.04	65.58	63.82	14.42	15.39	14.28
140	63.20	64.62	63.14	13.89	14.79	13.85
150	62.72	62.93	62.70	13.59	13.72	13.58
160	62.34	61.88	62.39	13.35	13.06	13.38
170	61.05	61.07	61.89	12.54	12.55	13.07
180	60.88	60.55	61.35	12.43	12.22	12.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยโล่ง แผ่นกระจายลมแบบใบพัด

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	170.33	159.43	132.41	81.32	74.46	57.45
20	137.16	123.06	108.64	60.44	51.57	42.49
30	113.60	104.48	95.90	45.61	39.87	34.47
40	99.05	93.43	86.25	36.46	32.92	28.40
50	89.67	85.45	79.10	30.55	27.90	29.90
60	82.73	79.65	73.76	26.18	24.25	20.54
70	77.36	75.35	88.84	22.80	21.54	17.44
80	73.23	72.72	64.66	20.21	19.88	14.81
90	69.81	69.89	62.44	18.05	18.10	13.41
100	67.02	65.22	60.34	16.30	15.16	12.09
110	65.68	62.37	58.15	15.45	13.37	10.71
120	64.43	61.84	56.02	14.67	13.04	9.37
130	63.41	60.79	54.22	14.02	12.38	8.24
140	62.74	59.75	53.55	13.60	11.72	7.82
150	62.1	57.27	53.02	13.20	10.16	7.48
160	61.78	56.35	52.76	13.00	9.76	7.32
170	61.34	55.78	52.40	12.72	9.22	7.09
180	60.08	54.72	52.04	11.93	8.55	6.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยฉิวคลื่นขนาด (0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65)φ แผ่น
กระจายลมแบบธรรมดา

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	182.7	173.92	168.09	89.11	83.58	79.91
20	162.44	143.23	133.73	76.35	64.26	58.29
30	142.19	123.02	110.94	63.80	51.54	43.94
40	123.29	106.93	97.10	51.71	41.42	35.23
50	108.54	96.18	87.10	42.43	34.65	28.94
60	98.05	87.7	79.75	35.83	29.31	24.31
70	91.30	81.6	73.71	31.58	25.47	20.51
80	83.89	76.38	68.33	26.91	22.19	17.12
90	76.45	72.31	64.03	22.23	19.63	14.41
100	73.75	69.88	60.87	20.53	18.10	12.43
110	70.08	67.78	58.88	18.22	16.77	11.17
120	67.57	64.24	57.54	16.64	14.55	10.33
130	65.88	63.73	56.65	15.58	14.23	9.77
140	64.43	63.06	56.44	14.87	13.79	9.64
150	63.41	62.23	56.03	14.29	13.28	9.38
160	62.60	61.45	55.79	13.51	12.79	9.23
170	62.02	60.32	54.92	13.15	12.08	8.68
180	61.58	59.59	54.18	12.87	11.62	8.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.4 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยผัดกลิ่นขนาด (0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65)๐ แผ่น
กระจายลมแบบใบพัด

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	167.40	167.40	155.34	79.48	73.32	71.89
20	132.63	132.63	124.84	57.60	53.07	52.69
30	107.11	105.25	102.79	41.53	40.36	38.81
40	92.45	93.92	91.53	32.30	31.97	31.72
50	83.70	86.05	83.02	26.80	26.39	26.37
60	75.45	79.20	74.82	22.65	23.96	21.82
70	71.16	73.40	69.56	18.90	19.15	18.59
80	65.35	67.11	64.49	16.26	16.35	14.95
90	61.89	62.30	60.20	13.24	13.33	12.00
100	57.30	58.88	57.24	11.91	12.16	10.55
110	56.55	56.91	56.05	9.53	9.93	9.39
120	55.27	54.51	54.08	8.90	8.42	9.08
130	54.89	52.23	52.9	7.89	7.48	7.41
140	54.32	51.99	51.80	7.50	7.40	6.39
150	53.92	51.04	51.01	7.45	6.85	6.04
160	53.54	50.98	49.83	7.35	6.50	5.60
170	52.77	50.02	49.64	6.52	5.81	5.11
180	52.43	49.69	49.38	6.15	5.26	4.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอยพิวกลีนขนาด(0.3,0.4,0.5,0.6) แผ่นกระจายแบบลมธรรมดา
อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส
น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาทึ)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	177.32	172.14	168.82	85.72	82.46	80.82
20	149.51	135.75	124.32	68.51	59.56	52.36
30	121.74	108.87	102.75	50.74	42.64	38.79
40	104.95	94.44	90.35	40.95	33.56	30.98
50	93.61	84.88	81.59	33.03	27.54	25.00
60	84.93	77.39	74.78	27.57	22.82	21.18
70	70.10	70.17	67.67	22.93	18.28	16.71
80	70.72	64.35	61.13	18.63	14.24	12.44
90	64.24	59.65	56.90	15.40	11.66	9.93
100	61.25	54.89	52.32	12.67	8.45	6.83
110	57.37	51.66	49.80	9.89	6.63	5.46
120	55.29	48.33	47.98	8.91	5.31	4.84
130	52.66	46.85	45.67	7.06	3.60	3.63
140	50.82	45.89	44.45	6.10	3.00	3.10
150	49.98	44.60	43.84	5.57	2.57	2.78
160	49.25	44.02	42.97	5.11	2.37	2.39
170	48.74	43.44	42.32	4.77	1.97	1.71
180	48.12	42.88	41.77	4.40	1.82	1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.6 แสดงปริมาณความชื้นคงเหลือ ของหอมผิวกลิ่นขนาด(0.3,0.4,0.5,0.6) แผ่นกระจายลมแบบใบพัด
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	น้ำหนัก(กรัม)			ความชื้นคงเหลือ(%)		
	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf	1.3Umf	1.6Umf	2.0Umf
0	200	200	200	100	100	100
10	172.86	164.04	162.32	82.91	77.04	70.74
20	147.22	131.45	128.30	66.78	56.85	54.87
30	120.30	106	103.18	49.83	40.83	39.06
40	101.32	92.38	90.71	37.89	32.26	31.21
50	88.16	83.33	80.45	29.60	26.56	24.75
60	79.30	76.13	73.67	24.03	22.03	20.48
70	72.48	70.32	67.73	19.80	19.91	16.20
80	67.49	64.83	62.23	16.59	14.92	13.28
90	62.57	61.67	59.73	13.63	11.75	11.12
100	59.82	58.39	57.43	11.76	10.86	9.53
110	57.21	55.87	55.65	9.12	9.32	8.66
120	55.65	54.98	53.78	8.51	8.77	8.03
130	54.56	54.04	52.34	8.45	8.09	7.63
140	52.32	53.47	50.30	7.69	7.77	6.64
150	51.84	52.21	49.55	7.11	6.98	6.42
160	51.26	50.38	48.36	6.81	5.82	6.34
170	50.79	49.79	47.93	6.52	5.66	6.23
180	50.34	49.03	47.27	6.37	5.07	6.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.7 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอยทดลองแบบต่างๆที่
ความเร็วลม 1.3 Umf

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	ความชื้นคงเหลือ(%)					
	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อโล่ง	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อผิวคลื่น4ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อโล่ง	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อผิวคลื่น4ลูก
0	100	100	100	100	100	100
10	86.65	89.11	85.72	81.32	79.48	82.91
20	71.92	76.35	68.51	60.44	57.60	66.78
30	56.46	63.80	50.74	45.61	41.53	49.83
40	45.56	51.71	40.95	36.46	32.30	37.89
50	36.52	42.43	33.03	30.55	26.80	29.60
60	31.19	35.83	27.57	26.18	22.65	24.03
70	26.64	31.58	22.93	22.80	18.90	19.80
80	23.14	26.91	18.63	20.21	16.26	16.59
90	20.17	22.23	15.40	18.05	13.24	13.63
100	17.86	20.53	12.67	16.30	11.91	11.76
110	16.15	18.22	9.89	15.45	9.53	9.12
120	15.12	16.64	8.91	14.67	8.90	8.51
130	14.42	15.58	7.06	14.02	7.89	8.45
140	13.89	14.87	6.10	13.60	7.50	7.69
150	13.59	14.29	5.57	13.20	7.45	7.11
160	13.35	13.51	5.11	13.00	7.35	6.81
170	12.54	13.15	4.77	12.72	6.52	6.52
180	12.43	12.87	4.40	11.93	6.15	6.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.8 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอยทากสองแบบต่างๆที่
 ความเร็วลม 1.6 Umf
 อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส
 อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส
 น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	ความชื้นคงเหลือ(%)					
	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อโต่ง	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา ห่อผิวคลื่น4ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อโต่ง	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด ห่อผิวคลื่น4ลูก
0	100	100	100	100	100	100
10	85.56	83.58	82.46	74.46	73.32	77.04
20	71.42	64.26	59.56	51.57	53.07	56.85
30	59.53	51.54	42.64	39.87	40.36	40.83
40	49.92	41.42	33.56	32.92	31.97	32.26
50	40.29	34.65	27.54	27.90	26.39	26.56
60	33.51	29.31	22.82	24.25	23.96	22.03
70	28.53	25.47	18.28	21.54	19.15	19.91
80	25.57	22.19	14.24	19.88	16.35	14.92
90	21.87	19.63	11.66	18.10	13.33	11.75
100	19.14	18.10	8.45	15.16	12.16	10.86
110	17.51	16.77	6.63	13.37	9.93	9.32
120	16.18	14.55	5.31	13.04	8.42	8.77
130	15.39	14.23	3.60	12.38	7.48	8.09
140	14.79	13.79	3.00	11.72	7.40	7.77
150	13.72	13.28	2.57	10.16	6.85	6.98
160	13.06	12.79	2.37	9.76	6.50	5.82
170	12.55	12.08	1.97	9.22	5.81	5.66
180	12.22	11.62	1.82	8.55	5.26	5.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.9 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นคงเหลือในเมล็ดพริกไทยของหอยทากลงแบบต่างๆที่
ความเร็วลม 2.0 Umf

อุณหภูมิในการอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิห้อง 32 องศาเซลเซียส

น้ำหนักพริกไทยสุทธิ 200 กรัม

เวลา (นาที)	ความชื้นคงเหลือ(%)					
	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา หอยโล่ง	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา หอยผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบธรรมดา หอยผิวคลื่น4ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด หอยโล่ง	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด หอยผิวคลื่น8ลูก	แผ่นกระดาษ แบบใบพัด หอยผิวคลื่น4ลูก
0	100	100	100	100	100	100
10	84.35	79.91	80.82	57.45	71.89	70.74
20	69.83	58.29	52.36	42.49	52.69	54.87
30	56.3	43.94	38.79	34.47	38.81	39.06
40	44.32	35.23	30.98	28.40	31.72	31.21
50	36.10	28.94	25.00	23.90	26.37	24.75
60	30.40	24.31	21.18	20.54	21.82	20.48
70	26.06	20.51	16.71	17.44	18.59	16.20
80	22.36	17.12	12.44	14.81	14.95	13.28
90	19.66	14.41	9.93	13.41	12.00	11.12
100	17.79	12.43	6.83	12.09	10.55	9.53
110	16.13	11.17	5.46	10.71	9.39	8.66
120	14.60	10.33	4.84	9.37	9.08	8.03
130	14.28	9.77	3.63	8.24	7.41	7.63
140	13.85	9.64	3.10	7.82	6.39	6.64
150	13.58	9.38	2.78	7.48	6.04	6.42
160	13.38	9.23	2.39	7.32	5.60	6.34
170	13.07	8.68	1.71	7.09	5.11	6.23
180	12.73	8.22	1.69	6.87	4.36	6.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้